Mécanique quantique et philosophie transcendantale

A Bernard d'Espagnat, avec une gratitude qui serait tout à fait abusive si j'engageais en quoi que ce soit sa responsabilité.

Chacun a entendu parler, fût-ce par la grande presse, du paradoxe EPR — en termes non abrégés : le paradoxe d'Einstein, Podolsky, Rosen [1] — et des surprenantes « théories » auquel il a donné lieu, tant de la part de physiciens de renom que d'essayistes fantaisistes. C'est que la mécanique quantique, la dernière née des grandes théories physiques dans le siècle (elle a à peu près soixante ans) est un extraordinaire produit du génie humain, particulièrement bien adapté au monde microphysique, mais qu'elle pose des énigmes apparemment insolubles, qui se ramènent toutes, on le verra, au rapport entre la théorie (le corps institué de ses expressions mathématiques et lin-

guistiques dont la cohérence et la conséquence sont remarquables) et son référent « objectif », c'est-à-dire la nature, la *physis*, dans ses manifestations les plus fines.

Disons-le d'entrée : si la théorie quantique doit être une théorie physique, et non pas simplement, comme on l'a dit, la théorie de l'information que nous, hommes expérimentateurs, pouvons obtenir d'un système physique, elle doit se rapporter à quelque chose, couramment désigné comme « objectif », qu'elle ne fabrique pas ou ne crée pas : à la nature en tant qu'indépendante de la théorie. Qu'un tel rapport soit devenu énigmatique et paradoxal en mécanique quantique, chacun en conviendra. Les difficultés commencent dès qu'on cherche à le fixer, que ce soit dans une interprétation opérationnaliste et pragmatiste ou dans la tentative de restaurer ce qui prévalait dans la théorie physique antérieure, dès lors considérée comme « classique ». Si l'on peut dire que la théorie classique procède du projet mathématique, à savoir d'une représentation *a priori* de la nature en laquelle il devient possible de calculer les événements observables et mesurables de manière certaine, et ce, aussi bien dans la prédiction que dans la rétrodiction, si l'on peut dire de la théorie classique qu'elle projette *a priori* une idée mathématique de la nature, en laquelle la nature devient, en droit, intégralement « mathématisable [2] », on ne peut plus le dire, du moins aussi simplement, de la théorie quantique. Car les *processus* naturels, représentables de manière logiquement et mathématiquement cohérente en théorie classique, deviennent strictement *irreprésentables* en mécanique quantique, non que celle-ci renonce en quoi que ce soit à la mathématisation ; mais la mathématisation qu'elle effectue porte désormais sur les *résultats* (calculables et expérimentables, l'un n'allant pas sans l'autre) des processus.

On connaît la position d'Einstein : s'il y a de l'irreprésentable en théorie quantique, c'est qu'il y a, en elle, de l'irreprésenté susceptible, en droit, d'être représenté. Tout le débat, qui rebondit aujourd'hui de façon décisive, tourne autour de la question de savoir si cet irreprésentable est de principe, si la théorie quantique comme *théorie systématique de l'irreprésentable* — de l'impossible du point de vue de la représentation *a priori*, c'est-à-dire de la représentation telle que son objet soit identifiable et non contradictoire, adéquat à sa représentation — constitue un terme infranchissable ou une simple étape de la théorie microphysique.

Nous voudrions reprendre ce débat de manière philosophique, reprendre la difficulté comme telle, c'est-à-dire affronter l'irreprésentable qu'il y a dans la théorie quantique *comme irreprésentable*, avec les conséquences qui en découlent.

Pour cela, il nous faut tout d'abord retourner à la source, c'est-à-dire à l'article où Einstein, Podolsky et Rosen ont exposé leur paradoxe, étonnant piège logique dont nous commençons peut-être seulement à sortir [3]. Cet article, nous allons le lire comme un texte philosophique : il le mérite puisqu'il y est question de possible, de réel, de prédictible, d'expérimentable... Contrairement à une opinion généralement répandue, nous pensons qu'il y a beaucoup de philosophie, voire de métaphysique, dans la physique. Le nier, c'est mutiler la physique, la réduire à n'être que calculs et manipulations, obtempérer à la division

du travail, qui est une institution de notre temps [4], entre « spécialistes » de terrain et « penseurs » — les uns pouvant se muer en les autres, en fin de carrière, quand vient le dimanche de la vie.

Or, si la physique est probablement, depuis bientôt un siècle, le champ de l'activité humaine où s'est manifestée sans défaillance la plus fantastique inventivité, on ne peut en dire autant de la philosophie, le plus souvent réduite à bricoler plus ou moins habilement avec quelques concepts issus des dites sciences humaines. A cet égard, notre tentative n'est pas innocente : il s'agit de montrer la profonde cohésion de l'esprit humain, c'est-à-dire le caractère indissociable des « disciplines », tout au moins pour qui sait ne pas pâlir de panique devant cette autre expression subtile du génie humain qu'est la mathématique.

L'ARTICLE D'EINSTEIN, PODOLSKY, ROSEN. EXPOSÉ CRITIQUE DU PARADOXE

Le texte d'EPR pose aussitôt des questions et des définitions *philosophiques* — on leur a du reste souvent reproché ce caractère « métaphysique ». D'entrée, les auteurs écrivent que « toute considération sérieuse d'une théorie physique doit prendre en compte la distinction entre la réalité objective, qui est indépendante de toute théorie, et les concepts physiques avec lesquels la théorie opère » (EPR, 777). Il doit y avoir, poursuivent-ils, une correspondance entre la réalité et les concepts, ceux-ci étant « ce par quoi nous nous représentons (*we picture to ourselves*) cette réalité ».

Ces propositions correspondent au projet classique de la théorie physique, que nous avons désigné, à la suite de Heidegger [5], par « projet mathématique » : les concepts de la théorie, qui doivent se définir de manière mathématique (à savoir par des « formules »), constituent la médiation par laquelle nous nous représentons la réalité objective, de manière telle qu'il y ait entre eux et celle-ci une « correspondance », et c'est elle qui contient la définition du statut « objectif » de la théorie. Le concept est-il un simple « reflet » de la réalité, ou impose-t-il à la réalité un certain point de vue, voire une certaine interprétation ? Si l'on se fie à la définition heideggerienne du projet mathématique, nul doute qu'il faille poser la question sous la dernière forme.

La théorie est-elle correcte, et la *description* donnée par la théorie est-elle complète ? Pour ce qui concerne le caractère correct de la théorie, il est jugé, rappellent les auteurs, par l'accord entre les conclusions de la théorie (qui, en principe, relèvent du calcul) et l'expérience humaine, à savoir, en l'occurrence, l'expérimentation et plus précisément l'expérience de mesure. Ce point ne fait pas difficulté pour la théorie quantique dont les prévisions calculées sont en remarquable accord avec les résultats expérimentaux. Tout le paradoxe va être construit pour mettre en cause sa complétude, c'est-à-dire l'exhaustivité de la description qu'elle propose de la réalité microphysique.

Il faut une définition de la complétude, mais celle qui est donnée est *circulaire*. Lisons-la : « Tout élément de la réalité physique doit avoir sa contrepartie dans la théorie physique. » La définition ne serait pas circulaire si nous pouvions

décider par avance, sans la médiation des concepts de la théorie, ce qui constitue la réalité physique. Certes, cela peut se produire et s'est produit fréquemment dans l'histoire de la physique, quand des résultats expérimentaux se sont montrés rebelles à toute interprétation *simple* dans les cadres conceptuels de la théorie existante (Einstein le sait fort bien puisque c'est ainsi qu'est née la théorie de la relativité restreinte et la théorie quantique de la lumière). Mais cette définition est en somme assez vicieuse pour la théorie quantique puisqu'il n'y a précisément pas en elle de tels désaccords expérimentaux, et surtout puisqu'il y a, en elle, des concepts — dont le concept fondamental de fonction d'onde ou plutôt de fonction d'état Ψ — auxquels on ne voit pas bien ce qui peut leur correspondre dans la réalité physique.

