

Eftichios BITSAKIS

A LA RECHERCHE DE LA REALITE MICROPHYSIQUE

Département de Philosophie, Université de Jannina
Département de Physique, Université d'Athènes

Entre le 25 Septembre et le 3 Octobre a été réalisé à l'Université d'Urbino (Italie) un Congrès International de Physique sous le titre: «Micro-physical Reality and Quantum Formalism». C'était un Congrès avec 195 participants, 62 rapports, 8 tables rondes et 4 conférences d'intérêt général. Le Congrès a été réalisé à l'occasion des 50 ans depuis la formulation du paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) concernant la complétude de la description quantomécanique. Il était donc consacré à ce problème fondamental de la physique, qui porte, en même temps, sur des questions philosophiques cruciales, telles que la nature du monde physique, l'ordre causal de la nature et la possibilité d'une connaissance objective de la réalité.

La mécanique quantique a été formulée il y a 60 ans (entre 1923 et 1927). Etant la science de l'«infiniment» petit, elle a bouleversé, dès le début, l'image classique du monde. Ainsi, son caractère probabiliste a provoqué la naissance d'un courant épistémologique qui contesta la validité de la causalité et du déterminisme au niveau microscopique. Aussi l'École dominante (École de Copenhague) a formulé une conception subjectiviste, niant l'objectivité du monde microscopique. Les extrémistes de cette école ont développé des conceptions néo-platoniciennes, à partir des particularités de la microphysique. Enfin, les positivistes, tendance dominante parmi les physiciens, considérant la mécanique quantique comme un simple algorithme, un simple appareil logique, ont contesté la possibilité de la physique d'approfondir davantage dans la connaissance des structures de la matière. (Le concept même de *matière* est périmé, dénué de sens pour ce courant).

Une grande bataille se développe depuis 1927 concernant l'épistémologie de la mécanique quantique. Les deux courants opposés sont le courant réaliste-matérialiste et le courant positiviste. Ainsi, avant de par-

ler du Congrès d'Urbino, nous croyons utile de donner une esquisse historique de ce débat.

1. Du réalisme mécaniste à l'antiréalisme

Le *réalisme* est un principe épistémologique. Il affirme l'existence d'une réalité objective, indépendante de l'homme (et du chercheur en particulier) et qui possède des propriétés intrinsèques. Ainsi le réalisme ne s'identifie pas au matérialisme qui, en plus de l'objectivité de la matière pose le principe de son asséité (pour le matérialisme la matière «en soi»). Le matérialisme est un «conception du monde», tandis que le réalisme est un principe épistémologique.

Le réalisme épistémologique constitua, comme on le sait, le fondement des sciences de la nature, depuis Aristote, Galilée et Newton, et jusqu'à Einstein et ses théories du monde macroscopique.

Le réalisme épistémologique classique était, en principe, intuitif: Il acceptait l'existence de l'espace et du temps en tant que formes objectives de la réalité, et de la matière, constituée d'atomes indestructibles.

Or, cette forme de réalisme a été démontrée inadéquate pour la physique moderne. Ainsi, le grand réaliste qu'était Einstein, démontra le caractère fictif de l'espace et du temps absolus, fondement de la physique newtonienne. (Pourtant, cette relativité est l'autre aspect de l'unité de l'espace et du temps, dans un continuum à quatre dimensions). Avec la relativité générale (1917), Einstein démontra l'unité de l'espace, du temps, de la matière et du mouvement. Ainsi la forme de l'univers est déterminée par la distribution de la matière. Pourtant, malgré le dépassement de la conception intuitive-mécaniste, les théories d'Einstein n'ont pas invalidé le principe réaliste. Tout au contraire, elles ont concrétisé la nature des interactions physiques et, par là, elles ont renforcé la conviction concernant le caractère causal et déterministe des phénomènes. La nature n'était pas, dorénavant, une énorme machine, ainsi que le voulait le déterminisme laplacien. Elle apparaissait comme une réalité objective, gouvernée par des lois, une *totalité* différenciée, contradictoire et en évolution. Une autre conséquence des théories relativistes était la démonstration du caractère *local* des phénomènes. La vitesse finie des interactions implique la *localité* des processus physiques et la *séparabilité* réelle des systèmes séparés par un intervalle du genre espace.

