

LE NOUVEAU RÉALISME SCIENTIFIQUE

La légitimité du réalisme scientifique est toujours controversée, surtout sur la base des données de la microphysique. Nous essayerons, sur la base des données de cette discipline, d'esquisser les traits essentiels d'un réalisme, qui dépasse aussi bien la naïveté des réalisme intuitive, que le subjectivisme du positivisme.

1. Le réalisme est-il périmé?

Le réalisme intuitif constituait le présupposé ontologique de la physique classique. Or, les particularités de la microphysique et de la physique moderne en général: dualité onde-particule, transformation des particules élémentaires, proportionnalité de la masse et de l'énergie, particules considérés en tant que singularités de champ physique, caractère probabiliste de la microphysique etc. ont rendu caduc le réalisme intuitif du 19^e siècle. Le dépassement historique du réalisme intuitif, alimenta plusieurs courants épistémologiques et philosophiques modernes, dont le dénominateur est l'*anti-réalisme*. Signalons les plus caractéristiques:

1. Le courant positiviste. Selon le positivisme conséquent, les seules «réalités» légitimement acceptables sont les données sensorielles et les données de l'expérience. Les lois physiques ne sont que des relations formelles entre les données. Ainsi, elles ne possèdent pas de statut ontique: l'harmonie de la nature n'est que l'harmonie des formules mathématiques. Le solipsisme, et dans le meilleur des cas, l'intersubjectivisme, est l'abontissement, logiquement inévitable, de la thèse positiviste.

2. D'un autre côté, et souvent en symbiose avec des idées positivistes, une conception néo-platonicienne a été développée par Heisenberg, Jeans, Weizsäcker et d'autres éminents scientifiques. Ainsi Heisenberg identifie le réalisme scientifique au réalisme vulgaire qui accepte «un monde objectif réel dont les plus minuscules parcelles existent objectivement, au même sens qu'existent les pierres et les arbres» pour le rejeter par la suite et pour arriver à la conclusion qu'il n'y a plus de matière mais des ondes de probabilité et des formes pures identifiées aux formules mathématiques. Dans un esprit positi-

viste, Weizsäcker rejetta, lui aussi, le «réalisme métaphysique» qui postule que «les choses existent en réalité¹».

3. Partant souvent d'idées positivistes, Jeans, Eddington et d'autres scientifiques et philosophes ont abouti à des positions ouvertement idéalistes: la disparition de la matière, la faillite du déterminisme, l'existence d'un univers immatériel, etc. Dans un esprit analogue, Teilhard de Chardin a formulé une espèce d'énergetisme moderne, considérant l'énergie comme la substance ultime de l'Univers qui, grâce à une endélechie immanente, se dirige vers le point Omega — une sorte d'accomplissement aristotélicien ou hegélien du processus cosmique².

4. Il y a aussi des scientifiques plus modérés —et plus obscurs— qui rejettent, eux aussi, le réalisme, pour n'accepter qu'une sorte d'intersubjectivité de coloration positiviste, ou encore un «réalisme de la conscience³».

5. Finalement, il y a des scientifiques et des philosophes qui pensent que le débat concernant la dualité de la matière et de l'esprit est archaïque: une sorte de relique métaphysique enfoncée sans notre conscience. La science, selon cette conception «s'interroge maintenant avec un langage qui n'a fait qu'évacuer le mot matière, qui reste comme un carcasse vide⁴». La matière est un concept «perimé» n'étant valide que pour des esprits en différence de phase avec leur époque. La réalité «en soi» c'est «un peu métaphysique». Ainsi, la physique moderne est toute entière construite sur une «objectivité au sens faible⁵».

Nous ne discuterons pas les positions précédentes. Ainsi nous passerons directement à la question du réalisme scientifique.

2. Le réalisme intuitif et le réalisme passif.

Pourtant, les atomes et les particules dits élémentaires existent! Ils n'existent pas «comme les montagnes et les pierre», présents devant nous et

1. Cf. W. HEISENBERG, *Physics and Philosophy*, London, G. Allen and Unwin, 1958; IDEM, *Niels Bohr and the Development of Physics*, London, W. PAULI (ed.), Pergamon Press, 1955; C.F. VON WEIZSÄCKER, *The World View of Physics*, London, Routledge and Kegan Paul, 1952.

2. Cf. J. JEANS, *The Mysterious Universe*, trad. grecque, Athènes, Ikarus, 1947; IDEM, *Physics and Philosophy*, Cambridge at the University Press, 1948; A. EDDINGTON, *The Nature of the Physical World*, Comet Books; P. TEILHARD DE CHARDIN, *L'avenir de l'homme*, Paris, Seuil, 1962; IDEM, *Le phénomène humain*, Paris, Seuil, 1962.

3. Cf. B. D'ESPAGNAT, *A la recherche du réel*, Paris, Gauthier-Villars, 1979.

4. M. SERRES, *La matière aujourd'hui*, Paris, Seuil, 1981.

5. B. D'ESPAGNAT, *op. cit.*

accessibles à notre intuition. Pourtant ils *existent*: Ils existent indépendamment de notre conscience, en tant qu'êtres localisés, dotés de masse, de charge, de spin, et d'autres grandeurs physiques. Ce sont des êtres complexes, souvent éphémères, qui décrivent des trajectoires et signalent leur passage sur les clichés ou bien par une scintillation instantanée. Le réalisme classique de Démocrite, de Galilée, de Boyle, de Newton, de Boltzmann ne nous satisfait plus aujourd'hui, de plusieurs points de vue. Or, sa position fondamentale, celle concernant l'existence d'une réalité objective, conserve son entière validité. Le fait que les atomes ne sont pas comme «des pierres et les montagnes» ne signifie pas qu'il faudrait rejeter le réalisme scientifique et opter pour le conventionalisme de Duhem, de Poincaré et de Mach, ou bien pour l'énergétisme de Ostwald ou de Teilhard de Chardin.

Rappelons donc le principe réaliste. Selon ce principe, il y a une réalité objective, donc indépendante des hommes et de leurs moyens de recherche, et qui constitue l'objet des sciences. On peut isoler au sein de cette totalité une partie S, pour laquelle il est sensé d'en parler, sans se référer explicitement au reste du monde. (Cet isolement n'est pas absolu; il est pourtant approximativement réalisable, donc opératoire). On appellera S, système physique.

La définition précédente présuppose une certaine *séparabilité* des parties de la réalité. Or, la physique prérelativiste, postulant l'existence d'interactions à vitesse infinie, acceptait —implicitement— une certaine espèce de *non-séparabilité intrinsèque*. C'est curieux, mais c'est un fait, que le principe de séparabilité n'a pas été contesté par la physique classique.

Le principe réaliste implique que les systèmes physiques possèdent des propriétés et des éléments de réalité indépendants de la mesure, donc intrinsèques, ou bien «en soi». Or, cette affirmation, fondement de la physique classique, a été contestée par l'interprétation dominante de la microphysique, et cela, à partir du fait que dans un certain type de mesure des éléments de réalité nouveaux sont nés à travers l'interaction entre l'appareil et le système quantique. En plus, la séparabilité a été contestée sur la base de données expérimentales récentes.

On dit que la physique classique est «spontanément» réaliste. Il s'agit, en effet, d'un réalisme *vécu* et *pratiqué* à l'échelle macroscopique.

On accepte en physique classique que la mesure n'affecte pas l'état du système. On postule, par conséquent, que la mesure —simultanée ou successive— de toutes les variables du système serait possible, sans que la mesure de l'une affecte la valeur de l'autre. Ainsi, la connaissance de l'état du système serait complète. On sait que sur la base de cette connaissance, on peut définir un point de l'espace des phases et décrire le mouvement de la particule de



façon rigoureuse. Cette possibilité théorique a été considérée comme une confirmation de la validité du *déterminisme*, auquel elle conférait une base physique solide.

Il y a pourtant les états statistiques classiques. On sait que ces états sont représentés par des mesures probabilistes dans l'espace des phases. Or, on peut considérer un état présentant des dispersions statistiques comme une description *incomplète* de la réalité. Ainsi, on a été amené à postuler la possibilité d'introduire des variables supplémentaires —les variables cachées classiques— pour définir un état sans dispersions (un point dans l'espace des phases). On aurait ainsi une description complète de S, donc une vérification de la validité du déterminisme, même dans le domaine de la microphysique. *Le hasard classique* serait ainsi non essentiel, ou bien *réductible*. Laplace fut un des plus éminents représentants de cette conception.

La situation précédente trouva son expression au niveau logique. La compatibilité de toutes les observables caractérisant l'état d'un système classique implique, en effet, celle de toutes les propositions concernant ce système. Ainsi le treillis des propositions relatives à un système classique est un treillis de Boole: à chaque état correspond une classe de propositions simultanément vraies. Mais la structure booléenne est la structure de la *logique formelle*. Par conséquent, cette logique est conforme aux idéalizations de la physique préquantique.