Ce cercle, pourtant, les auteurs semblent l'éviter. Après avoir déclaré que « les éléments de la réalité physique ne peuvent être déterminés par des considérations philosophiques *a priori* », mais seulement par un « appel à des résultats d'expériences et de mesures », ils énoncent le critère de réalité qu'ils vont utiliser de la manière suivante : « Si, sans perturber d'aucune manière un système, nous pouvons prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de la réalité physique correspondant à cette grandeur physique. »

Cet énoncé a paru choquant à beaucoup de physiciens : la théorie quantique ne permettant de calculer des résultats d'expérience que dans un formalisme probabiliste, et les expériences de microphysique n'étant le plus souvent significatives que si elles portent sur une statistique mesurée par un grand nombre d'événements individuels, il est exceptionnel que la théorie se trouve en situation de calculer une probabilité d'occurrence d'un événement avec la valeur un (qu'elle puisse prévoir cette occurrence avec certitude). C'est dire qu'ici déjà un grand nombre d'objections ont pu surgir : si paradoxe il y a, il ne peut porter que sur la description que la mécanique quantique est susceptible de donner d'un système *individuel* — ce qui est pratiquement une abstraction expérimentalement irréalisable (du moins à l'époque) —, et, par surcroît, il ne peut être efficace que si, dans le cas d'une individuation réussie du système, la probabilité calculée par les moyens de la théorie égale la certitude (l'unité). Qu'à ce compte, la « réalité » microphysique ne soit jamais qu'une sorte de « brouillard statistique », les auteurs le savent bien :

> « Il nous semble que ce critère, loin d'épuiser tous les moyens possibles de reconnaître une réalité physique, nous fournit du moins un tel moyen, chaque fois que les conditions proposées en lui se produisent. Considéré non pas comme une condition nécessaire de la réalité, mais seulement comme une condition suffisante, ce critère est en accord aussi bien avec les idées classiques de réalité qu'avec les idées de la mécanique quantique (*scil.* concernant la réalité). »

En fait, cette restriction tient à l'idée, dont Einstein ne démordra jamais, que le caractère probabiliste-statistique de la théorie quantique est dû à son incomplétude qui doit être comblée, en droit, par une théorie générale du champ unifié, au lieu de l'être à la nature intrinsèque des *processus* microphysiques ; ce qui ne peut se

monnayer, dans le cas d'un processus microphysique individuel, que par une démonstration d'incomplétude, et donc par la nécessité de reprendre de manière plus fine les fondements théoriques de la conception quantique. Remarquons dès maintenant que la réfutation de Bohr[6] s'appuie essentiellement sur des arguments expérimentaux, sur l'interaction en l'occurrence immaîtrisable de l'appareil de mesure macroscopique et du système physique microscopique inventé par EPR, sans repousser l'idée que la mesure et la théorie quantiques puissent porter sur un processus individuel. D'ailleurs, l'expérience en pensée proposée par EPR a pu, moyennant certains raffinements, être réalisée récemment[7]. Ce qu'il y a de litigieux dans l'énoncé EPR du critère de réalité ne réside essentiellement ni dans le fait qu'il sera illustré par des exemples portant sur des processus individuels, ni dans la condition restrictive d'une possibilité de prédire un résultat expérimental avec certitude, mais dans l'expression « sans perturber d'aucune manière un système » : dans les expériences de microphysique destinées à nous donner de l'état d'un système des informations dont nous ne pouvons disposer d'avance, l'appareil de mesure, nécessairement macroscopique, perturbe irrémédiablement le système microscopique qui fait l'objet de la mesure — il n'y a pas, en microphysique, d'expérience « pure », c'est-à-dire purement passive, à distance, comme la vision, qui permette d'accroître significativement notre connaissance d'un système microphysique *ad libitum*, car la lumière elle-même a perdu le statut immatériel qu'elle avait dans la pensée philosophique, est devenue un « être » physique faisant lui aussi l'objet de la théorie physique, et en particulier,

depuis Einstein lui-même, de la théorie quantique, et un « être » qui *agit* à l'échelle microscopique sur le système microphysique qu'il permet de voir.

Avant de situer le lieu précis où intervient cette petite clause de non-perturbation inhérente au critère de réalité, poursuivons la lecture : nous y trouvons un raccourci utile de la théorie quantique. EPR prend le cas d'une particule ayant un seul degré de liberté (ne pouvant se mouvoir, suite à un processus de « préparation » par un appareil, que dans une seule direction). Comment la mécanique quantique décrit-elle son comportement ?

« Le concept fondamental de la théorie est le concept d'*état*, qui est supposé être complètement caractérisé par la fonction d'onde ψ, qui est une fonction des variables choisies pour décrire le comportement de la particule. Correspondant à chaque grandeur physique observable A, il y a un opérateur qui peut être désigné par la même lettre. »

L'explication demanderait un volume entier. Nous allons donc nous limiter à l'essentiel. Le caractère le plus frappant des manifestations macroscopiques des processus microphysiques est leur caractère *discontinu*, rebelle à toute explication — c'est-à-dire aussi à toute représentation — classique. Il fallait, pour rendre compte de cette discontinuité des observables, inventer une nouvelle théorie physique. La première idée, celle de Louis de Broglie et de la mécanique dite ondulatoire, consiste à expliquer cette discontinuité en associant des ondes aux particules — les phénomènes ondulatoires classiquement connus ont en effet cette propriété remarquable de présenter des discontinuités dans certains cas. Selon cette conception, l'onde et la particule qui lui est asso-

ciée ont, en principe, une réalité physique — la fonction d'onde Ψ y est censée « décrire » quelque chose, correspondant directement à quelque chose qui existe hors de la théorie [8], à une « onde-pilote » porteuse, pour ainsi dire, de la particule. C'est de cette conception qu'est parti Schrödinger pour établir sa fameuse équation qui est, au moins dans la première théorie quantique (avant la seconde quantification, celle des champs), l'équation fondamentale de la théorie.

Cependant, cette première théorie présentait des difficultés insurmontables. L'idée des fondateurs est qu'il faut essentiellement faire une théorie des *observables* qui rende compte de leur discontinuité, sans se préoccuper, *a priori*, du statut physique de la fonction Ψ en elle-même — elle représente désormais une « onde de probabilité » sans statut physique immédiat étant donné sa nature mathématique (c'est une fonction « complexe », c'est-à-dire qui associe des valeurs « complexes » ou « imaginaires » à des arguments « complexes » ou « imaginaires » dont on sait qu'ils sont purement mathématiques [9]. Toutefois, elle est censée représenter, *a priori*, c'est-à-dire précisément de manière purement mathématique, les états du système physique qu'elle représente. Tant qu'aucune opération physique de mesure d'une grandeur physique n'est effectuée sur le système en question, ces états sont cependant « mélangés » : il faut un dispositif expérimental complexe pour les « préparer » en vue de l'expérience propre de mesure qui les distinguera effectivement. Le génie des inventeurs de la théorie quantique fut de représenter *mathématiquement* l'opération de préparation des observables-mesurables (qui consiste en général en une interaction

physiquement définie entre le système étudié et le système de préparation des états comme distincts) par le concept d'opérateur : à toute grandeur *physique mesurable*, c'est-à-dire aussi, et nécessairement, à toute grandeur physique classiquement reconnue, donc à toute grandeur physique dont la mesure a un sens pour les physiciens, correspond un opérateur mathématique, dont la propriété doit être, quand il est appliqué à la fonction d'état Ψ, de distinguer (ou séparer) son état en « états propres », pouvant être caractérisés, toujours mathématiquement, par des fonctions d'état dès lors désignées comme fonctions propres.