La microphysique moderne (et la mécanique quantique, en particulier, qui constitue le cadre général des théories microphysiques) a bouleversé l'image réaliste et déterministe de la physique pré-quantique. Dé-

jà la découverte du radium, de ce grand révolutionnaire, selon Poincaré, avait mis en doute la validité du principe de la conservation de l'énergie et celui de l'indestructibilité de la matière. La formulation, par la suite, de la mécanique quantique avait démontré que les phénomènes microscopiques sont régis par des lois probabilistes. Ainsi le déterminisme classique (mécaniste ou dynamique) a été démontré inadéquate pour le monde à l'échelle microscopique.

Le caractère probabiliste de la mécanique quantique déclencha aux années trente une vague d'indéterminisme. Selon l'Ecole de Copenhague (Bohr, von Neumann, Heisenberg, Dirac, Jordan, Pauli etc.) la nature ne respecte pas le principe de la causalité. L'indéterminisme, selon cette Ecole, est la caractéristique des structures les plus profondes de la matière. Encore pire: les particules microscopiques disposent de libre arbitre; elles choisissent «librement» un des états possibles, sans obéir à aucune détermination extérieure. Le mysticisme, dont nous parlerons à propos du Congrès d'Urbino, a été à cette époque la conclusion inévitable de l'interprétation subjectiviste de la mécanique quantique.

La découverte des lois probabilistes dans le domaine microscopique a alimenté la vague de l'indéterminisme dont nous avons parlé, car les critères positivistes empêchaient les physiciens de voir dans les lois quantomécaniques *une nouvelle forme de détermination*.

En réalité, la microphysique avait démontré les limites historiques de la conception mécaniste. L'atome démocritéen fut démontré une abstraction, liée historiquement aux techniques et à l'idéologie du 19^e siècle. Les atomes ne sont, en réalité, ni simples, ni compactes, ni éternels. Ils ont une structure et sont constitués par des particules dites «élémentaires». Pourtant, le dépassement de l'image mécaniste a été de nouveau interprété par pensée positiviste-mécaniste comme une preuve de la «disparition» de la matière. Ainsi, l'indéterminisme et l'antiréalisme étaient devenus les caractéristiques fondamentales de l'école positiviste.

Les progrès ultérieurs de la microphysique ont renforcé le courant antiréaliste. Selon ce courant, les particules quantiques ne sont que des ondes de probabilité, des ondes de connaissance, des formules mathématiques. Elles forment non pas un monde matériel-objectif, mais un monde de formes pures (Heisenberg). Le néoplatonisme et le néopythagorisme ont trouvé un sol fertile dans les théories mathématisées de la physique des particules dites élémentaires.

2. *Le débat Einstein-Bohr.*

Pourtant, le courant réaliste-déterministe, quoique minoritaire, n'a pas disparu à la période entre les deux guerres. Plusieurs des fondateurs de la physique moderne-Einstein, de Broglie, Schrödinger, Planck, Langevin et d'autres - sont restés fidèles au réalisme et au déterminisme. Dans les textes de cette époque on trouve des réfutations, souvent violentes, des conceptions de l'Ecole de Copenhague. Einstein, en particulier, déclarait qu'il ne rougissait pas «de mettre le concept d'état réel d'un système au centre même de ses méditations». Aussi, en ce qui concerne le déterminisme, il considérait la mécanique quantique comme une théorie *non complète* et il affirmait que «Dieu ne joue pas aux dés». Schrödinger, de son côté, considérait l'interprétation de la mécanique quantique par l'école de Copenhague comme une «interprétation transcendantale, presque psychique, du phénomène ondulatoire ... qui fut très vite saluée par la majorité des maîtres théoriciens comme la seule conforme à l'expérience et qui est devenue désormais le dogme orthodoxe». En ce qui concerne les transitions quantiques, c'est-à-dire le passage des systèmes d'un état dans un autre, l'Ecole positiviste les considérait en tant que sauts instantanés, sans «épaisseur temporelle» et en plus, arbitraires: *non déterminées par des causes*. Cette conception a été caractérisée par Schrödinger comme une «mystérieuse théorie du caprice et de la secousse», dogme qui «implique l'action à distance», prétention gratuite que la nature joue aux dés. Einstein, Planck, Langevin et d'autres ont formulé des pareilles critiques concernant les conceptions idéalistes de l'école dominante.