Or, la logique formelle est la logique de l'identité. Et si la structure des propositions classiques est conforme à cette logique, c'est à cause du fait que la physique classique exclut la contradiction et le changement. En effet, l'objectivité postulée par le réalisme classique est un présupposé, en même temps qu'une implication du statut d'objectivité accordée aux lois physiques. L'objectivité classique repose par conséquent sur l'hypothèse que la mesure ne perturbe pas l'état du système, donc sur l'hypothèse que le système garde son identité pendant la mesure et le mouvement. Ainsi la structure booléenne des propositions et la conservation de l'identité du système ne sont que deux aspects complémentaires d'une objectivité que l'on pourrait appeler *objectivité passive*. (Il va de soi qu'il ne faut pas prendre cette passivité dans un sens absolu. En physique classique on a des interactions, des mouvements et même des changements. Newton lui-même parlait des *principes actifs*, au-delà des principes passifs).

Il est intéressant de noter que la structure de Boole n'est pas une condition suffisante pour que le mouvement de la particule soit déterministe. Pour cela, une condition nécessaire et suffisante est l'atomicité du treillis des pro-

positions. Or, *l'atomicité* est une autre façon de parler de la conservation de l'identité du système.

Pourtant, l'objectivité passive présuppose une série d'idéalisations:

- a. Identification de la particule au point matériel.
- b. Validité rigoureuse du principe d'inertie.
- c. Absence de fluctuations de l'état du système.
- d. Influence négligeable de l'appareil de mesure.

Or, ainsi que l'a démontré M. Born (1955), il est impossible, même dans le cas de systèmes classiques, de mesurer exactement la position d'une particule dans l'espace des phases. L'ensemble potentiel représentant les états possibles d'une particule, est un ensemble statistique⁶.

Les dispersions statistiques caractérisent, par conséquent, même les états des ensembles classiques. Ainsi, sous l'apparence calme de la loi mécanique ou bien dynamique, opèrent les lois du hasard. Car la loi statistique est en réalité la forme la plus générale de loi physique⁷. De ce point de vue, la contradiction entre la mécanique classique et la mécanique quantique n'apparaît pas irréductible. Mais au niveau quantique on découvre un nouveau type d'objectivité, qui dépasse les limites de la logique formelle. La caractéristique essentielle de ce type d'objectivité, c'est le fait que les systèmes quantiques ne conservent pas, sous certaines conditions, leur identité, donc que le principe correspondant de la logique formelle n'est pas en général valable pendant la mesure.

3. La notion d'objectivité dynamique.

L'objectivité passive présuppose donc le postulat selon lequel le système garde son identité pendant le mouvement, ainsi que pendant la mesure. Les systèmes quantiques, au contraire, se transforment «spontanément» dans la nature. La mesure, de l'autre côté, modifie leur état: pendant l'interaction entre l'appareil et le système quantique, certaines éléments de réalité peuvent disparaître, tandis que d'autres se réalisent par la transformation d'éléments préexistants. En mécanique quantique nous sommes, par conséquent, en présence d'une situation nouvelle: *la transformation* des systèmes quantiques, donc la réalisation d'éléments nouveaux caractérisant l'état après la mesure. L'appareil, dit-on, perturbe l'état du système. Peut-on, par conséquent parler

6. Voir F. BOPP, *Observation and Interpretation*, Butterworths Publ., 1957. Aussi, M. FIERZ, *Idid.*

7. Voir E. BITSAKIS, *Physique et Matérialisme*, Paris, Ed. Sociales, 1983.

en microphysique, d'objectivité au sens ontologique et gnoséologique du terme?

Selon les inégalités de Heisenberg, il est impossible de mesurer simultanément deux observables dont les opérateurs ne commutent pas. On sait que l'affirmation selon laquelle ces inégalités posent une limite supérieure à la connaissance des systèmes quantiques est contestée. Acceptons pourtant leur interprétation courante, selon laquelle la description quantomécanique actuelle est *complète et définitive*. Or, cette interprétation affirme en même temps que les inégalités de Heisenberg interdisent une description complète des systèmes quantiques. L'incohérence de l'interprétation «orthodoxe» est évidente.

Supposons néanmoins que l'on arrive à mesurer simultanément la position et l'impulsion d'une particule, donc que l'on arrive à définir sa position dans l'espace des phases. Cette connaissance serait, évidemment, suffisante pour la description du mouvement futur de la particule dans les conditions d'un isolement idéal. Supposons par la suite que notre particule interagit avec un appareil de mesure et que son état se modifie. La connaissance de sa position et de son impulsion ne suffit pas, évidemment, pour la prévision de son état nouveau. Pourquoi? Parce que la transformation de l'état de la particule est un changement qualitatif, un phénomène *non linéaire*, non décrit par le formalisme actuel. Ainsi, *même une description «complète» dans l'espace des phases, ne serait pas suffisante pour la prévision de ce phénomène spécifiquement quantique.*

Selon le «principe» de non existence des grandeurs non observées, que l'École positiviste considère comme un article de foi, sans le respecter pour autant, les inégalités de Heisenberg interdisent l'existence simultanée de valeurs précises pour les variables conjuguées. Ce postulat, les spécificités de la mesure, ainsi que le caractère probabiliste de la nouvelle mécanique, constituent la base de l'anti-réalisme de l'École orthodoxe. Pourtant l'anti-réalisme n'est pas accepté par beaucoup. Ainsi, selon un point de vue plus modéré, nous pouvons parler d'*objectivité forte* en physique classique, mais pas en microphysique; dans ce domaine on ne peut pas parler que d'*objectivité faible*⁸.

La mesure, dit-on, perturbe de façon imprévisible et incontrôlable le système quantique. Ainsi, nous ne pouvons pas vérifier la validité du déterminisme, ni même l'existence des éléments de réalité caractérisant le système

8. Voir B. D'ESPAGNAT, *A la recherche du réel.*

indépendamment de l'«observation». A la limite, le système n'a pas même d'existence en soi, indépendante de l'appareil.

Pourtant une interprétation différente est tout à fait possible:

- a. Pour une certaine catégorie d'ensembles quantiques, la mesure d'une observable donne une seule valeur propre (état pur au sens étroit du terme-espace de Hilbert unidimensionnel). Dans ce cas-là, deux hypothèses seraient possibles: ou bien
 - i. Les éléments de réalité qui caractérisent l'état préexistant (mesure idéale, pas de perturbation de l'état), ou bien
 - ii. Ces éléments se réalisent par la transformation d'éléments de réalité préexistants (mesure de première espèce, perturbation de l'état).
- b. Dans le cas d'un mélange, l'appareil décompose l'ensemble statistique initial en des sous-ensembles purs. Nous pouvons, par conséquent, postuler que les états différents sont en acte avant la mesure qu'ils sont séparés par l'appareil.
- c. Le cas le plus intéressant et le plus difficile, est celui d'un état initial pur (tous les systèmes sont représentés par le même vecteur d'état) qui donne un mélange. Il s'agit de la soi-disante «réduction du paquet d'ondes» ou de la «décomposition du vecteur d'état»:

$$\Psi = \sum_i C_i \Psi_i \text{ et } \Psi \xrightarrow{\text{mesure}} [\Psi_i] \text{ avec } P_i = |c_i|^2$$

Comment pourrait-on comprendre ce phénomène? On peut resumer les positions fondamentales de l'interprétation de Copenhague dans les termes suivants:

- a. La «réduction du paquet d'ondes nécessite l'intervention de l'observateur (d'une conscience); à la limite, l'univers tout entier sera impliqué dans ce processus, qui est pourtant... impossible.
- b. Les états préexistent et sont séparés par l'appareil, donc rien de nouveau n'est produit par la mesure.
- c. Les systèmes quantiques ne sont pas des objets réels: Ils sont des potentialités vagues, des idéalités mathématiques.

L'École de Copenhague, avec ses catégories formelles, est incapable de saisir la nouvelle situation. Nous pouvons pourtant esquisser une conception différente, réaliste. Dans le cas 3, l'état pur se transforme, à cause de l'interaction du système avec l'appareil, en mélange, à travers un processus irréversible et dissipatif de transformation d'éléments de réalité de l'ancien état, en des éléments nouveaux. Nous pourrions appeler l'ensemble statistique initial *mélange potentiel cohérent*, pour éviter le terme préquantique de «superposition d'états» et pour mettre en relief le caractère dynamique du pro-

cessus: le fait que les états nouveaux sont créés pendant la «mesure⁹».

Les états dans le cas 3 ne préexistent pas. Ils sont des *états potentiels*, donc l'espace de Hilbert qui décrit l'ensemble statistique est un *espace potentiel*, ou bien un espace de *potentialités*. Les éléments de réalité nouveaux étaient de *potentialités*. Les éléments de réalité nouveaux étaient des éléments potentiels avant la mesure.