Une fonction propre se reconnaît au fait que l'application de l'opérateur a pour résultat de la faire retrouver simplement multipliée par un *nombre* désigné par « valeur propre » de l'opérateur (c'est, sous forme mathématique : $A\Psi = a\Psi$), et qui doit égaler le nombre mesuré par l'opération effective de mesure de la grandeur physique correspondant à l'opérateur. En général (l'exception, de taille, concernant la mesure et l'opérateur de position), un opérateur doit avoir plusieurs valeurs propres discontinues, correspondant à la discontinuité des observables (on désigne cet ensemble par « spectre des valeurs propres » de l'opérateur), et auxquelles sont respectivement liées les diverses fonctions propres distinctes de l'opérateur (spectre de ses fonctions propres). D'autre part — c'est là une sorte de postulat épistémologique de la théorie rendu nécessaire par la cohérence logique et les lois physiques de conservation —, un système quantique individuel ne peut se trouver simultanément dans deux états *propres* distincts, du fait de l'opération de l'opé-

rateur correspondant. Le formalisme mathématique de la théorie (les opérateurs sont hermitiques pour des valeurs propres réelles) est constitué de telle sorte qu'il implique une condition sur les fonctions propres, qui est exprimable mathématiquement (condition d'orthogonalité), et qui autorise à considérer qu'une fonction d'état peut toujours se décomposer en une somme de ses fonctions propres (représentant ses états propres) affectées de coefficients (coefficients de Fourier généralisés qui sont pareillement, en général, des nombres complexes). On peut donc toujours écrire dans ce formalisme :

$$\Psi = \sum_i c_i \Psi_i$$

L'esprit de la théorie est d'avoir ajusté les choses de manière à ce que chacun des coefficients c_i est tel que son module (sa valeur absolue) élevé au carré représente la *probabilité* pour que l'opération (préparée) de mesure de la grandeur physique A trouve le système dans l'état propre de valeur propre a_i. Et le « miracle » est que « ça marche » : les $|c_i|^2$ correspondent, dans le cas d'expériences de mesure effectuées sur un grand nombre de systèmes individuels, aux moyennes statistiques observées. On a donc aussi la condition dite de « normalisation » :

$$\sum_i |c_i|^2 = 1$$

correspondant au fait que la somme des probabilités associées à tous les cas (valeurs propres) possibles ne peut excéder la certitude (la valeur 1).

Tel est, pensons-nous, le minimum indispensable pour pouvoir poursuivre de manière profitable notre lecture. Rappelons que les auteurs considèrent d'abord une particule ayant un seul degré de liberté. Ils enchaînent en envisageant le cas où Ψ (la fonction d'état censée décrire l'état de la particule) est une fonction propre de l'opérateur A, c'est-à-dire une fonction décrivant la particule dans l'état propre correspondant à la valeur numérique a (valeur propre) de la grandeur physique A. On peut alors écrire :

$$A\Psi = a\Psi$$

Dans ce cas, « A possède avec certitude la valeur a chaque fois que la particule est dans l'état donné par Ψ. » En vertu du critère de réalité, pour une particule dans l'état donné par cette fonction propre d'état, il y a un élément de la réalité physique qui correspond à la grandeur physique A.

Les auteurs prennent un exemple demeuré célèbre, parce qu'il contient l'expression « populaire » et la plus généralement connue des relations d'incertitude d'Heisenberg : celui des prédictions théoriques que l'on peut faire sur les mesures d'impulsion (produit de la masse par la vitesse) et de position d'une particule. Ils supposent que celle-ci a été « préparée » dans l'état propre correspondant à la valeur propre p_0 de l'impulsion. On peut dès lors écrire, si p désigne l'opération impulsion :

$$p\Psi = p_0\Psi$$

Ce qui signifie que l'impulsion de la particule a certainement, *dans cet état*, la valeur p_0 (*si on faisait* une expérience de mesure, on obtiendrait p_0 comme résultat), donc que l'impulsion de la particule dans cet état est réelle.

Or, si Ψ est une fonction propre de l'opérateur impulsion p, elle ne peut l'être, conformément à

la théorie, de l'opérateur position q (les opérateurs impulsion et position « ne commutent pas », c'est-à-dire que $pq\Psi \neq qp\Psi$, d'où l'on peut déduire la relation d'incertitude d'Heisenberg $\Delta p . \Delta q \geqq h$, qui signifie que le produit de l'incertitude sur une mesure *possible* de p par l'incertitude sur une mesure possible et simultanée de q ne peut, *en principe*, et non pas seulement pour des raisons expérimentales, être inférieur à la constante de Planck). Cela veut dire que, dans l'état propre « décrit » par Ψ, $q\Psi \neq a\Psi$, où a serait une valeur numérique définie de la coordonnée (de la position sur l'axe des x) de la particule. Le calcul théorique montre même que toutes les valeurs de la coordonnée pour cet état Ψ sont également probables. Il est par suite impossible de prédire, dans ce cas, une valeur définie de la coordonnée de la particule. Pour obtenir une telle valeur, il faut faire une expérience effective de mesure directe.

Mais une telle expérience de mesure perturbe la particule, et donc altère son état, si bien que le résultat de la mesure de position ne concerne plus la particule qui était décrite dans son état propre par Ψ (ce qui est une expression de la relation d'incertitude $\Delta p . \Delta q \geqq h$). Cela signifie, concluent les auteurs, que *quand l'impulsion d'une particule est connue, sa coordonnée n'a pas de réalité physique.* Et plus généralement que si deux opérateurs correspondant à deux grandeurs physiques A et B ne commutent pas (si l'opération mathématique AB sur une fonction Ψ ne rend pas le même résultat que la même opération effectuée avec BA), alors la connaissance précise de l'une d'entre elles exclut la connaissance précise de l'autre (par *prédiction théorique* au moyen du calcul). Enfin, toute tentative de déterminer cette

dernière grandeur expérimentalement modifie l'état du système de telle manière que cette détermination *effective* détruit la connaissance précise que nous avions de l'autre grandeur.

Ici se pose la question fondamentale. Dans l'état propre correspondant à la valeur propre p_0 de l'impulsion, la particule n'a-t-elle plus effectivement de position définie à l'instant t ? Ou bien cela signifie-t-il que la théorie est *impuissante* à « décrire » cette position à l'instant t (la fonction propre correspondant à l'état propre p_0 étant une fonction de la *variable* x), c'est-à-dire est *incomplète* ? Nul doute qu'il n'y ait ici une différence profonde entre théorie quantique et théorie classique. Toute la question est de savoir si cette non-définition de la position (à tout instant t) d'une particule d'impulsion p_0 est *intrinsèque ou n'existe que pour la théorie.* On voit l'enjeu philosophique du litige : dans le premier cas, on donne de la théorie une interprétation réaliste, mais fort paradoxale pour la représentation (une particule insituable, même si elle est étendue aux dimensions microscopiques d'un « paquet d'ondes », est irreprésentable), et dans le second cas, on donne de la théorie une interprétation idéaliste, mais en accord avec la représentation (dans ce cas, la fonction Ψ ne représente que la connaissance ou l'information que *nous* avons du système physique correspondant, et cette connaissance est *limitée*, ou, comme on dirait en termes philosophiques, *finie*). Il est remarquable que dans les deux interprétations nous nous trouvions confrontés à un réel *irreprésentable*, où l'actualisation par l'expérience d'une possibilité mathématiquement définie par une probabilité n'est pas actualisation d'une possibilité intrinsèque *du système* puisque

la mesure a pour effet de le *transformer* du dehors en le perturbant (nous sortons du rapport possible/réel défini dans le cadre leibnizien). Tout le problème est de savoir si cette irreprésentabilité est de principe ou réductible par une meilleure théorie de la microphysique.

Formulée par EPR, la question devient : « Ou bien la description en mécanique quantique de la réalité donnée par la fonction d'état n'est pas complète, ou bien quand deux opérateurs correspondant à deux grandeurs physiques ne commutent pas, les deux grandeurs ne peuvent avoir simultanément de la réalité. » Prenons l'exemple d'une particule se trouvant dans l'état propre correspondant à la valeur propre p_0. La fonction propre qui la décrit dans cet état est une fonction de la coordonnée x [exp. $(2\pi i/h)\ p_0 x$]. Ou bien l'on dit que la description est incomplète parce que la coordonnée x (élément de la réalité physique, dans la représentation, c'est-à-dire dans le projet mathématique de la théorie classique) n'a pas de contrepartie dans la théorie physique qui ne peut, dans ce cas, lui donner de la réalité (puisqu'elle ne peut en prédire une valeur définie avec certitude), et la traite plutôt comme une variable mathématique. Ou bien l'on dit que la théorie est complète puisque, les opérateurs p et q ne commutant pas, l'impulsion et la position ne peuvent *par principe* avoir simultanément de la réalité.