Or, un problème physique ne peut pas être résolu au niveau du discours épistémologique. Ainsi les physiciens de l'Ecole réaliste ont essayé de réfuter le dogme copenhagien au niveau de la théorie. En 1927, Louis de Broglie formula une théorie déterministe du mouvement des particules quantiques, la théorie de la «double solution». Selon cette théorie, les particules quantiques sont des entités matérielles, objectives, et leur mouvement est déterministe. De Broglie présenta sa théorie au 7ème Congrès de Solvay (1927). Sauf Einstein, personne ne soutenait cette théorie, qui tomba vite dans l'oubli. Mais huit ans plus tard (1935) Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) formulèrent une expérience de pensée, selon laquelle la description des phénomènes par la mécanique quantique n'est pas une description complète de la réalité.

Cette expérience-qui constitua le thème central du Congrès d'Urbino - considère deux particules nées de façon corrélatée et qui se séparent

par la suite, de façon que leurs «éléments de réalité» ne sont pas modifiés. En faisant par la suite la mesure d'un élément de réalité sur l'une des particules, nous pouvons prévoir avec certitude la valeur correspondante de l'autre particule, sans effectuer de mesure. La mécanique quantique prévoit cette corrélation, mais elle n'explique pas son mécanisme. Si l'on faisait par la suite une autre mesure sur la première particule, l'élément de réalité que l'on peut prévoir sur l'autre change. Selon la mécanique quantique, ce changement de ce qu'on peut prévoir correspond à un changement d'état de la deuxième particule - qui pourtant s'est trop éloignée pour qu'on puisse l'affecter en agissant sur la première. Einstein et ses collaborateurs déduisent de cette apparente contradiction que la mécanique quantique n'est pas complète.

Aussitôt Niels Bohr, la figure dominante de l'Ecole de Copenhague, essaya de réfuter l'argument d'EPR. Selon lui, les deux particules continuent, même après leur séparation spatiale, à constituer un seul système unique et non séparable. Pourtant, cette *non-séparabilité*, postulée par Bohr, présuppose l'existence d'interactions inconnues et qui, à cause de leur vitesse apparemment infinie, seraient en contradiction avec la théorie de la relativité. (Selon cette dernière il y a une vitesse-limite pour les interactions physiques, celle de la lumière).

Bohr n'a jamais pris une position claire en ce qui concerne le mécanisme physique de cette «non-séparabilité» qui, selon Schrödinger, est une forme de «télépathie». Pourtant, dans le climat de l'anti-réalisme et de l'indéterminisme dominants, la grande majorité des physiciens a accepté le point de vue de Bohr et plus généralement l'interprétation positiviste. Selon l'impression générale, Einstein a été définitivement battu par Bohr.

3. Les «ruses» de l'histoire

«Histoire terminée, histoire interminable»! Dix-sept ans après la «défaite définitive» d'Einstein, David Bohm formula une théorie réaliste et déterministe du mouvement des microparticules, qui avait beaucoup de parenté avec la théorie de De Broglie (que Bohm ignorait à cette époque). Dans cette théorie, le mouvement déterministe est assuré par l'introduction de variables supplémentaires dans l'équation du mouvement de la particule (l'équation de Schrödinger). Il s'agissait des fameuses *variables cachées*.

Ainsi Bohm démontra, contre le fameux théorème d'impossibilité de von Neumann, que de théories déterministes (à variables cachées)

sont *possibles*. Bohm avait réussi à réaliser l' «impossible». Pourtant les opposants n'ont pas déposé les armes. Par des démonstrations, surtout au niveau logique et mathématique, ils ont continué à donner *des preuves d'impossibilité* contre quelque chose qui *existait déjà*. Un de leurs arguments, enfin, donnait l'impression d'être dominé par un esprit pragmatique: les variables cachées, même si elles existent, *ne se manifestent pas*.