L'analyse précédente nous amène à aborder une situation nouvelle et importante: l'existence d'une dialectique entre le potentiel et le réel. Si l'on fait une mesure sur une propriété *a*, et si la réponse est *oui*, alors *a* est actuelle à la fin de la mesure. Cette certitude pourtant ne nous dit rien sur la question si *a* était vraie *avant* la mesure. Car *a* peut être une propriété potentielle avant la mesure, et devenir réelle pendant ce processus de transformation du système. Une propriété est *actuelle*, si nous pouvons être sûrs que l'appareil ne perturbe pas le système, donc qu'il n'y a pas de création d'éléments nouveaux pendant la mesure. La possibilité de prévoir avec une probabilité égale à 1 la réponse oui, ne prouve pas que la propriété était réelle avant la mesure. Le cas où *a* est réalisée pendant la mesure peut être formellement décrit comme une «projection» de Ψ dans l'espace des états:

$$P_i |\Psi\rangle \rightarrow |\Psi_i\rangle \text{ avec une probabilité } P_i = \langle \Psi | P_i | \Psi \rangle$$

Pourtant cette transformation n'est pas une «projection», ou bien une «réduction», acausale et instantanée; elle est un processus de transformation irréversible, ayant une *épaisseur temporelle*.

On peut appeler un état pur (au sens étroit, espace de Hilbert unidimensionnel), état *ontique* (Primas) dans le cas spécifique où les éléments de réalité existent avant la mesure.

Ce qui a été dit implique une définition correspondante des mesures. Nous ne pouvons parler de mesure idéale que dans le cas où la propriété *a* est réelle avant la mesure. Dans le cas de «superposition» il faut parler —ainsi que nous l'avons déjà souligné— de mesure de première espèce, car dans ce cas-là, des propriétés potentielles deviennent réelles.

La situation précédente met en relief le caractère essentiel de la mesure. On n'a pas besoin de supposer, devant l'impasse de l'interprétation orthodoxe, que les états préexistent dans le cas 3, ce qui serait «absurde» (L. de Broglie). Aussi on évite le subjectivisme (l'intervention d'une «conscience»), qui ne résout pas la question de la «réduction du paquet d'ondes». La conception esquissée est conforme à la nature polyvalente du monde microphysique.

9. Voir E. BITSAKIS, *Le problème du déterminisme en Physique*, Paris, Thèse d'État, 1976.

Ainsi on peut parler dans ce domaine *d'objectivité dynamique, versus l'objectivité passive de la physique mécaniste*.

Mais peut-on objecter: Comment d'un état initial on arrive à plusieurs états différents? Ce fait ne constitue pas la négation du déterminisme et —à la limite— de la réalité microphysique?

Les débats autour de cette question, débats qui n'ont pas cessé depuis un demi-siècle, sont connus. On pourrait pourtant affirmer que la question est *mal posée*. Une connaissance exacte de la position et de l'impulsion de la particule est suffisante pour la confirmation du déterminisme mécaniste. Cette connaissance, au contraire, ne serait pas suffisante, ainsi que nous l'avons noté, pour la prévision du comportement de la particule pendant l'interaction avec l'appareil. Car la mesure en microphysique n'est pas un phénomène mécanique? *elle est un processus de transformation non réductible en termes mécaniques*.

En mécanique quantique opère, en effet, un nouveau type de déterminisme, que nous avons appelé *déterminisme statistique quantique*. Ce nouveau type n'implique pas l'absence de causalité et de détermination. Il exprime pourtant l'existence de situations plus fines et variables que les situations classiques, donc d'une objectivité dynamique et multivalente. La distribution des probabilités est *déterminée* par les variables essentielles et les conditions. En même temps il est possible d'expliquer, en principe, la réalisation de tel ou tel état pendant chaque mesure individuelle, en attribuant à l'état une *structure fine aléatoire*, conformément aux idées de l'École de L. de Broglie, et plus généralement de l'École réaliste¹⁰.

On pourrait pourtant dire qu'on sait rien sur ce qui se passe avant l'«observation», c'est-à-dire avant la mesure, donc que l'on peut rien dire sur l'état avant la mesure, car une grandeur «non observée» n'existe pas. Or, une telle objection n'est pas seulement arbitraire. Elle accepte, en plus, implicitement, une limite à la connaissance du monde physique. Tendanciellement, elle conduit à l'évacuation de sa matérialité, donc au rejet de l'objectivité.

Le principe de non-existence n'est pas seulement arbitraire. (Il est en réalité une transcription plus fine du postulat positiviste). Il est, en plus, fondé sur une conception authentiquement mécaniste. En effet, pour l'École orthodoxe, la *réalité* s'identifie à la *permanence*. Le changement et le devenir ne sont considérés comme des modalités de l'être, mais comme des preuves

10. Pour une conception réaliste de la mesure, voir E. BITSAKIS, *An. Fond. L. de Broglie*, 5, 263 (1980). Pour un traitement réaliste et quantitatif de la question, voir Gisin, Piron, *Let. Math. Phys.*, 5, 379 (1981).

d'inexistence. La transformation des particules élémentaires, par exemple, signifie que ces particules ne sont pas des êtres réels, mais de «potentialités mal définies», une violation éventuelle de la loi de conservation du nombre baryonique ou du nombre leptonique signifierait l'anéantissement de la matière, et ainsi de suite. Pour la pensée positiviste-mécaniste, le réel s'identifie à quelque chose d'universel, de non-périssable, qui serait, en plus, mathématiquement descriptible. Le point de départ de cette conception est une idée mécaniste sur le réel, vaguement apparentée aux conceptions des Eléates, idée qui aboutit souvent à la numérologie néopythagoricienne.

Cette conception confond l'objectivité à la permanence. Elle ne peut pas saisir d'autre forme d'objectivité, que l'objectivité passive. Elle identifie donc toute forme de réalisme au réalisme mécaniste, car elle ne peut pas mettre en œuvre d'autres concepts que ceux de la logique de l'identité.

L'interprétation de la mesure, et en particulier la soi-disant «réduction du paquet d'ondes», constitue finalement le point faible de l'interprétation de Copenhague. Car la mesure, processus *irréversible* de transformation, met en relief la nature dynamique du microphysique, ainsi que celui de l'interaction entre l'appareil et le système quantique. L'émergence de nouveaux éléments de réalité n'est pas un argument contre l'objectivité des particules élémentaires. Car les éléments nouveaux ne surgissent pas du Néant, mais *du fond du réel*, (Hegel) par transformation d'éléments préexistants. Les lois de conservation et les règles de sélection qui régissent ces transformations, sont l'expression quantitative du caractère objectif et déterministe de ces processus. En plus, ainsi que l'avait anticipé Aristote, *le réalisé est la mesure du potentiel*.

En microphysique se manifeste le rôle actif, non seulement de l'appareil, mais aussi du sujet: de l'«observateur». Pourtant, son intervention n'introduit aucun subjectivisme (dans le sens agnostique). Car l'intervention du sujet est médiate et s'exerce à travers les appareils de mesure; elle porte donc sur une réalité que l'appareil peut modifier selon des processus objectifs. Le concept d'objectivité dynamique évite les erreurs, diamétralement opposées, aussi bien du réalisme naïf qui ne peut pas saisir la transformation, que de sa négation naïve, celle du positivisme, qui ne voit que les «events» et les «data».

4. L'École de Copenhague devant les difficultés d'interprétation de la mécanique quantique.

Les concepts utilisés jusqu'ici, sont en dehors du cadre de la logique formelle. C'est une des raisons pour lesquelles l'École positiviste a été incapa-

ble de donner une interprétation conforme aux nouvelles réalités, car à part de quelques intuitions géniales, ses analyses ne dépassaient le schéma rigide de cette logique. Ainsi, l'échec de l'École est du, d'abord, aux difficultés de comprendre une réalité avec des lois inédites, et en même temps à l'étroitesse de sa théorie de la connaissance et de son appareil conceptuel formel.

Quelles étaient donc les caractéristiques de la nouvelle discipline qui ont constitué un défi pour l'épistémologie? Nous essayerons de les énumérer très brièvement.

Tout d'abord, la microphysique porte sur une réalité inaccessible à l'intuition. L'accès à cette réalité, cachée aux sens, est médiatisé par des appareils compliqués et souvent énormes. Ainsi les êtres minimes du niveau microphysique sont «perdus» à l'intérieur de l'appareillage, ne laissant qu'une trace infime ou une scintillation instantanée. Pourtant leur identité est restituée à partir de ces données médiates.

Ce monde caché à l'intuition est, corrélativement, décrit à l'aide de concepts non intuitifs. Au delà des concepts classiques, tels que la masse, la charge, l'impulsion ou l'énergie, concepts d'ailleurs transformés profondément pour s'adapter aux nouvelles réalités, on parle en mécanique quantique de spin, de parité, d'un ensemble de «nombres quantiques», de fonctions d'onde ou de vecteurs d'état, d'espaces vectoriels abstraits, d'états en superposition, de paquets d'ondes, de fonctions généralisées tout à fait «inorthodoxes», comme la distribution de Dirac, etc. Pourtant l'abstraction mathématique et le calcul symbolique expriment une réalité physique. L'erreur des pythagoriciens —de prendre les symboles pour la réalité ultime— a été reproduite de notre temps, par plusieurs physiciens et philosophes.