Or il se fait, poursuivent les auteurs, que la mécanique quantique suppose généralement que la fonction d'état contient une description complète de la réalité physique du système dans l'état qui lui correspond ; cela semble parfaitement raisonnable puisque l'information qui peut être obtenue de la fonction d'état semble corres-

pondre exactement à ce qui peut être mesuré sans altérer l'état du système. Or, concluent-ils, cette supposition prise avec le critère de réalité conduit à une contradiction : c'est là le « piège logique » du paradoxe EPR.

Il faut préciser ce que cette formulation a de théorique : aucune mesure physique effective n'est « pure » à moins de présupposer un dispositif de préparation qui prédispose le système à se trouver dans tel ou tel état, qui donc en altère l'état originel puisque, Bohr insistera sur ce point [10], la mesure physique consiste *toujours* en une *interaction* physique d'un système macroscopique et du système microscopique sur lequel on effectue la mesure. Il n'est par exemple pas possible de mesurer l'impulsion (ou la vitesse) d'une particule, ou d'un faisceau supposé homogène de particules, sans les faire interagir avec un système macroscopique qui en modifie l'état. Autrement dit, on distingue généralement, en mécanique quantique, entre l'opération de « préparation » du système dans un (ou des) état(s) propre(s) bien défini(s), et l'opération de mesure effective de la (ou d'une) valeur propre correspondant à cet (ou un) état propre, ce qui, en général, nécessite un second dispositif expérimental, distinct du dispositif de préparation (le système de préparation perturbant le système de manière définie, mais irréversible, et le système de mesure enregistrant les effets définis de cette perturbation, c'est-à-dire les valeurs propres de l'opérateur correspondant à la préparation). Mais si cette remarque prend toute son importance dès lors qu'on s'interroge sur la possibilité de prendre en compte la partie pratique du paradoxe, elle n'a pas d'importance épistémologique fondamentale

en ce qui concerne ce que la théorie quantique « orthodoxe », ou fidèle à l'interprétation dite de Copenhague, prétend être (même en admettant théoriquement, comme l'effet de l'interaction système/appareil de mesure, que la mesure sans préparation d'un état pur avec certitude est impossible, en admettant donc que la certitude correspond dans la plupart des cas à une *distribution idéale de probabilité*). Cela explique peut-être que le paradoxe EPR n'ait jamais troublé les physiciens outre mesure : la physique effective est plus qu'une théorie, elle est un mixte indissociable de théorie et de pratique.

Entrons maintenant dans l'exposé proprement dit du paradoxe, piège logique et presque diabolique. Les auteurs considèrent deux systèmes I et II qui entrent en interaction depuis le temps $t = o$ jusqu'au temps $t = T$, après lequel on suppose qu'il n'y a plus d'interaction. Ils posent par hypothèse que les états des deux systèmes avant $t = o$ étaient connus. On peut alors calculer, grâce à l'équation de Schrödinger, l'état du système combiné I et II à tout instant ultérieur, et en particulier pour tout $t > T$. Mais on ne peut calculer l'état dans lequel *chacun* des deux systèmes se trouve après l'interaction. Selon la théorie quantique, on ne peut connaître l'état des deux systèmes que par des *expériences* de mesure supplémentaires, par la méthode dit de « réduction du paquet d'ondes ». Pour l'essentiel, celle-ci peut être expliquée de la manière suivante :

Soient a_1, a_2, a_3, ... les valeurs propres d'une grandeur physique A (mathématiquement : de l'opérateur correspondant) caractérisant le système I, et $u_1(x_1)$, $u_2(x_2)$, $u_3(x_3)$ ... les fonctions propres qui leur correspondent, x_1 désignant des variables uti-

lisées pour décrire le premier système. Si Ψ désigne la fonction d'état du système I + II, et est considérée comme une fonction de x_1, on peut toujours l'exprimer mathématiquement par un développement en série généralisé, dont les coefficients sont des fonctions de x_2 (c'est-à-dire les variables utilisées pour décrire le second système) et les fonctions, les fonctions propres $u_n(x_1)$ du premier système. On peut donc écrire :

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n(x_2)\, u_n(x_1)$$

Si l'on suppose à présent que la grandeur A est *effectivement* mesurée (après l'interaction), et que l'on trouve la valeur a_k, on peut en conclure que, *après la mesure*, le premier système se trouve dans l'état propre donné par la fonction propre $u_k(x_1)$, et que le second système se trouve dans l'état donné par la fonction $\Psi_k(x_2)$. Autrement dit, le procédé de réduction du paquet d'ondes revient à dire que le « paquet d'ondes » $\Psi(x_1, x_2)$ résultat de l'interaction des systèmes I et II, et pouvant être donné par la série infinie que l'on vient d'écrire, est réduit *après la mesure*, au terme unique $\Psi_k(x_2)\, u_k(x_1)$. Que la manière dont EPR expose ici le procédé ne soit pas tout à fait rigoureuse (l'interaction des systèmes I et II a en général pour effet de « brouiller » les états propres du système I en les « mélangeant » avec les états du système II de manière telle qu'on ne pourra plus mesurer une valeur propre a_k après l'interaction), qu'il faille lui préférer l'exposé plus cohérent de Schrödinger à la même époque [11] (l'interaction de deux systèmes pouvant être caractérisés par les fonctions d'état φ_o et χ_o a pour effet la décomposition spectrale de ces deux fonctions en fonctions d'état

propres $\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_k$ et $\chi_1, \chi_2, ..., \chi_k$), cela ne change rien au problème de fond pris dans sa dimension théorique : la fonction d'état φ_0 peut toujours *théoriquement* être décomposée en série des fonctions d'états propres $\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_k$, et de même pour χ_0 ; ce qui change, ce sont les coefficients du développement, et dans la méthode expliquée par EPR, ceux-ci peuvent se ramener, pour le cas du développement de $\Psi(x_1, x_2)$ en fonction des $\varphi_n(x_1)$, à des fonctions $\Psi_n(x_2)$ pour tout temps $t > T$.

Toute la question réside dans le choix de la grandeur physique A déterminant l'ensemble des fonctions propres du premier système. Si, au lieu de A, nous avions choisi une grandeur physique B, ayant les valeurs propres $b_1, b_2, b_3, ...$, et les fonctions propres $v_1(x_1), v_2(x_2), v_3(x_1) ...$, nous aurions dû écrire :

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x_2) \; v_s(x_1)$$

où les φ_s sont d'autres coefficients. Si donc la grandeur physique B est mesurée sur le système I, et si l'on obtient comme résultat la valeur b_r, on doit conclure qu'*après* cette expérience *effective* de mesure, le premier système se trouve dans l'état donné par $v_2(x_1)$ et le second dans l'état donné par $\varphi_r(x_2)$. Le nerf de l'argument est ici :

« Nous voyons dès lors que, par suite de deux mesures différentes effectuées sur le premier système, le second système peut se trouver dans des états caractérisés par deux fonctions d'état différentes. D'autre part, puisqu'à l'instant de la mesure, les deux systèmes n'interagissent plus, aucun changement réel ne peut avoir lieu dans le second système du fait de quelque chose qui peut être fait sur le premier système. Cela, évidemment, est un cas de ce que signifie

l'absence d'interaction entre les deux systèmes. Il est donc *possible d'assigner deux fonctions d'états différentes* (dans notre exemple Ψ_r et φ_r) *à la même réalité* (le second système après l'interaction avec le premier). »

Nous pouvons déjà dire que, si nous mesurons la valeur a_k de la grandeur physique A sur le premier système, nous pouvons *prédire avec certitude*, et *sans avoir perturbé en aucune manière le second système*, que celui-ci se trouve dans l'état Ψ_k avec une valeur propre (puisque effectivement *mesurable* : toute la question est là, et il est toujours possible d'y répondre dans la mesure où $\Psi(x_1, x_2)$ constitue une représentation mathématique *commune* aux deux systèmes) correspondant à une grandeur physique dès lors réelle, en vertu du critère de réalité. C'est *comme si la mesure physique effective opérée sur le système I influençait « à distance » l'état du système II*. Et cela, de manière irréductible, semble-t-il, puisque le choix de la mesure effective d'une autre grandeur physique B sur le système I (elle donnerait, en droit, la valeur propre b_s et correspondrait, pour $\Psi(x_1, x_2)$, au choix d'une autre représentation mathématique commune aux deux systèmes), aurait placé le système II dans un autre état correspondant à la réalité d'une autre grandeur physique, et ce toujours sans que l'on puisse concevoir ou se représenter cette influence « à distance » de la mesure de B pour le système I sur l'état du système II. Or, et c'est ici qu'un *certain* concept de réalité s'introduit subrepticement dans l'exposé d'EPR, le système II, ne pouvant être influencé « à distance » par la mesure effectivement opérée sur le système I (tel est, nous le verrons, le postulat de « séparabilité » des auteurs), reste le *même* système ayant *la même*

réalité, qui ne peut être « créée » par la mesure sur le système I, et qui peut aussi, si l'on veut, se manifester *physiquement* par une expérience de mesure.