Il est vrai, en effet, que la théorie de Bohm reproduit les prévisions de la mécanique quantique. Ainsi il était impossible de tester l'hypothèse des variables cachées au niveau de l'expérience. Or, en 1964, J.S. Bell formula un théorème selon lequel s'il y a des variables cachées locales, c'est-à-dire si une description locale et déterministe des phénomènes microscopiques, dans l'esprit d'Einstein, était possible, alors, dans certains cas spécifiques les prévisions de la mécanique quantique seraient en contradiction avec l'expérience. Ainsi l'hypothèse des variables cachées locales pourrait être *testée* - enfin! - expérimentalement.

La situation a été débloquée! Les expérimentateurs se sont mis au travail, pour confirmer ou infirmer les prévisions des inégalités de Bell. Plusieurs expériences ont été réalisées depuis. Or, la totalité presque confirma les prévisions de la mécanique quantique contre les inégalités de Bell. Ainsi, la *violation* expérimentale presque certaine de ces fameuses inégalités provoqua une nouvelle crise en microphysique. Le Congrès actuel d'Urbino a été consacré aux questions soulevées par cette violation presque certaine, et plus généralement aux questions du déterminisme, du caractère local ou non des corrélations EPR et de la nature de la réalité microphysique. Ainsi, la crise actuelle concerne non seulement les fondements de la physique, mais la question de la nature même du monde physique. Quelles ont été donc les positions des physiciens devant la physique. Quelles ont été donc les positions des physiciens devant la situation actuelle?

4. Le courant néo-mystique

La *désintégration* de l'Ecole de Copenhague est un fait. La renaissance du courant réaliste et déterministe, qui se réclame des idées d'Einstein, est un autre fait. Pourtant le courant réaliste se trouve de nouveau dans une situation difficile.

Un certain nombre de physiciens considère, en effet, que les corrélations des particules EPR sont dues à des interactions qui se propagent à vitesse superlumineuse ou bien infinie. Ces interactions assurent la *non-*

séparabilité postulée par Bohr. Pourtant une partie de ceux qui postulent la non-séparabilité acceptent cette notion dans un esprit réaliste (Bohm, Vigier, Hiley et autres) et pas du tout dans l'esprit positiviste et idéaliste de l'École de Copenhague.

Un autre courant accepte pourtant la non-séparabilité dans un esprit antiréaliste et dans certains cas *mystique*. Selon ces physiciens, l'ordre causal de la nature n'est qu'une *illusion*, car nous pouvons renverser cet ordre. Nous pouvons «télégraphier vers le passé» et influencer le passé à partir du présent. Pour les extrémistes, la psychokinèse et la parapsychologie sont possibles. L'anti-physique est un fait et il faut abandonner la localité et le déterminisme. Ainsi Einstein est mort une fois de plus.

Or, pendant les séances d'Urbino, c'est surtout une tendance modérée qui domina. Ainsi on a de temps à autre répété les thèses anciennes de Copenhague: L'espace, le temps et la loi sont des idées fausses (Wheeler). Un phénomène n'est pas un phénomène s'il n'est pas observé (Wheeler, Josephson). Une grandeur non observée n'existe pas. (C'est l'ancien «principe» opérationnaliste de Heisenberg, postulant la non-existence des grandeurs non observées). Le photon n'existe pas entre son émission et son enregistrement, etc. On a aussi soutenu une sorte d'énergétisme, selon laquelle c'est plutôt l'action que les objets qui constituent l'étoffe réelle de l'Univers (Rietdijk). Ainsi la vieille idée de la primauté de l'action par rapport à la matière a été présentée dans un contexte nouveau. La thèse réaliste a été aussi attaquée d'un autre point de vue: Pas d'objectivité au sens strict du terme, mais une intersubjectivité, c'est-à-dire une possibilité des consciences de communiquer les résultats de l'observation. Ainsi la réalité se réduit aux observations de la communauté des observateurs qui sont en communication mutuelle (Stapp).

Les positions précédentes se situent dans le cadre d'un subjectivisme modéré et sont des idées «classiques» de l'École orthodoxe. Pourtant à partir des données quantomécaniques se développèrent ces dernières années un courant ouvertement mystique. Selon ce courant, la transformation des systèmes quantiques (la soi-disant réduction du paquet d'ondes) est un processus dû à une certaine décision. On a parlé à Urbino d'états mystiques de la conscience (Josephson), d'interprétation psychologique de la réalité physique, de rétroaction et de parapsychologie.