Qu'est-ce que c'est donc la *fonction d'onde*? Elle représente des ondes réelles, ainsi que l'avait pensé, au début, Schrödinger? Elle représente des ondes-particules selon la dialectique de L. de Broglie? Ou bien elle ne représente que des ondes de probabilité, donc une abstraction, ou tout simplement des ondes de connaissance, ainsi que le soutiennent certains des fondateurs de la microphysique? Il y a, bien sûr, l'interprétation de Max Born, selon laquelle le carré de la fonction d'onde représente une densité de probabilité, à partir de laquelle on peut calculer la probabilité de présence d'une particule dans un élément d'espace, ou la création d'un état propre lors de la «mesure».

Pourtant, cette interprétation n'a pas été respectée dans la pratique par l'École orthodoxe. Ainsi, malgré le fait que tout le monde accepte, en principe, l'interprétation statistique formulée par M. Born, dans la pratique le plus souvent on affirme que les lois quantomécaniques concernent le système individuel (single system interpretation). Ainsi, par exemple, on considère que

le concept de paquet d'ondes représente une particule réelle, ouvrant ainsi la voie vers les mystères de sa «réduction», mystères qui ne recouvrent que le fait que la particule se transforme dans la nature, ainsi qu'à cause de l'interaction avec l'appareil de mesure. D'une manière analogue, les dispersions statistiques décrites par les inégalités de Heisenberg ont été considérées comme caractéristiques de la particule individuelle. Ainsi un nouveau champ de mystères a été ouvert, dominé par le soit disant indéterminisme fondé sur ces fameuses inégalités.

La physique classique traitait des entités stables en général. Les entités microphysiques se transforment «spontanément» dans la nature ou bien pendant la mesure, manifestant, le plus souvent, une multitude de potentialités. Ces transformations non linéaires, qui ne sont pas décrites par le formalisme linéaire actuel, ont été mystifiées sous le concept de la «réduction du paquet d'ondes». Et cette réduction, comme nous l'avons déjà noté, est considérée comme un saut instantané et acausal dans le cadre de l'interprétation orthodoxe, tout en étant considérée par cette même École comme impossible. Ainsi von Neumann inventa le nécessaire *deus ex machina*, c'est à dire l'*observateur*, qui par son intervention provoque la «réduction du paquet d'ondes». La transformation des entités quantiques a été ainsi interprétée comme un événement «physico-psychique», selon le principe du parallélisme psychophysique de von Neumann.

L'interprétation de la mécanique quantique était (et reste) une tâche délicate. L'aberration épistémologique de l'École de Copenhague a été, tout d'abord, le résultat de difficultés inscrites dans les faits et dans le formalisme. Elle est due, en même temps, à l'influence de l'idéologie dominante dans les milieux scientifiques entre les deux guerres: le positivisme ainsi que de la tradition néoplatonicienne et d'autres courants idéalistes. L'indéterminisme, l'antiréalisme, la non localité, la complémentarité comprise comme incompatibilité et non existence simultanée de grandeurs ou de propriétés complémentaires, le solipsisme qui est l'implication logique du subjectivisme etc., étaient les fruits du jeu subtil entre les difficultés objectives et les présupposés philosophiques dont chaque scientifique est porteur.

L'interprétation de Copenhague n'est pas exemple de contradictions internes. En même temps elle engendre des paradoxes et conduit à des impasses. L'École régliste en a profité pour mettre en relief les faiblesses internes de l'École rivale.

En effet, dès 1927, des représentants éminents de l'École réaliste, ont élaboré la base pour une interprétation réaliste de la nouvelle discipline. Ils ont essayé, en même temps, de mettre en relief les points faibles de l'interpré-

tation positiviste. La mise en relief des «paradoxes» inévitables dans le cadre de l'interprétation orthodoxe, constitue un des arguments essentiels de l'École réaliste.

Le premier de ces «paradoxes» a été formulé par Einstein pendant le cinquième Conseil de Solvay (1927). Sur la base d'une «expérience de pensée», Einstein démontra que l'interprétation orthodoxe implique: a) La violation de l'interprétation statistique. b) L'introduction d'une *action-à-distance*, *ad hoc*, donc, d'une vague non-localité. c) La nécessité d'un mécanisme qui expliquerait l'action-à-distance et le collapse instantané du «paquet d'ondes¹¹».

Quelques années plus tard, E. Schrödinger démontra aussi, à l'aide de son fameux paradoxe (1935), que: a) l'incapacité de l'interprétation non statistique à comprendre le fait que la fonction d'onde est la mesure des potentialités de l'ensemble statistique et b) le fait que cette École transforme en phénomène psychique l'impossibilité du formalisme actuel de décrire la transformation non linéaire des systèmes quantiques¹².

Un autre paradoxe a été formulé par L. de Broglie (1959). Ce paradoxe a mis aussi en relief la violation de l'interprétation statistique par l'École orthodoxe, l'interprétation anti-réaliste du principe de superposition par cette École, ainsi que l'introduction d'une non-localité mystérieuse, d'une action-à-distance, pour l'explication de la «réduction de paquet d'ondes¹³».

Le paradoxe, enfin, d'Einstein, Podolsky et Rosen (1935), fut un argument contre le complétude de la description quanto-mécanique et en faveur de la possibilité d'une description plus complète de la réalité microphysique¹⁴.

Les paradoxes précédents ont défendu deux thèses épistémologiques et philosophiques fondamentales: le réalisme et le déterminisme.

5. Le sens physique du principe de superposition.

Le problème crucial sous-jacent ci-dessus est celui de la «réduction du paquet d'ondes». Or, ce concept préquantique, introduit en microphysique par Louis de Broglie et Erwin Schrödinger à une époque où ses bases physiques étaient plus obscures qu'aujourd'hui, présuppose la validité du prin-

11. A. EINSTEIN, *Électrons et Photons*, (Rapports et discussions du Cinquième Conseil de Physique, Solvay 1929), Paris, Gauthier-Villars, 1928, p. 253.

12. Pour une analyse du paradoxe et une critique détaillée de la conception de Copenhague, cf. E. BITSAKIS, *Ann. Fond. L. de Broglie*, 5, 263 (1980).

13. L. DE BROGLIE, *J. de Phys. et de Rad.*, 20, 963 (1959).

14. A. EINSTEIN, B. PODOLSKI, N. ROSEN, *Phys. Rev.*, 47, 777 (1935).

cipe de superposition en mécanique quantique. Examinons donc la signification physique de ce principe.

L'interprétation de Copenhague est essentiellement une interprétation *non statistique* (single system interpretation). Ainsi elle considère la superposition comme une vraie superposition d'états réels avant la mesure. Corrélativement, elle considère le paquet d'ondes comme le résultat d'une superposition d'ondes planes réelles, selon le modèle de l'optique classique. Cette interprétation classique est aussi acceptée implicitement dans les prémisses de l'«impossibility proof» de von Neumann¹⁵. Ainsi, pour prendre un exemple, des photons polarisés à 45° par rapport à l'axe de l'analyseur sont, selon cette conception, formés d'une superposition de deux états réels. C'est l'interaction avec l'appareil qui détruit la superposition et fait à chaque mesure une sélection d'un des deux états préexistants. Le postulat de projection, la réduction du paquet d'ondes le collapse du paquet d'ondes etc., sont des expressions concrètes de cette interprétation classique du principe de la superposition en mécanique quantique.

De l'autre côté, l'interprétation non statistique implique une position *agnostique* concernant le principe de superposition. Il est vraie que Heisenberg, Bohr et von Neumann avaient quelques intuitions concernant le jeu entre le potentiel et le réel pendant ces processus de transformation, sans arriver à une interprétation statistique cohérente. V. Fock parlait, lui aussi, de potentialités, mais sa dialectique vague ne lui a pas permis d'arriver à une analyse concrète du problème.

Le principe de superposition en mécanique quantique concerne, ainsi que nous l'avons souligné, des états potentiels, non réels: il est l'expression quantitatif des potentialités de l'ensemble statistique dans des conditions externes données. En physique classique, au contraire, ce principe exprime la superposition d'états réels. Car, ainsi que le dit S. Gudder, la seule superposition mesurable en physique classique est un mélange d'états réels. C'est une distinction fondamentale entre la mécanique classique et quantique — dans le dernier cas on trouve des superpositions sans analogue classique¹⁶.

Une superposition classique ne produit pas des états nouveaux. C'est-à-dire, la mesure dans ce cas ne provoque pas la création d'éléments de réalité nouveaux. Le principe de l'identité, de l'autre côté, est exprimé dans la structure booléenne des propositions classiques forment un treillis booléen σ -com-

15. Cf. E. BITSAKIS, *Determinism in Physics*, E. BITSAKIS, N. TAMBAKIS (Eds), Athens, Gutenberg, 1985.

16. S. GUDDER, *J. Math. Phys.*, 11, 1037 (1970).

plète et atomique, est une des expressions formelles de la différence épistémologique entre la mécanique classique et quantique.