Telle est la forme généralement retenue du paradoxe. Nous pourrions en rester là, mais il vaut la peine de poursuivre, car la situation présentée par EPR est plus grave encore. « Il se peut que les deux fonctions d'état Ψ_k et φ_r soient des fonctions propres de deux opérateurs qui ne commutent pas (*scil.* pour lesquels il est impossible *par principe*, selon la théorie, d'effectuer des mesures simultanées des grandeurs physiques qui leur correspondent avec un produit de leur imprécision inférieur à la grandeur numérique de la constante de Planck), correspondant à des grandeurs physiques, respectivement P et Q. » Les auteurs envisagent deux systèmes constitués par deux particules, et montrent que si A est l'impulsion de la première particule et si $u_p(x_1)$ est la fonction propre qui la décrit dans l'état correspondant à la valeur propre p de l'impulsion, alors la fonction d'état $\Psi_p(x_2)$ de la seconde particule sera nécessairement la fonction propre de l'opérateur impulsion correspondant à la valeur propre -p.

Cela signifie que, si nous mesurons effectivement l'impulsion de la première particule, et si nous obtenons le résultat p, alors nous pouvons prédire avec certitude, et sans perturber d'aucune manière la seconde particule, que la valeur de son impulsion est égale à -p (donc il y a un élément de la réalité physique qui, dans la seconde particule, correspond à l'impulsion : celle-ci fait partie de la réalité physique de la seconde particule). En revanche, si B est la coordonnée de la première particule et si $v_r(x_1)$ est la fonction propre qui la décrit dans l'état correspondant à la valeur propre x de la position, alors la fonction d'état $\varphi_x(x_2)$ de la seconde particule sera nécessairement la fonction propre de l'opérateur position correspondant à la valeur propre $x + x_0$ de la coordonnée de position de la seconde particule. Cela signifie pareillement que, si nous avions mesuré effectivement la position de la première particule, et si nous avions obtenu le résultat x, alors nous aurions pu prévoir avec certitude, et sans perturber la seconde particule, que la valeur de sa position serait égale à $x + x_0$ (donc la position fait partie de la réalité physique de la seconde particule). Or, dans les deux cas, la seconde particule n'est pas touchée (perturbée par une mesure) ; donc elle reste *la même*, et garde la *même réalité dont autant l'impulsion que la position doivent dès lors faire partie.* En outre, les opérateurs impulsion et position ne commutent pas, ce qui signifie, selon la théorie quantique interprétée par EPR, que ces deux grandeurs physiques ne peuvent avoir simultanément de la réalité. Il y a donc contradiction, à moins de supposer *incomplète* la description de la réalité microphysique donnée par la théorie quantique.

Remarquons qu'EPR a construit cet exemple en toute connaissance de cause : que l'on ne puisse mesurer simultanément, par un dispositif physique concevable, p et x sur la première particule, que l'on ne puisse, pareillement, mesurer simultanément p sur la première particule et x sur la seconde (ou l'inverse), il le sait fort bien, et à cet égard il faut reconnaître que Bohr fait une réponse décevante ; il se retranche derrière des arguments expérimentaux, argue de la non-séparabilité des mesures effectives et par ailleurs mu-

tuellement incompatibles sur la première particule et sur la seconde, et implicitement du fait que cette non-séparabilité modifie en conséquence l'état de la seconde particule, de manière telle qu'il est impossible de concevoir un système expérimental où la seconde particule aurait simultanément les états propres d'impulsion -p et de position $x + x_0$. Sur ce point, les raffinements techniques ont rendu possible la réalisation effective de l'expérience « en pensée » d'EPR (pour d'autres grandeurs physiques que l'impulsion et la position), et ont partiellement infirmé Bohr (non pas certes sur le point qu'il existe des dispositifs de préparation et de mesure qui s'excluent mutuellement, mais sur une part de son argumentation) — même si les *résultats* de ces expériences donnent tort aussi à EPR.

Reprenons le texte, ici fort dense :

« [...] nous supposons que ψ_k et φ_r sont des fonctions propres d'opérateurs P et Q qui ne commutent pas et qui correspondent respectivement aux valeurs propres p_k et q_r. Donc, en mesurant ou bien A ou bien B (*scil.* sur le système I), nous sommes capables de prédire avec certitude, et sans perturber d'aucune manière le second système, ou bien la valeur de la grandeur P (c'est-à-dire p_k) ou bien la valeur de la grandeur Q (c'est-à-dire q_r). Conformément à notre critère de réalité, dans le premier cas, nous devons considérer la grandeur P comme étant un élément de la réalité, dans le second cas, la grandeur Q est un élément de la réalité. Mais, comme nous l'avons vu, les deux fonctions d'état ψ_k et φ_r appartiennent à la même réalité. »

Répétons, avant de poursuivre, que cette réalité est celle du second système et qu'elle excède par son contenu la réalité indiquée seulement de façon formelle dans le critère de réalité : il s'agit plutôt d'une réalité en un sens philosophique,

définie tant par sa localité que par son identité à soi (elle reste *la même* quelle que soit la mesure effectuée sur le système I, parce qu'elle en est *localement séparée*).

Lisons à présent la démonstration d'incomplétude :

« Préalablement, nous avons prouvé que, ou bien (1) la description par la mécanique quantique de la réalité donnée par la fonction d'état n'est pas complète, ou bien (2), si les opérateurs correspondant à deux grandeurs physiques ne commutent pas, les deux grandeurs ne peuvent avoir simultanément de la réalité. Partant ensuite de la supposition que la fonction d'état donne bien une description complète de la réalité physique, nous sommes parvenus à la conclusion que deux grandeurs physiques, avec des opérateurs qui ne commutent pas, peuvent avoir simultanément de la réalité. Donc la négation de (1) conduit à la négation de la seule autre possibilité (2). Nous sommes dès lors contraints de conclure que la description par la mécanique quantique de la réalité donnée par les fonctions d'état n'est pas complète. »

Autrement dit, si la description donnée par la fonction d'état est complète, alors il faut rejeter l'un des principes de la mécanique quantique, admettre la violation possible, du moins en droit, des relations d'incertitude d'Heisenberg, lesquelles, rappelons-le, font rigoureusement système avec les fondements mêmes de la théorie dans leur exposition mathématique. Or, comme la théorie est incapable de donner des moyens mathématiques permettant de décrire simultanément (par une fonction d'état) des états effectifs (effectivement mesurables, alors même que la démonstration d'EPR prétend administrer la preuve de leur réalité physique simultanée) et correspondant à deux grandeurs physiques rendues mathématique-

ment par deux opérateurs qui ne commutent pas, cette théorie est incomplète. Voilà qui a suscité des débats passionnés ! Pour le philosophe, tout dépend de la manière dont on interprète l'incomplétude. Mais examinons le propos final d'EPR :

« On pourrait objecter à cette conclusion que notre critère de réalité n'est pas suffisamment restrictif. En effet, on n'y serait pas parvenu si on avait précisé que deux ou plusieurs grandeurs physiques peuvent être considérées comme des éléments simultanés de la réalité *seulement si elles peuvent être mesurées ou prédites simultanément*. De ce point de vue, puisque, ou bien l'une ou bien l'autre, mais non pas les deux simultanément, des deux grandeurs P et Q peut être prédite, elles ne sont pas simultanément réelles. Cela fait que la réalité de P et Q dépend du processus de mesure effectué sur le premier système, qui ne perturbe d'aucune manière le second système. Aucune définition raisonnable de la réalité ne peut être envisagée en vue de permettre cela.