Le courant anti-réaliste et mystique avance une idéologie qui est un mélange d'idées positivistes, spiritualistes et au fond mécanistes. Pour ce courant, en effet, la matière s'identifie à l'atome démocritéen, le déterminisme au déterminisme mécaniste, et ainsi de suite. Ainsi le dépas-

sement historique de la conception mécaniste signifie, pour ces physiciens, que la matière a disparu, que le déterminisme n'est qu'une illusion macroscopique, et ainsi de suite. Vieille tradition, malgré la nouveauté des problèmes en microphysique.

5. Le courant réaliste

Pourtant le courant positiviste antiréaliste était minoritaire. Il est vrai que les idées positivistes et les idées de Copenhague sont encore répandues parmi les physiciens, mais ne sont plus nombreux ceux qui se réclament directement des idées de Copenhague. Nous sommes, au contraire, en présence d'un renforcement du courant réaliste. Ce courant était dominant au Congrès d'Urbino.

Selon l'École réaliste, il y a une réalité objective, indépendante des hommes, qui constitue l'objet de la recherche scientifique. Cette réalité possède des «éléments de réalité» et des propriétés intrinsèques, découvertes et décrites par la physique. Ainsi les lois de la physique ont une contre-partie dans la nature: elles décrivent ce qui se passe dans les choses elles-mêmes.

Ainsi, par exemple, le rapport de Karl Popper commençait par la phrase suivante: «Je suis un réaliste dans un sens très simple: Je suppose que je vais bientôt mourir et j'attends que le monde continuera à avancer après ma mort et aussi après la vôtre». Selon Piccioni, la réalité est objective et locale et les objets de l'espace-temps sont relativement indépendants. Aussi Selleri a soutenu la thèse selon laquelle les probabilités prévues par la mécanique quantique correspondent à des phénomènes réels et locaux.

Tous les réalistes sont d'accord sur la définition de la réalité et sur le caractère des lois de la nature. Ainsi le *réalisme* et le déterminisme constituent la base commune de la position réaliste. Pourtant ce courant se *divise* sur la question de la *séparabilité*.

En effet, devant la violation des inégalités de Bell et la confirmation des prévisions de la mécanique quantique, certains des protagonistes du courant réaliste (Bohm, Vigier et autres) affirment qu'il faut abandonner la séparabilité, pour sauver le réalisme et le déterminisme. Niels Bohr, ainsi que nous l'avons noté, ne donna la moindre indication sur la nature des interactions qui assurent la non-séparabilité postulée par lui. Bohm et Vigier, au contraire, postulent que les interactions des particules séparées sont assurées par l'intermédiaire du *potentiel sub-quantique*, une sorte d'*éther de Dirac*, qui, par des mouvements de phase rapides et

aléatoires, assure la non-séparabilité des particules EPR. Sur la base du modèle du potentiel quantique, Hiley et ses collaborateurs ont développé une méthode de calcul des trajectoires des particules quantiques en mouvement déterministe. Selon ces auteurs, le modèle du potentiel quantique peut répondre à toutes les questions de principe de la mécanique quantique.

Le modèle mécaniste de l'univers appartient déjà au musée de l'histoire de la physique. L'univers apparaît de plus en plus comme une totalité différenciée mue par ses contradictions internes. David Bohm, une des personnalités les plus importantes du Congrès d'Urbino, soutient depuis longtemps cette idée de l'«unbroken wholeness» de l'univers. Mais la détermination mutuelle des parties de l'univers est assurée par les interactions physiques, qui se propagent à vitesse finie. Ainsi cette totalité est *locale*. Pour abandonner la localité en faveur d'une non-localité assurée par le potentiel quantique, il faut que ce dernier se manifeste au niveau de l'expérience.

Une autre partie des physiciens réalistes a soutenu, au contraire, que la violation des inégalités de Bell ne démontre en rien la non-séparabilité des particules EPR. Ainsi les deux systèmes séparés dans l'espace sont réellement séparés. Une mesure faite sur l'une des particules n'affecte pas l'état de l'autre, car les corrélations constatées expérimentalement ont été établies pendant l'intervalle du temps où les deux particules ne formaient qu'un seul système. Il s'agit de la *totalité* d'Einstein, qui implique la conclusion que la description quantomécanique *n'est pas complète*. En critiquant la thèse de la non-séparabilité, certains physiciens ont parlé de l'«étrange royaume des interactions à distance» (Piccioni), et ont défendu la thèse que la réalité est objective et *locale*, constituée d'objets qui sont dans l'espace et le temps.