Dans le cadre de la «single system interpretation», il est impossible de saisir le sens réel du principe de superposition, en tant qu'expression et *measure* des potentialités de l'ensemble quantique et aussi de voir la mesure comme un processus non linéaire, irréversible et dissipatif de réalisation des potentialités de cet ensemble. Dans le cadre de cette interprétation formaliste, la «réduction» est même impossible. Ainsi —on l'a déjà noté— la conscience est introduite comme le *deus ex machina* qui va provoquer la «réduction». Le principe du parallélisme psycho-physique de von Neumann, le libre choix professé par Jordan, Dirac, Heisenberg, Bohr et d'autres, l'interprétation subjectiviste de Bohr, l'incapacité de l'École orthodoxe de donner une interprétation rationnelle de la mesure, les paradoxes qui surgissent de l'interprétation de cette École, sont les conséquences inévitables de la «single system interpretation» de la mécanique quantique et de l'interprétation préquantique du principe de superposition.

Pourtant ce principe n'a pas le même sens physique et ne recouvre pas les mêmes processus dans tous les cas où il est valable. Ainsi, nous pouvons distinguer les cas suivants:

a) Le cas classique. Dans ce cas, les états préexistent par rapport à la mesure. Par conséquent, la mesure sépare le mélange initial en états purs.

b) Le cas quantique. Dans ce cas les états ne préexistent par rapport à la mesure. Ils sont créés pendant l'interaction entre le système et l'appareil de mesure, par un processus de réalisation des potentialités de l'ensemble statistique. La dialectique entre le potentiel et le réel démontre la naïveté de l'interprétation positiviste. Dans ce cas il n'y a pas de «réduction» d'une entité fictive¹⁷, mais la transformation d'une entité réelle.

c) Il y a aussi des cas semi-classiques, ainsi que d'autres plus compliqués qui demandent une interprétation différente. Tel est par exemple le cas de la fameuse expérience des deux fentes¹⁸. Des expériences récentes ont jeté une lumière nouvelle sur cette vieille question¹⁹. Ainsi la question: les particules

17. Cf. les textes de DE BROGLIE et de SCHRÖDINGER, in: *Louis de Broglie physicien et penseur*, Paris, Albin Michel 1953.

18. Pour une première conception de cette expérience, cf P. A. M. DIRAC, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford, Clarendon Press, 1962, p. 9.

19. H. RAUCH, *Proc. Int. Symp. of Quantum Mech.*, Tokyo, 1983, p. 277.

quantiques sont-elles des corpuscules²⁰, des «ondes de probabilité», ou bien des êtres réels de nature double, selon l'intuition géniale de L. de Broglie est de nouveau à l'ordre du jour.

L'éclaircissement du contenu physique de principe de superposition, sur un événement décisif pour la compréhension de la nature du monde microphysique²¹.

6. Les probabilités en mécanique classique et quantique.

Nous voulons maintenant formuler un certain point de vue sur le problème de la nature des probabilités, intrinséquement liée à la question de la nature de la réalité physique.

Nous avons noté qu'en mécanique classique, on accepte que la mesure ne perturbe pas le système. Qu'on accepte qu'il est in principe possible de mesurer toutes les observables du système (compatibilité des observables) et de définir un point dans l'espace des phases. Ainsi les propositions classiques constituent des sous-ensembles de l'espace des phases mesurables selon Lebesgue. Pour chaque état classique il y a une classe de propositions simultanément vraies. La structure booléenne des propositions classiques est une implication des idéalizations classiques précédentes.

La structure des propositions classiques est celle d'un treillis boéléen, σ -complète et atomique. Or, l'atomicité, ainsi que nous l'avons déjà noté, est une expression du fait de la conservation de l'identité du système pendant la mesure. Par conséquent, sur la base des idéalizations classiques, nous sommes amenés à la conclusion qu'une distribution probabiliste classique concerne des états réels et non pas potentiels — que les états existent *avant* la mesure.

Un état classique est représenté par une mesure probabiliste non dispersive. Les états statistiques sont représentés par des mesures probabilistes dans l'espace des phases. Or, dans le cadre du déterminisme et du réalisme mécanistes, un état dispersif est considéré comme une description *incomplète* de la réalité. Ainsi l'on accepte la possibilité d'introduire dans la description du système un ensemble de variables supplémentaires et de définir un état sans dispersions (dispersion free state). Les probabilités classiques sont, par conséquent, *réductibles* à une description déterministe; le hasard est, corrélatif-

20. Cf. A. LANDÉ, *From Dualism to Unity in Quantum Physics*, London, Cambridge University Press, 1960; IDEM, *New Foundations of Quantum Mechanics*, London, Cambridge University Press, 1965.

21. Pour le principe de superposition, cf. E. BITSAKIS, *Le problème du déterminisme en physique*, IDEM, A generalization of the EPR criterion of reality, *Physics Essays*, 4, N°1 (1991).

ment, une catégorie *épistémique*, exprimant notre ignorance relative de l'état vrai du système.

On sait que Laplace a tiré les conséquences extrêmes de cette conception mécaniste. Du moment que l'univers est une machine dont chaque état est l'effet certain de l'état antérieur, on peut imaginer une intelligence qui, si à un instant donné connaît «toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus petit atome; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé seraient présent à ses yeux²²». La marche de l'univers-machine, est déterminée de façon absolue. Ainsi la conception classique des probabilités est un des éléments d'une conception globale sur la nature: la conception mécaniste. Pour cette conception:

- a. Il y a une réalité physique indépendante de l'homme (réalisme).
- b. Les événements se produisent grâce à des interactions instantanées (actions à distance) et objectives.
- c. L'espace euclidien est une forme vide, indépendante de la matière, scène illimitée des phénomènes. Il s'agit du même pour le temps universel, absolu.
- d. Les causes déterminent les effets avec une probabilité égale à 1. Les mêmes causes produisent toujours les mêmes effets (Newton).
- e. Les lois de la nature sont objectives. Elles possèdent donc un statut ontique et non simplement épistémique.
- f. L'univers-machine pratiquement n'évolue pas, chaque système étant la simple structuration de ses éléments constitutifs. La qualité et le changement qualitatif sont exclus de l'univers mécaniste.

Nous savons aujourd'hui les limites de la conception mécaniste. Nous connaissons, corrélativement, les limites de la conception mécaniste sur la probabilité. Nous avons déjà noté que Born, Bopp et d'autres physiciens ont soutenu que même la mécanique classique décrit en réalité des ensembles statistiques, car il est impossible de connaître exactement la position d'une particule dans l'espace des phases et aussi parce que, à cause de l'incertitude des conditions initiales, dues à l'imprécision inévitable de la mesure, les prévisions de la mécanique classique ne concernent pas une trajectoire précise, mais un ensemble de trajectoires caractérisées par une distribution probabiliste²³.

22. LAPLACE, *Oeuvres Complètes*, Paris, Gauthier-Villars, vol. 7, p. vi.

23. Cf. F. BOPP, *op. cit.* et M. BORN, *J. Phys. et Rad.*, 20, 43 (1959).

Mais d'un autre point de vue, la contradiction entre les probabilités classiques et quantiques n'est pas absolue. Nous acceptons qu'en mécanique classique les états pré-existent de la mesure. Pourtant ce cas n'est pas unique. Si par exemple nous jetons un dé absolument symétrique, il réalisera 6 potentialités avec une probabilité égale ($1/6$). Ainsi le concept de potentialité (ou de «propensity», selon Popper), caractéristique de la mécanique *quantique*, est valable aussi dans certains cas classiques. Pourtant, jeter un dé est un acte mécanique, et la réalisation de telles potentialités n'a pas le même sens physique que la réalisation des états propres en mécanique quantique. La réalité quantique est différente de celle propre aux idéalizations classiques. Pourtant la parenté entre les deux situations, même au niveau abstrait, est une mise en garde contre l'absolutisation des différences et des contradictions.

Plusieurs des présupposés du calcul des probabilités classiques ne sont pas valables en mécanique quantique. Ainsi, par exemple, on considère qu'il est impossible de définir des probabilités composées pour des couples de variables incompatibles. Or, selon certains auteurs, cette possibilité n'est pas exclue, même en mécanique quantique. Aussi, selon Winger, les lois de la mécanique classique sont formulées sur la base d'une réalité objective, tandis que les lois de la mécanique quantique sont formulées simplement sur la base de connexions entre probabilités²⁴. Pourtant, on peut objecter que les lois quantomécaniques portent aussi sur une réalité objective, et même plus profonde que celle de la mécanique classique et que les probabilités quantiques expriment, elles aussi, des processus objectifs —les *potentialités* objectives des ensembles statistiques. L'argument, enfin, que les probabilités classiques sont de nature *subjective* —tandis que les probabilités quantiques sont *objectives*— n'est pas valable: les deux types de probabilité expriment le comportement objectif d'ensembles de systèmes physiques.

La différence essentielle entre les probabilités classiques et quantiques tient au fait que les états classiques *existent avant la mesure*, tandis que les états quantiques sont *créés pendant la mesure*. Pourtant même cette différence n'est pas absolue.