« Tout en ayant ainsi montré que la fonction d'état ne fournit pas une description complète de la réalité physique, nous laissons ouverte la question de savoir s'il existe ou non une telle description. Nous croyons néanmoins qu'une telle théorie est possible. »

Ce propos final appelle plusieurs réflexions. Tout d'abord, il témoigne de la parfaite connaissance des objections possibles : la restriction du critère de réalité est en effet le point sur lequel a répondu Bohr, en invoquant l'impossibilité expérimentale, traduite selon lui dans les *fondements* de la théorie, d'effectuer une mesure sur le premier système qui soit compatible, en raison des dimensions macroscopiques du dispositif de mesure, avec une mesure différente (correspondant à un opérateur qui ne commute pas avec l'opérateur de la première) de l'état du second système. Il n'y a pas de « mystère », selon Bohr, dans l'action « à distance » de la mesure effectuée sur la

première particule sur l'état (prédictible avec certitude) de la seconde, en raison des dimensions macroscopiques de l'appareil de mesure, solidaire d'un seul et exclusif système de référence pour le système constitué par les *deux* particules.

Autrement dit, il est impossible de réaliser effectivement une mesure sur la première particule qui ne perturbe pas la seconde et on ne peut le concevoir qu'« en pensée », de manière spéculative ou « métaphysique » [12]. Le plus souvent, les arguments d'EPR ont été rejetés, pour cette dernière raison, par la plupart des théoriciens qui se sont plu à souligner que la mécanique quantique est une théorie physique *des observables*, et que c'est en tant que telle qu'elle doit être considérée comme complète. Position quasi inexpugnable, mais à la lourde contrepartie philosophique. Il faut reconnaître alors, en effet, que la théorie procède de ce que nous nommerons un *idéalisme physicaliste*, que l'on pourrait même qualifier de « néokantien » dans la mesure où la théorie ne concerne que les *phénomènes* (ce que l'observateur observe et mesure par ses appareils) et non les choses « en soi » (qui échappent, pour des raisons que les fondateurs pensaient liées à leurs dimensions microscopiques, à toute observation directe et à toute mesure précise possible). Les coordonnées d'espace (sauf dans le cas de mesures étendues dans l'espace pour lesquelles vaut la relation d'incertitude $\Delta x.\Delta p_x \geqslant h$) et de temps (sauf dans le cas de mesures « étendues » dans le temps pour lesquelles vaut la relation d'incertitude $\Delta E.\Delta t \geqslant h$), joueraient le rôle de coordonnées idéales, c'est-à-dire purement mathématiques. Plus généralement, quand on écrit une fonction

d'état, on ne fait qu'écrire une expression mathématique dont le référent physique est plutôt un x (en termes kantiens : un « objet transcendantal = X ») qu'une entité physique clairement et distinctement définie. En outre, les opérateurs de la théorie sont *censés correspondre* à des opérations concrètes de préparation et de mesure alors même que le processus microphysique d'interaction entre l'appareil de mesure et le système préparé demeure impossible à maîtriser. Le génie de la théorie tient au fait qu'avec de tels concepts et l'équation de Schrödinger elle parvienne, en vertu de son projet mathématique, à transformer la mécanique classique de manière à *ne* tenir compte *que* de l'observable quantique et à conduire *simplement* à du physiquement mesurable et vérifiable. En ce sens, la théorie intègre en elle-même les conditions de sa vérifiabilité ; véritable prouesse de l'esprit mathématique que d'avoir réussi à se donner *a priori* juste ce qu'il faut pour rendre compte de résultats expérimentaux *a posteriori*, même si ce « juste ce qu'il faut » peut toujours être critiqué pour des raisons physiques [13]. Bref, il faut admettre que si la théorie quantique est bien une théorie complète des observables, elle constitue néanmoins une sorte de *constructum* mathématique dont la référence à la réalité — c'est le moins qu'on puisse dire — n'est pas transparente. D'un mot, nous tirerons cette conséquence provocante qu'effectivement la théorie quantique n'est pas complète quant au pensable, ou si l'on préfère *quant au représentable* ; elle constitue bien, quoi qu'on en dise, une sorte de renoncement par rapport à l'ambition de la physique classique de connaître intégralement la réalité intime de la nature. Elle correspond au projet mathématique

de rendre compte de l'observable, mais non au projet mathématique de se représenter le réel physique de manière telle qu'il soit, en son *être* et ses manifestations, mathématiquement déductible et prévisible, c'est-à-dire explicable. Personne ne peut se représenter adéquatement « ce qu'est » une particule, une transition quantique, un atome, une molécule, un champ, un état « réel » dans sa différence d'avec un état « virtuel »... Mais tout physicien bien entraîné peut prédire de manière juste les résultats de mesures effectives opérées sur de tels systèmes, qui constituent donc, à tout le moins, ce que Kant désignait par « objet transcendantal = X ». En ce sens, nous pouvons dire que la théorie quantique est assimilable à un idéalisme physicaliste-transcendantal : la limitation de la Raison qui, chez Kant, est apportée par la sensibilité pure *a priori*, l'est, en théorie quantique, par les appareils de mesure. Nous pourrions même ajouter que le phénomène quantique a un statut quasi heideggerien, puisqu'il n'est pas tout simplement disponible ou présent (*vorhanden*), mais ne se manifeste que par un projet du *Da-sein* humain incarné dans les appareils de préparation et de mesure : le phénomène ne se manifeste que par et dans les appareils, sur la base d'un pro-jet de monde qui tend à le faire activement s'exhiber, ce qui est une autre manière de traduire l'indissociabilité de l'observant et de l'observé, du mesurant et du mesuré, de la théorie et de la pratique en mécanique quantique [14]. En théorie classique, le système peut toujours être représenté comme indépendant de l'observateur et de l'expérimentateur, il est toujours disponible et présent : il suffit de le voir et de *bien* le voir (ce qui nécessite, de son côté, la double élabora-

tion théorique et expérimentale, qui est dans ce cas la mise au point de procédés techniques permettant de « varier » les points de vue sur la même réalité physique).

Cependant, le débat est loin d'être épuisé. La seconde réflexion que suscite le propos final d'EPR concerne ce qui reviendra souvent sous la plume d'Einstein, à savoir le fait que le caractère probabiliste-statistique de la théorie est intrinsèquement lié à son incomplétude. Il est remarquable que la démonstration d'incomplétude proposée par EPR se fonde sur la considération de cas individuels, et aussi qu'en principe la théorie puisse autant décrire des processus individuels que des processus collectifs. En un sens, la démonstration d'EPR revient à dire qu'une théorie qui convient pour des processus collectifs ne convient pas pour des processus individuels, donc qu'elle est une sorte de mécanique statistique qui devrait être complétée par une théorie rigoureuse pouvant s'appliquer sans paradoxe à des systèmes simples, comportant un tout petit nombre d'éléments susceptibles d'être effectivement individués. Einstein serait resté fidèle toute sa vie à l'idéal classique d'une physique « des trajectoires » (qui arrive en quelque sorte à son accomplissement avec la théorie de la relativité restreinte et générale), et ici la théorie quantique serait restée hybride : Prigogine souligne l'équivoque de l'équation d'évolution de Schrödinger où le temps joue toujours un rôle « classique ». Or, l'*irréversibilité* joue, tant dans les processus microphysiques que dans la théorie, un rôle crucial : la préparation du système dans des états définissables et l'expérience de la mesure sont irréversibles, et elles seules font l'objet de la théorie. La question qui se pose alors est de

savoir si le caractère probabiliste-statistique de la théorie n'est pas dû à l'irréversibilité de principe des processus quantiques, au fait qu'ils consistent plutôt en des enchaînements de *corrélations* de probabilités qu'en des enchaînements univoques de causes et d'effets. Non pas, donc, comme on l'a dit trop souvent, qu'il faille abandonner tout « déterminisme », mais plutôt, selon une autre forme du même paradoxe fondamental de la théorie, que la cause perde de son caractère univoque (au sens d'événement simplement défini par des conditions physiques actuelles) au point de mettre en jeu des « états virtuels » qui, alors même qu'ils ne pourraient devenir réels dans telles ou telles conditions physiques précises à moins de violer les principes de conservation universels de la physique, doivent néanmoins être pris en compte dans le « calcul » de l'effet [15]. Einstein disait qu'il ne pouvait pas admettre que « Dieu joue aux dés », calcule ses chances avant d'agir et retrouve les résultats de son calcul dans l'effet de son action, comme s'il y avait une « hésitation » ou un « brouillage » de la cause qui se retrouve dans l'effet, dans des proportions expérimentalement vérifiables. Il se pourrait donc qu'une théorie générale de l'irréversibilité puisse un jour rendre compte du caractère probabiliste-statistique de la théorie quantique [16], dont on voit qu'il n'est pas nécessairement lié au caractère incomplet de la théorie.