Pourtant, ceux qui sont pour la causalité et la localité ont été obligés d'essayer de proposer une solution physique à la crise provoquée par la violation des inégalités de Bell.

On a essayé de réfuter la non-séparabilité de plusieurs points de vue. Selon un tel point de vue, la violation des inégalités de Bell, ne démontre pas l'inexistence des variables cachées et de la localité car on peut dériver ces inégalités sans utiliser les notions des variables cachées et de la localité. D'autres physiciens ont soutenu que les inégalités de Bell ne concernent pas l'ensemble des théories à variables cachées locales. Ainsi leur violation n'entraîne pas l'abandon de ces notions. Selon un autre point de vue aussi, les inégalités de Bell doivent être falsifiées, car leurs présupposés sont classiques, tandis que les phénomènes conce-

rnés sont quantiques. Selon ce point de vue, les corrélations EPR sont établies pendant le temps de la naissance commune des deux particules et la violation des inégalités est inévitable, car elles présupposent l'indépendance des deux groupes des variables cachées, qui sont en réalité corrélées. Certains réalistes ont aussi contesté la valeur démonstrative de la fameuse expérience d'Aspect et de ses collaborateurs. Ainsi, selon Piccioni, l'expérience d'Aspect ne démontre du tout la non-localité. Selon Selléri, de l'autre côté, l'«assomption d'Aspect n'est pas vraie, car il n'est pas vrai que l'ensemble des paires détectées est un échantillon fidèle de toutes les paires de l'ensemble».

Mais il y a aussi des propositions plus constructives. Ainsi on a produit d'autres inégalités qui présupposent la localité et qui doivent être falsifiées par l'expérience. D'autres, basées sur la localité, sont d'accord avec la mécanique quantique. Selon le point de vue, enfin, des Selleri, Marshall et Santos, jusqu'ici on a testé non pas les inégalités elles-mêmes mais des avec hypothèses additionnelles. Les résultats négatifs signifient que, ou bien la localité d'Einstein n'est pas valable ou bien que les hypothèses additionnelles sont fausses. Ainsi, il faut tester les inégalités de Bell telles quelles, sans hypothèses supplémentaires. Dans ce cas, on peut vérifier la localité et les inégalités et falsifier la mécanique quantique.

Les auteurs précédents ont élaboré un modèle basé uniquement sur le déterminisme et la localité, et qui sera en désaccord avec la mécanique quantique. Une expérience est en cours pour tester ce modèle. Si le résultat est en accord avec les prévisions du modèle, la localité d'Einstein sera vérifiée dans le domaine aussi de la mécanique quantique. Aussi d'autres physiciens réalistes considèrent que la validité des inégalités de Bell dépend aussi de certaines suppositions faites que la mécanique quantique n'admet pas; cette dernière n'a donc pas à les satisfaire. Pour ces physiciens, il doit y avoir aussi des systèmes classiques qui violent les fameuses inégalités de Bell-et ils en ont donné une série d'exemples.

Selon un autre point de vue (Brody), les discussions sur les inégalités de Bell présupposent que le spin ou la polarisation est mesurable dans deux directions en même temps. Or la mesurabilité conjointe est impossible et par conséquent les inégalités de Bell ne sont pas applicables au cas.

Par une généralisation, enfin, du critère EPR de réalité physique pour inclure aussi les états potentiels (Bitsakis), on peut comprendre de façon plus naturelle les corrélations des particules de l'expérience EPR, sans abandonner la localité. Cette même généralisation permet aussi de fonder la possibilité de théories probabilistes à variables cachées.