Nous rappelons qu'en mécanique quantique nous pouvons distinguer les trois cas suivants:

1. Un ensemble pur est transformé en ensemble pur par la mesure. C'est le cas des états purs au sens strict du terme (sharp states). Dans ce cas nous avons deux éventualités:

a. L'état initial était déjà en acte, avant la mesure. Ainsi, l'état n'est pas

24. E. WINGER, *An. J. Phys.*, 31, 6 (1963).

modifié. C'est seulement l'appareil qui réalise un de ses «états»:

$$\Phi_0 \Psi_i \rightarrow \Phi_i \Psi_i, \quad i=1.$$

b. L'état est potentiel et se réalise pendant la mesure:

$$\Phi_0 \Psi \rightarrow \Phi_i \Psi_i, \quad i=1.$$

Dans les deux cas ci-dessus la probabilité (réelle ou potentielle) est égale à 1. Ainsi les systèmes se comportent de façon «classique».

2. L'ensemble initial est un mélange d'états $[\Psi_i]$ avec des probabilités respectives P_i . Le mélange est séparé par la mesure en des sous-ensembles purs. On a dans ce cas:

$$P = \frac{n_i}{N}$$

Les probabilités pré-existent et la mesure ne modifie pas la distribution initiale.

3. Le troisième cas, celui de la superposition, est le cas caractéristique de la mécanique quantique. Dans ce cas un ensemble initial pur se transforme par la mesure en mélange:

$$\Psi = \sum_i C_i \Psi_i \text{ et } \Phi_0 \Psi \rightarrow \sum C_i [\Phi_i \Psi_i] \rightarrow [\Psi_i]$$

$$i = 1, 2, \dots, n \text{ avec } P_c = |c_i|^2$$

C'est la soi-disante réduction du paquet d'ondes, manifestation de l'indéterminisme quantique, selon l'École de Copenhague. Selon cette École, les états propres pré-existent, ils sont «analysés» par l'appareil et cette analyse ou réduction ne respecte pas le principe du déterminisme. Pourtant cette interprétation *non statistique* n'est pas conforme à la vraie nature des processus sous-jacents à ce phénomène.

Dans le cas 3, en effet, nous avons une transformation du système quantique et la réalisation d'une de ses potentialités, donc nous avons une création d'éléments nouveaux de réalité. Les probabilités sont dans ce cas, *la mesure* numérique des potentialités de l'ensemble. La distribution probabiliste, enfin, n'est pas une preuve d'indéterminisme, mais des potentialités multiples des ensembles quantiques.

Pour l'École de Copenhague, la transformation des systèmes quantiques est impossible ou bien *instantanée*. C'est le *saut* quantique qui a fait l'objet de commentaires ironiques de la part de Schrödinger. Le formalisme actuel ne décrit pas les transformations quantiques. Ainsi, selon Schrödinger et d'autres physiciens réalistes, nous avons besoin d'une *mécanique quantique héré-*

ditaire qui serait non seulement capable de décrire des états stationnaires et de calculer des probabilités, mais aussi de décrire des processus évolutifs qui se font dans le temps.

Par conséquent aussi bien les probabilités classiques que quantiques sont *objectives*, dans le sens qu'elles décrivent le comportement objectif d'ensembles de systèmes physiques. Les premières sont, en principe, réductibles à une description déterministe-classique. Mais, contrairement à ce que soutient l'École de Copenhague, une telle réduction n'est pas, en principe, impossible pour les probabilités quantiques. Mais une telle réduction ne signifie pas, ainsi que nous l'avons souligné, retour au déterminisme laplacien. Le concept de *déterminisme statistique quantique*, exprime le fait que les potentialités quantiques sont aussi déterminées. Le nouveau type de déterminisme exprime les multiples potentialités des ensembles quantiques qui se réalisent dans des conditions données et qui se modifient, si les conditions changent.

Ainsi la différence essentielle entre les probabilités classiques et quantiques est l'expression du fait qu'en microphysique se manifeste une réalité nouvelle, multivalente, capable de réaliser des potentialités différentes dans des conditions différentes. Le nouveau réalisme scientifique est capable de saisir et d'exprimer le fait que la matière n'est pas un substat passif mais une réalité dynamique, qui déploie des formes multiples dans l'espace et le temps. Ainsi, en mécanique quantique le rôle de l'appareil devient essentiel: l'appareil n'est pas un instrument passif qui enregistre tout simplement des données. Son rôle est actif: c'est à travers l'interaction du système avec l'appareil que le système change en réalisant ses potentialités²⁵.

Le caractère probabiliste de la mécanique quantique constitua l'un des points de départ de l'argumentation positiviste. Les inégalités de Heisenberg en constituent l'autre. Entre les deux, d'ailleurs, il y a une parenté profonde, cachée et souvent mal comprise.

Ici n'est pas la place pour une analyse de cette question. On peut pourtant signaler qu'à partir de ces inégalités, l'École orthodoxe a tiré deux conclusions d'ordre ontologique (et non seulement gnoséologique): 1) le déterminisme n'est pas valable en microphysique et 2) si, une particule est quelque part, alors il n'a pas d'impulsion donnée. Si, au contraire, il possède une impulsion, alors il est nulle part! Pourtant il est possible de donner une interprétation statistique cohérente de ces inégalités, interprétation qui n'exclut pas l'existence simultanée des grandeurs conjuguées, et qui n'est pas en con-

25. Cf. E. BITSAKIS, *In the Concept of Probability*, E. Bitsakis, C. Nicolaidis (eds), Dordrecht, Kluwer Acad. Publ.

tradiction avec l'existence d'un nouveau type de détermination en microphysique.

L'interprétation orthodoxe des inégalités de Heisenberg est contradictoire. Selon le point de vue opérationnaliste, les deux variables conjuguées existent et sont perturbées par la mesure. Selon le point de vue ontique, au contraire, les dispersions décrites par les inégalités de Heisenberg sont inhérentes à la particule, qui est identifiée à une entité fictive: le paquet d'ondes²⁶.

Un réalisme cohérent ne peut pas éviter les questions précédentes. Cette question d'ailleurs est liée directement à la section suivante de ce texte.

7. Les corpuscules et les ondes.

Nous avons essayé de dégager le caractère dynamique des entités minimes qui constituent la matière. Or, que sont les microparticules? Ce sont des corpuscules? Ce sont des ondes? Ou bien y a-t-il à ce niveau une dialectique objective? La dualité onde-corpuscule est-elle un fait physique?

On sait que le débat sur cette question a le même âge que la physique. Il commença avec Galilée, Huygens et Newton, et continua tout au long de l'histoire de la physique. Aussi il a été renouvelé ces dernières années, grâce à des nouvelles données théoriques et expérimentales.

Au début, c'était Démocrite et ses atomes. Puis, Épicure et Lucrèce. Après une longue eclipse, c'étaient Galilée, Gassendi, Boyle et puis Newton: «Il me paraît probable qu'à l'origine, Dieu a façonné la matière en particules solides, compactes, dures, impénétrables, capables de mouvement et ayant des grandeurs, des formes, des propriétés d'une nature et dans une proportion à l'espace telles qu'elles fussent le mieux conduites à la fin pour laquelle il les a formées. Et ces particules primitives, étant des solides, sont incomparablement plus dures que n'importe quel corps poreux constitué par elles, elles sont même tellement dures, qu'elles ne s'usent jamais ni ne cassent en morceaux, puisqu'il n'existe pas de force ordinaire capable de diviser ce que Dieu lui-même a fait un au premier instant de la création²⁷».

Physique, métaphysique et téléologie ont consacré la conception corpusculaire de la matière. Toute chose matérielle est composée, selon Newton, de ces particules dures et solides.

Démocrite n'aurait pas aimé tellement l'imixion des Dieux dans cette affaire; il aurait été pourtant très content de voir son hypothèse reprise par le

26. Cf. E. BITSAKIS, *Physique et Matérialisme*.

27. I. NEWTON, *Optics*, New York, Dover Publ., 1952, p. 400.



fondateur de la physique. Ainsi tout allait bien pour la matière, dans le meilleur des mondes possibles. Mais la lumière?

Newton ne doutait pas: pour lui, il était évident que la lumière aussi était constituée de corpuscules. Pourtant, quatorze ans avant la publication de son *Optique* (1704), Chr. Huygens avait publié un *Traité sur la Lumière* (1690) où le grand physicien et astronome hollandais exprimait une conception tout à fait différente: «Si, en plus, la lumière nécessite un temps pour son passage ... cela implique que ce mouvement, qui s'imprime sur la matière intermédiaire, est successive; par conséquent, la lumière s'étend, comme les ondes sonores, en surfaces sphériques et en ondes: je les appelle ondes, à cause de leur similitude avec celles que l'on voit d'être formées dans l'eau quand on y jette une pierre²⁸».