On peut donc admettre que tout en étant une théorie complète des observables, et plus généralement des *phénomènes* quantiques dans leur unité, qui est celle du système étudié et du dispositif expérimental, la théorie quantique est une théorie incomplète des « entités » auxquelles elle

se réfère, sans qu'il faille automatiquement relier cette incomplétude et le caractère statistique-probabiliste de la théorie. Ce dernier pourrait être intrinsèque, comme le montre, à rebours, l'échec de toute tentative de construire une théorie microphysique cohérente des trajectoires (c'est-à-dire de l'évolution d'un petit nombre de points-événements dans l'espace-temps à quatre dimensions de la relativité) qui soit inspirée des idées classiques. Il manque toujours un principe d'individuation univoque permettant de définir un individu (ou un petit nombre d'individus) d'une manière qui puisse exclure la mise en jeu d'états virtuels [17], lesquels rendent impossible l'identification stricte à soi du système dans tel ou tel état (sinon, bien sûr, *après* une expérience de mesure, mais c'est justement le résultat de cette mesure qu'il s'agit de prédire *a priori*). Sauf à faire l'hypothèse absurde qui le représenterait comme un être hésitant mais doué de raison, donc comme une pure projection de la conscience du théoricien.

C'est ce défaut d'un principe d'individuation univoque qui suscite le plus d'étonnement chez les non-physiciens et chez les interprètes. Dans la conception classique, le pro-jet mathématique de la physique paraissait aller de pair avec une logique (celle de la définition des êtres physiques par l'identité à soi et la non-contradiction), et même une ontologie, dont la représentation mathématique *a priori* du réel est l'expression courante. Ce n'est plus le cas de la théorie quantique qui ne peut définir la quiddité des « x » sur lesquels elle travaille. La conséquence philosophique à nos yeux la plus importante de la mécanique quantique est qu'en elle la théorie mathématique se dis-

socie de l'ontologie. Si elle constitue une sorte d'idéalisme physicaliste-transcendantal, elle administre concrètement la preuve qu'une théorie physique est autre chose qu'une *theoria* (système ultimement fondé sur la contemplation d'une réalité présente ou disponible, sans intervention perturbante, dans la *Vorhandenheit*), ensuite qu'une philosophie transcendantale n'est pas une ontologie — elle peut traiter des phénomènes sans avoir à statuer sur le mode d'être des choses ou des étants dont il est question. On ne peut pas dire qu'un « objet = x » quantique se réduise à ses manifestations dans le champ des phénomènes, ce serait là une interprétation restrictive de la théorie. Nous penchons pour une interprétation du phénomène quantique comme *phénomène de monde* et non comme phénomène de chose. Pour nous, le statut de la théorie quantique requiert de la philosophie une réforme profonde.

L'expérience, impossible naguère, a pu être réalisée, à diverses reprises, récemment, et elle n'a fait qu'approfondir le paradoxe. On va s'apercevoir combien l'ontologie du monde microphysique est impossible.

L'ÉNIGME DE LA NON-SÉPARABILITÉ DES SYSTÈMES MICROPHYSIQUES

Si l'on considère deux systèmes I et II qui, après avoir interagi un certain temps, se séparent dans l'espace macroscopique, est-il possible d'effectuer une mesure physique sur le premier système qui, en droit, ne perturbe d'aucune manière le second ? La réponse est oui, mais à condition d'ef-

fectuer, non pas des mesures de position ou d'impulsion, mais des mesures de la composante de spin de la première particule selon un certain axe, ce qui rend possible la mesure simultanée et en droit indépendante de la composante de spin de la seconde particule selon le même ou selon un autre axe. Nous laissons de côté, ici, la définition de la grandeur physique « spin » qui est une grandeur spécifiquement quantique *correspondant* classiquement au « moment angulaire intrinsèque » d'une particule, et qui est en fait irreprésentable dans la mesure où la particule quantique n'est pas une petite sphère tournant sur elle-même. A cette grandeur physique correspond, dans la théorie, un opérateur, et aux composantes de spin selon deux axes de l'espace correspondent des opérateurs qui ne commutent pas : la théorie prévoit qu'on ne peut mesurer simultanément ces deux composantes (la mesure de la composante suivant l'axe x *exclut* la mesure simultanée suivant l'axe y, étant donné les relations de non-commutativité qui lient les opérateurs en question à l'opérateur correspondant à la mesure suivant le troisième axe z de l'espace : on ne peut plus parler rigoureusement d'une « incertitude » sur ces *mesures* simultanées en raison de leur exclusion *de principe* liée, en fait, au rapport du spin à la structure de l'espace, à l'expression spécifiquement quantique correspondant au produit vectoriel qu'est le moment angulaire classique).

La théorie prévoit aussi que si deux particules interagissent d'une manière précise, qu'il s'agisse de deux protons amenés par cette interaction dans un « état singulet » (spin total égal à zéro), d'un électron et d'un anti-électron qui interagissent de manière à donner un système de même type

d'état, on observe une corrélation négative stricte entre les composantes de spin selon le même axe des deux particules issues de l'interaction. Dans le cas des protons, on observera deux protons dont l'un aura toujours, pour la même composante de spin, la valeur *plus* et l'autre la valeur *moins*, avec la même valeur numérique (1/2). Dans le cas de l'électron et du positron dans l'état donné, on observera deux photons dont l'un aura toujours, pour la même composante de spin, la valeur *plus* et l'autre la valeur *moins* avec la même valeur numérique (1) [18]. On se trouve dans le cadre de l'expérience en pensée mise en jeu par EPR, et les résultats expérimentaux sont en accord avec les prédictions théoriques. Si l'on mesure la composante de spin *plus* sur l'une des deux particules, on peut prédire avec certitude que la même composante de spin sur l'autre particule aura la valeur *moins*. Donc cette composante de spin est un élément de la réalité physique de la seconde particule. Mais si l'on avait choisi de mesurer la composante de spin selon un autre axe sur la première particule, c'est la composante de spin selon cet autre axe qui constituerait un élément de la réalité physique de la seconde particule. Et pareillement pour un troisième axe, etc.

Le raisonnement qui conduit, dans son principe, aux célèbres inégalités de Bell est alors simple. Puisque, en vertu du raisonnement d'EPR, toute composante de spin doit faire partie de la réalité physique d'une particule, toute composante de spin doit constituer une propriété intrinsèque de la particule. Par conséquent, pour autant que, si l'on mesure la composante A^+ du spin de la première particule selon l'axe A, l'on peut prédire avec certitude que la composante de spin de

la seconde particule selon l'axe A est A^-, il suffit de mesurer la composante de spin de la seconde particule selon un autre axe B choisi au hasard (avec, disons, le résultat B^-), pour pouvoir attribuer à la première particule la propriété (non mesurée, mais déduite du critère de réalité) d'avoir la composante de spin B^+, et donc pour conclure la première particule a simultanément les composantes A^+ et B^+, et la seconde les composantes A^- et B^-. Comme tel, ce raisonnement est imparable, et non susceptible de vérification expérimentale puisque, par définition, le dispositif de mesure sera agencé de manière à ne mesurer que les paires telles que la première particule aura la composante A^+ et la seconde la composante B^-. Si l'on obtenait, par exemple, A^- pour la première particule et B^+ pour la seconde, on compterait la paire comme paire A^-B^+, distincte de la première, et ainsi de suite, pour les paires A^+B^+ et A^-B^- : on pourrait chaque fois en conclure que la première particule a les composantes A^-B^- et la seconde les composantes A^+B^+, et ainsi de suite pour les deux derniers cas.