Selon le fameux théorème de von Neumann, en effet, les variables cachées sont «impossibles». Or, on peut constater que ce théorème n'exclut que les variables cachées non dispersives, c'est-à-dire celles qui assurent une détermination dynamique (probabilité égale à 1). Mais pourquoi restreindre les théories à variables cachées, à la seule forme déterministe - classique? Des modèles à variables cachées probabilistes sont possibles et de tels modèles ont été déjà proposés. Les lois du hasard sont plus générales que les lois dynamiques. Ainsi des théories à variables cachées probabilistes ont un caractère plus général que les théories du type Bohm-Vigier. Les lois probabilistes ne sont pas la négation de la causalité. Elles représentent une forme de détermination multivalente, donc plus souple que la détermination dynamique. Le concept de *déterminisme statistique quantique* correspond à ce nouveau type de détermination propre au niveau quantique de la réalité.

6. Au-delà de la pensée mécaniste

Pourquoi cette bataille *pour* les variables cachées? La mécanique quantique marche très bien. Ne s'agit-il donc pas d'un faux problème?

Je crois que l'on peut donner une réponse négative à ce dilemme. Les théories à variables cachées sont, d'abord, une réfutation du dogme positiviste, selon lequel la mécanique quantique donne une description complète et *définitive* de la réalité microphysique. Or, il n'y a rien de définitif dans la science. Son oeuvre consiste exactement à la recherche de relations et de réalités inconnues, donc «cachées». De ce point de vue, l'hypothèse des variables cachées est un catalyseur épistémologique qui a posé des questions nouvelles et qui contribua à l'ouverture de nouveaux champs de recherche (structure logique de la mécanique quantique, recherche des réalités nouvelles, expériences nouvelles, réflexion épistémologique sur la réalité, la localité, le déterminisme, etc.). La découverte éventuelle des variables cachées marquera une étape nouvelle dans l'histoire de la physique.

Les théories à variables cachées sont une des réponses possibles à l'idéologie indéterministe et spiritualiste, qui a été alimentée par les particularités de la mécanique quantique. Mais pourquoi ce vague d'indéterminisme et de mysticisme qui prend ses sources dans une science physique rigoureuse?

Il y en a plusieurs raisons: gnoséologiques, sociales et autres plus internes à la physique. Nous ne parlerons que des dernières. La physique classique a été édiflée sur des fondements ontologiques apparemment so-

lides (espace, temps, matière, forces, etc.). Ces fondements sont caractéristiques d'un réalisme intuitif, historiquement déterminé (et justifié). Pourtant, le champ (Maxwell, Einstein) est un concept qui contredit la conception mécaniste, de même que les atomes structurés (et divisibles), l'espace-temps à quatre dimensions, etc. La mécanique quantique, en particulier, était la négation même de la loi déterministe-classique.

Ainsi le dépassement de la conception mécaniste a été interprété par l'épistémologie positiviste et spiritualiste, comme la négation de la réalité objective et des lois de la nature. Les épistémologies positivistes et spiritualistes sont des épistémologies *mécanistes*: Pour elles il n'y a que la réalité constituée d'atomes indestructibles, il n'y a que le déterminisme laplacien, etc. Les penseurs de ces courants identifient, en particulier, la causalité (existence des causes) avec le déterminisme (forme de détermination de l'effet par les causes). Aussi ils ne peuvent pas envisager d'autres formes de réalité que les formes rigides (et vides) de la pensée formelle qui conservent leur *identité*. De cette manière ils ne peuvent pas comprendre la dialectique entre le potentiel et le réel, donc la transformation des systèmes quantiques et la naissance de réalités nouvelles pendant l'interaction des systèmes physiques.

Contre l'*objectivité passive* de la pensée mécaniste, la mécanique quantique a mis en relief un nouveau type d'objectivité: l'*objectivité dynamique*. La bataille pour les variables cachées est en même temps une bataille contre le positivisme et le spiritualisme.

La physique a depuis longtemps rendu caduc l'image mécaniste de la matière. Ainsi une des questions les plus anorthodoxes posées à Urbino était celle de l'existence d'ondes vides, c'est à-dire d'ondes qui ne transportent de la masse et de l'énergie (ondes-fantômes d'Einstein) et qui peuvent pourtant provoquer des phénomènes observables. Des expériences sont en cours pour la détection de ces ondes (Rauch et autres) et les résultats sont déjà encourageants. La masse n'est pas, éventuellement, un attribut inaliénable de la matière. Or, la masse s'identifie à la matière seulement dans la pensée mécaniste.