Or, Newton était sûr de la vérité de sa théorie. «Pour moi, au moins, il paraît inexplicable que la lumière ne soit que pression ou mouvement qui se propage à travers l'éther». Le développement, surtout de l'optique géométrique à cette époque, était la cause principale de la victoire de Newton. On sait pourtant que cette victoire était provisoire: Le développement des techniques de l'interférence et de la diffraction a conduit, au début du 19^e siècle, à la théorie ondulatoire de la lumière. La théorie corpusculaire de Newton apparaissait maintenant comme une relique métaphysique d'une époque lointaine. Or, comment se propage la lumière? L'éther, ce moyen hypothétique de propagation des ondes de lumière, était devenu l'enfant terrible de la physique. On sait pourtant que la théorie de Maxwell, vers le milieu du siècle, dota les ondes électromagnétiques d'une existence indépendante de leur source et d'une vitesse finie de propagation. La révolution n'était comprise ni par Maxwell lui même, ni par ses contemporains, et l'on continua à chercher la preuve expérimentale de l'existence de l'éther, de ce milieu immobile, identifié à l'espace absolu de Newton. L'expérience des Michelson-Morly ruina d'un coup les espoirs de déceler l'existence de l'éther. Einstein formula après quelques années la théorie de la relativité en écartant de la physique le concept de l'éther mécanique.

Comment donc se propagent les ondes lumineuses? Il serait tout à fait légitime de postuler que les ondes électromagnétiques n'ont pas besoin d'un «milieu» pour leur propagation. Mais y a-t-il des ondes électromagnétiques? Planck avait déjà ébranlé en 1900 la conception continuiste sur l'émission du rayonnement électromagnétique et Einstein expliqua en 1905 l'effet photoé-

28. Chr. HUYGENS, *Treatise on Light*, New York, Dover Publ., 1962, p. 4.

lectrique en postulant l'existence de *quanta* de lumière, dont l'énergie était proportionnelle à leur fréquence ($E=h\nu$).

Était-ce donc le grand retour aux idées du vieux Newton? Pas du tout! Car, dans les formules de Planck et d'Einstein l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire sont intrinséquement associés! Sommes-nous donc en présence d'une «dialectique objective» entre les corpuscules et les ondes?

C'était exactement la réponse de de Broglie (1924) à l'enigme de la dualité. Pourtant la dualité onde-corpuscule, selon la théorie de de Broglie, ne concerne pas seulement la lumière, mais l'ensemble des particules matérielles. C'était encore un signe d'unité entre la «matière» et le champ, ou entre la «matière» et l'énergie, après la première preuve donnée par Einstein en 1905²⁹.

A partir de sa *Thèse* de 1924, de Broglie continua à développer et à enrichir cette «dialectique». Ainsi, il essaya de représenter la particule comme une sorte d'accident local, une *singularité* au sein d'un phénomène ondulatoire étendu. La particule n'était pas une entité extérieure au champ physique; elle était incorporée dans la structure du champ et constituait une sorte d'inhomogénéité locale³⁰.

Beaucoup de phénomènes ont été expliqués sur la base de la dualité onde-corpuscule. Pourtant d'autres phénomènes plaidoyaient en faveur d'une conception corpusculaire de la matière et les adhérents des corpuscules n'ont jamais déposé les armes. Ainsi, A. Landé continua la bataille pour les corpuscules pendant de longues années. Selon lui, après l'interprétation statistique-corpusculaire de Max Born, la dualité est devenue un anachronisme, qui donne une image déformée de la matière. Les phénomènes ondulatoires ne sont que des apparences, des épiphénomènes, dus aux distributions symétriques de taches individuelles. L'interprétation de Born, selon Landé, nous dit en termes simples et sans équivoque que la matière consiste de particules discrètes, et que les apparences ondulatoires n'ont pas d'existence réelle³¹.

Or, plusieurs phénomènes fondamentaux seraient difficilement expliquables par une microphysique corpusculaire. Rappelons seulement la fameuse expérience des deux fentes. Les phénomènes d'interférence apparaissaient non seulement avec les photons, mais en accord avec la théorie unitaire

29. Pour les relations entre la matière et l'énergie, cf. E. BITSAKIS, *Scientia*, 111, 401 (1976); IDEM, *Found of Physics*, N°1, 1991.

30. Cf. L. DE BROGLIE, *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*, Paris, Gauthier-Villars, 1963. IDEM, *The current interpretation of wave mechanics*, Amsterdam, Elsevier, 1964.

31. A. LANDÉ, *From Dualism to Unity in Quantum Physics*; IDEM, *New Foundations of Quantum Mechanics*.



de de Broglie, avec des électrons, des neutrons et en général avec les particules massives. Duane et plus tard Landé ont proposé des théories corpusculaires pour expliquer ces phénomènes, sur la base de règles de symétrie et de quantification. De Broglie, aussi, avait des intuitions qui allaient dans ce sens: «Je rejoignais ainsi une idée des protagonistes de l'ancienne théorie corpusculaire de la lumière qui disaient que, dans la diffraction de la lumière par le bord de l'écran, le corpuscule de lumière subite une action de ce bord d'écran et est par suite dévié de sa route rectiligne³²».

Voilà une idée tout à fait plausible. Or, comment calculer ces actions et reproduire l'image de la diffraction et de l'interférence? Juste avant la guerre le jeune physicien français, J. Solomon (fussillé plus tard par les nazis) avait essayé une explication de l'expérience des deux fentes en considérant la particule comme une totalité formée d'un corpuscule et d'un phénomène ondulatoire étendu. Mais les moyens de l'expérimentation, il y a un demi siècle, ou même un quatre de siècle, ne permettaient pas la solution du problème³³.

Or, aujourd'hui, on fait des expériences avec des neutrons de très basse énergie, des neutrons «froids» qui traversent l'interféromètre l'un après l'autre. Nous avons déjà signalé que de telles expériences indiquent l'existence de phénomènes d'auto-interférence. Pour un nombre de physiciens, ce phénomène est une preuve de non-localité et de non-séparabilité. Or, une explication réaliste et locale est possible sur la base des idées de de Broglie et d'Einstein, reprises et développées aujourd'hui par F. Selleri et d'autres physiciens.

Il y a trente ans, le physicien hongrois Janossy et ses collaborateurs, avaient fait l'expérience suivante: Ils envoyaient des photons sur miroir semi-transparent. Chaque photon se scindait ainsi en deux parties, au moment de l'interaction avec le miroir. Par superposition des deux faisceaux de lumière qui ont suivi les deux trajets différents, on obtenait une figure d'interférence. Aujourd'hui en utilisant l'interféromètre à neutrons, on peut faire des expériences pareilles avec des neutrons. On utilise pour cela des faisceaux de neutrons monochromatiques, d'intensité très faible, de façon à ce que ces particules entrent dans l'interféromètre l'un après l'autre. La conclusion est nette: le neutron interfère avec lui-même. Or, à l'aide de compteurs on constate que le neutron, le *corpuscule*, passe par l'une *ou* par l'autre des voies possibles; jamais par les deux. Comment donc expliquer l'auto-interférence?

Selon les idées d'Einstein et de de Broglie, les particules quantiques sont constituées d'une très petite région où la totalité de la masse est localisée,

32. L. DE BROGLIE, *La Physique quantique restera-t-elle indéterministe?*

33. J. SOLOMON, *Protons, neutrons, neutrinos*, Paris, Gauthier-Villars, 1939.

entourée d'un phénomène ondulatoire étendu. Le corpuscule est donc accompagné d'ondes vides d'énergie et de quantité de mouvement: des *ondes-fantômes* d'Einstein. A cause de l'interaction avec l'interféromètre, l'onde-corpuscule initiale est scindée en deux parties: l'une transmise, l'autre réfléchie. Or, le corpuscule se trouve dans l'une des deux parties, l'autre étant l'onde vide. Les deux parties se superposent par la suite et interfèrent. La théorie est en accord avec l'expérience³⁴.

La dualité onde-corpuscule donnera, probablement, une explication locale et déterministe à la question de la nature des particules quantiques.

8. Dépasser le positivisme et le réalisme naïf.

Nous partons toujours du principe réaliste. Nous acceptons, suivant Einstein, qu'«*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*³⁵». Réel est donc ce qui existe objectivement, indépendamment du sujet et du scientifique en particulier. (Il va de soi que chaque sujet est un «objet» pour un autre sujet, et *vice-versa*). Mais qu'est-ce que c'est le réel? Et comment est le réel? Réel est tout d'abord ce qui apparaît dans l'intuition. Mais ce qui apparaît n'est pas le tout, et il n'est pas tel qu'il apparaît: la nature aime se cacher, professait Héraclite, et si les choses étaient telles qu'elles apparaissent, la science serait, selon Marx, inutile. Il y a une contradiction entre ce qui est et ce qui apparaît, ou bien entre l'essence et le phénomène. Pourtant la contradiction est dialectique: la vérité des sens est souvent trompeuse (les sens, par exemple, nous apprennent que la terre est le centre de l'Univers) et pourtant les données sensorielles sont la matière première de tout savoir. Si les sens nous trompent souvent, ce n'est pas une raison pour nous réfugier à un certain Logos intemporel. Car le phénomène est le recouvrement en même temps que la manifestation de l'essence: de structures et de relations cachées pour l'intuition. Il y a donc un réel «caché» qu'il faut découvrir, et l'on pourrait définir la physique comme la recherche de ce qui est caché derrière les phénomènes.

Le réalisme moderne a dépassé le réalisme naïf, tout en conservant sa thèse fondamentale sur l'*objectivité* de l'être. Il y a pourtant des physiciens

34. Pour toutes ces questions voir F. SELLERI, *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Dordrecht, Kluwer Acad. Publ. 1990.

35. A. EINSTEIN, *Louis Broglie, physicien et penseur*.

qui identifient le réalisme scientifique au réalisme intuitif ou naïf, et qui sont conduits par là à une attitude sceptique. Ainsi B. d'Espagnat a introduit un nombre de concepts qui dépassent le cadre du réalisme naïf et qui peuvent être insérés dans une conception dialectique de l'être, tels que le *réel voilé*, le *réel lointain*, le *réalisme proche* et le *réalisme lointain*³⁶. Ces concepts correspondent à des états différents d'appropriation théorique du réel. Et s'il y a un réel donné, il y a en même temps le réel voilé, donc d'autres aspects du même réel qu'il faudrait découvrir. Et s'il y a un réalisme proche, qui correspond au réalisme intuitif, il peut avoir aussi le réalisme lointain, qui va au-delà de l'apparence pour saisir des relations et des structures plus profondes et cachées, donc inaccessibles à l'intuition directe.

Il y a dans la pensée de d'Espagnat l'amorce d'une dialectique entre ce qui est et ce qui apparaît. Lui pourtant considère le réel voilé comme incompatible avec le réalisme physique: «Si je veux persister dans mon attitude réaliste», écrit-il, «je me vois ainsi incité à opter pour un réalisme non-physique que l'on peut appeler "*théorie du réel voilé*"». Selon d'Espagnat, le réel voilé n'est pas explorable par le moyen de la physique, ou bien par le seul moyen de la physique³⁷.

Mais les atomes étaient un réel voilé pour les physiciens du XIX^e siècle, de même que la structure des hadrons pour les physiciens d'aujourd'hui. Or, ce qui était lointain et voilé est devenu proche, accessible et connu. Ainsi le réalisme physique ne se définit pas par rapport à des formes ou des structures spécifiques du réel, et aussi il n'identifie pas le réel aux formes accessibles aux sens. Le réalisme physique, en tant que principe épistémologique, pose l'existence d'une réalité en soi, objet des sciences. Ainsi il englobe aussi bien le réalisme proche (ou intuitif) que le réalisme lointain (ou scientifique). Le réel, ainsi que le réalisme, sont des catégories historiques.

L'être de la physique moderne n'est pas le corps massif de l'intuition, ou bien le corpuscule compact newtonien. Les particules et les champs sont des formes d'une seule réalité —de la matière— formes objectives, autonomes, en soi, qui se transforment les unes aux autres. Les champs et les particules sont des êtres, c'est-à-dire des formes de matière, caractérisées par un certain nombre de grandeurs et de *rappports*. Car l'être d'un réalisme non-naïf (ou dialectique) est une chose, en même temps qu'un ensemble de rapports. L'être n'a pas de sens en dehors de ses rapports qui sont constitutifs de ses structures, de ses grandeurs intrinsèques et de ses manifestations. Ainsi le phéno-

36. B. DE ESPAGNAT, *A la recherche du réel*.

37. *Ibid*, pp. 92 et 158.

mène, produit de structures et de rapports internes, souvent inconnus, ne se trouve pas au-delà de la «chose en soi». Elle est sa manifestation et la voie d'accès à ce qui est essentiel.

Kant a isolé le phénomène de la «chose en soi». Le positivisme ne considère que le phénomène. Et si le réalisme naïf identifia l'essence au phénomène, ce n'est pas une raison pour rejeter le réalisme scientifique, forme historiquement adéquate de l'épistémologie moderne, qui dépasse aussi bien la négation positiviste que la naïveté du réalisme intuitif.

Eftichios BITSAKIS
(Jannina)

Ο ΝΕΟΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΡΕΑΛΙΣΜΟΣ

Περίληψη

Ἡ κλασικὴ φυσικὴ, ὡς γνωστόν, ἦταν ρεαλιστικὴ καὶ αἰτιοκρατικὴ. Τὸ ἴδιο ἰσχύει καὶ μὲ τις κλασικὲς θεωρίες τοῦ πεδίου (ἠλεκτρομαγνητισμὸ καὶ θεωρία τῆς βαρύτητος τοῦ Einstein). Ὁ πιθανοκρατικὸς χαρακτήρας τῆς μικροφυσικῆς, ἀντίθετα, καὶ οἱ πολλαπλὲς δυναμικότητες τῶν μικροσκοπικῶν ὄντοτήτων, ἐρμηνεύθηκαν ἀπὸ τὴν ὀρθόδοξη σχολὴ ὡς ἡ κατάρρευση τοῦ ρεαλισμοῦ καὶ τῆς αἰτιοκρατίας. Ὁ ἐπιστημονικὸς ρεαλισμὸς, εὐρύτερα, ἀμφισβητεῖται σήμερα, τόσο στὴν περιοχὴ τῆς φυσικῆς καὶ τῶν μαθηματικῶν, ὅσο καὶ στὸ καθαυτὸ φιλοσοφικὸ ἐπίπεδο.

Στὸ παρὸν κείμενο ἐπιχειρεῖται ἡ θεμελίωση ἑνὸς σύγχρονου ἐπιστημονικοῦ ρεαλισμοῦ, ὁ ὁποῖος θὰ ὑπερβαίνει τις μονομέρειες, τόσο τοῦ ἐποπτικοῦ ρεαλισμοῦ ὅσο καὶ τοῦ θετικισμοῦ. Στὸ πρῶτο μέρος ἀναλύονται οἱ ἀνεπάρκειες τοῦ παραδοσιακοῦ ἐποπτικοῦ ρεαλισμοῦ καὶ τῆς παθητικῆς ἀντίληψης τῆς ἀντικειμενικότητας. Εἰσάγεται ἐν συνεχείᾳ ἡ ἔννοια τῆς δυναμικῆς ἀντικειμενικότητας, ἡ ὁποία συγκεκριμενοποιεῖται σὲ μιὰ ρεαλιστικὴ θεωρία τῆς κβαντικῆς μέτρησης, ὅπου ἀναδεικνύεται ὁ ἐνεργητικὸς ρόλος τοῦ μετρητικοῦ ὄργανου καὶ τὸ πολυδύναμο τῶν κβαντικῶν συστημάτων. Στὸ πλαίσιο μιᾶς συγκεκριμένης διαλεκτικῆς μεταξὺ τοῦ δυνάμει καὶ τοῦ ἐνεργείᾳ ἐρμηνεύεται ρεαλιστικὰ ἡ ἀρχὴ τῆς ἐπαλληλίας ὡς ἡ ποσοτικὴ ἔκφραση τῶν δυναμικότητων τοῦ κβαντικοῦ συνόλου. Ἀντίστοιχα ὁ χῶρος Hilbert ὀρίζεται ὡς χῶρος δυναμικότητων καὶ ὄχι ὡς χῶρος ἐνεργείᾳ κβαντικῶν καταστάσεων. Στὸ ἴδιο ἐννοιολογικὸ πλαίσιο ἀναδεικνύε-

ται ή έπιστημική διαφορά μεταξύ κλασικών και κβαντικών πιθανοτήτων και δίδεται μια συνεκτική-στατιστική έρμηνεία των άνισοτήτων του Heisenberg. Τέλος έπιχειρείται μια ρεαλιστική αντίληψη της δυαδικότητας σωματικού κύματος. Με βάση τη δυναμική αντίληψη της μικροφυσικής πραγματικότητας και με τη βοήθεια των παραδόξων της κβαντικής μηχανικής (παραδόξων Einstein-Podolsky-Rosen, E. Schrödinger και L. de Broglie) άναδεικνύεται τὸ άδιέξοδο της ύποκειμενικής έρμηνείας των Bohr, von Neumann, κ.λπ. Έη άφετηρία των δυσκολιών και του άδιεξόδου της όρθόδοξης σχολής βρίσκεται στο πραγματικό γεγονός ότι ό σημερινός γραμμικός φορμαλισμός της κβαντικής μηχανικής άδυνατεί να περιγράψει τὸν μη γραμμικό μετασχηματισμό των μικροσωματίων. Έη είσαγωγή των κατηγοριών του *δυνάμει* και του *ένεργεία* φωτίζει τὸ πρόβλημα με νέο φῶς και ταυτόχρονα άποτελεί τὸν πυρήνα μιας νέας, ρεαλιστικής και δυναμικής αντίληψης για τη μικροφυσική πραγματικότητα.

Ευτύχιος ΜΠΙΤΣΑΚΗΣ
(Γιάννινα)