Le dispositif expérimental possible ne peut être agencé que de manière à enregistrer des paires, par exemple les « paires AB » ou les « paires AC » (si l'on fait tourner l'axe B en C pour la mesure de la composante de spin des secondes particules, on doit s'attendre à compter des paires A^+C^+, A^+C^-, A^-C^+ et A^-C^-). Par suite, on peut toujours mettre expérimentalement en corrélation les moyennes statistiques établies à partir de tels comptages de paires. La trouvaille de Bell fut de montrer que le postulat réaliste, ou l'application stricte du principe de réalité d'Einstein qui considère toute composante de spin d'une particule

comme étant une propriété réelle de la particule, conduit à raisonner dans le cadre d'une statistique classique et à déduire des inégalités entre les nombres de paires effectivement observables par le moyen d'un calcul statistique classique[19], en contradiction avec les corrélations statistiques prévues par la mécanique quantique. La statistique quantique est irréductible à la statistique classique, elle est d'une nature différente. L'ambition de Bell était de montrer qu'il fallait abandonner toute théorie à variables cachées, c'est-à-dire à variables devant avoir un sens physique mais ne pouvait être ni observables ni mesurables. Mais l'on dispose ainsi d'un test expérimentalement réalisable de la mécanique quantique. Il apparaît que les prévisions théoriques de la mécanique quantique sont vérifiées par les mesures — les inégalités de Bell sont violées dans le sens même qui est théoriquement prévu par la mécanique quantique.

Il en résulte que la théorie quantique est plus complète qu'on ne l'imaginait. Le paradoxe devient irréductible non pas en ce que la théorie quantique peut être mise en contradiction avec elle-même, mais au contraire en ce que la réalité quantique ne peut être considérée comme ayant des propriétés indépendantes de la mesure, donc immuables, et par surcroît, semble-t-il, indépendantes *de la mesure effectuée sur un autre système, localement séparé du premier,* situé à distance macroscopique. La violation des inégalités de Bell signifie l'interdépendance des deux systèmes *et des mesures* qui sont effectuées sur eux[20]. D'où l'introduction par Bernard d'Espagnat, dans le cadre d'un réalisme « tempéré » (nous dirions : bien tempéré), du concept de *non-séparabilité* qui,

si l'on reprend les termes d'EPR (« aucune définition raisonnable de la réalité ne peut être envisagée en vue de permettre cela ») est *non raisonnable.*

Il faut admettre que la théorie quantique est complète dans la mesure où, dans des conditions physiques précises, le système peut être envisagé à partir de la représentation de ses états propres, la complétude signifiant la prise en compte de *tous* les états propres du système *dans les conditions* où il est étudié. Le concept d'état d'un système, et en particulier d'état propre, ou de manière plus générale, d'« état de base », devient vraiment le concept fondamental de la théorie, plus sans doute que la fonction mathématique qui est censée le décrire, car c'est là le « réel » avec lequel la théorie travaille effectivement. Que cette clause de complétude ne puisse théoriquement être réalisée — dans la mesure où elle nécessite, à la limite, et en vertu même de la non-séparabilité, l'impossible connaissance de tous les états de base du monde —, cela n'est pas plus dirimant qu'en mécanique classique : la théorie physique d'un système considéré comme isolé du reste du monde est toujours une excellente approximation eu égard à la confrontation expérimentale, c'est-à-dire à ce que l'on entreprend de mesurer. Il n'est pas plus nécessaire d'invoquer la théorie de la relativité générale pour décrire le mouvement d'un corps dans l'espace-temps du laboratoire que d'invoquer la théorie du spin de l'électron pour décrire le spectre optique de l'atome d'hydrogène non soumis dans le laboratoire à l'action d'un champ magnétique (alors qu'existe toujours le champ magnétique terrestre). Certaines interactions, dans des conditions précises,

sont négligeables par rapport à d'autres, et cela n'a jamais été considéré comme marque d'incomplétude. Il s'agit plutôt d'un fait de finitude dû à ce que c'est nous, hommes, qui interrogeons « la nature ». Les moyens qui sont les nôtres ne peuvent être ceux de Dieu. La vision globale de l'univers jusque dans ses plus infimes détails, la vision laplacienne, n'a jamais été qu'une vue de l'esprit, une fiction sans doute nécessaire au physicien, et qui témoigne de la métaphysique dans la physique.

Le concept fondamental de la description quantique est celui d'état, et non de trajectoire dans l'espace-temps [21]. Car toute représentation d'un système dans des conditions physiques spécifiées est complète dans les termes de ses états propres ou de ses états de base. Mais il faut alors concéder que si ces états de base sont représentables logiquement et mathématiquement, et susceptibles d'être « traduits » au moins indirectement par des expériences concrètes, ils ne le sont pas en général, en tout cas par les moyens de la représentation classique, non seulement au sens physique du terme, mais aussi au sens philosophique. Il faut reconnaître qu'une fonction « amplitude de probabilité » est un *irreprésentable*, un *impossible* pour la représentation. Et pareillement pour les états (mathématiquement et logiquement individués, non contradictoires, et identiques à soi), dès lors qu'il s'agit de prendre en compte des états virtuels, pour les transitions quantiques, dont les effets sont seuls, le plus généralement, observables et mesurables, entre états propres ou états de base — elles font chaque fois jouer le concept d'état virtuel. De même pour les opérateurs de la théorie, construits, en somme, pour

les besoins de la cause. Le paradoxe est plutôt qu'avec de tels concepts désignant de l'impossible, la théorie quantique s'est constituée (selon le sens profond du « principe de correspondance » de Bohr) en utilisant la formulation la plus générale de la théorie classique, le formalisme hamiltonien. On peut y voir le caractère hybride de la théorie quantique[21], mais une autre physique est-elle envisageable ?

Nous sommes donc renvoyés à la non-séparabilité, qui fait partie de cet impossible : que deux systèmes ayant interagi dans le passé et localement séparés par des distances macroscopiques (gigantesques par rapport à ce qu'on peut se représenter comme les dimensions d'une interaction microphysique, ou comme les dimensions d'un train d'onde associé à une particule), soient tels que la mesure effectuée sur l'un paraisse agir à distance sur la mesure, devenue expérimentalement possible, effectuée sur l'autre, cela est en effet irreprésentable, bien que ce soit mathématiquement représenté dans la théorie par la fonction d'état globale des deux systèmes. Car il ne s'agit plus seulement de dire qu'à ce compte il peut y avoir au moins deux fonctions d'états différentes pour le même système, ce qui pouvait s'expliquer par la méthode de réduction du paquet d'ondes et par le fait que cette réduction est un processus commun aux deux systèmes, bien qu'elle soit irreprésentable comme processus temporel. Il s'agit de comprendre, non pas la transmission quasi instantanée (non physique), à distance, de l'action sur le système I dans l'effet sur le système II (ce serait revenir au concept non quantique d'un enchaînement univoque de cause à effet),mais le fait que la représentation des états de base du

système I, liée au dispositif expérimental de la mesure effectuée sur lui, est indissociable en réalité de la représentation des états de base du système II. Il y a une corrélation nécessaire, et dont la prédiction est en accord avec l'expérience, entre les nombres d'états de base mesurés du système I et les nombres d'états de base mesurés du système II. Il n'y a pas de mystère pour la représentation *mathématique* de la mécanique quantique. Il y en a bien un cependant pour la représentation *en général.*

C'est le cas de dire que la réalité dépasse la fiction : la réalité qui se manifeste de la manière prévue par une théorie physique, donc aussi mathématique, dépasse la fiction de la représentation. Qu'y a-t-il donc, dans la représentation mathématique, qui échappe à la représentation en général ? Quand le classique[22] disait : « Je me représente un corps », il se représentait quelque chose d'identifiable et de non contradictoire. Quand le théoricien quantiste dit : « Je me représente une particule (ou un champ) », il se représente *quelque chose* (une particule ou un champ n'est pas une pure création de son esprit), mais il ne sait pas *ce qu'*il se représente ; il y a une fondamentale inadéquation entre la représentation et l'« objet » de la représentation. De celui-ci, on ne peut donner que des représentations négatives (une particule est une petite partie de quelque chose d'inconnu mais non un corpuscule ou un petit corps) ou complémentaires (description « corpusculaire » et description « ondulatoire », description en position et description en impulsion, ce que Bohr a généralisé avec l'idée de « complémentarité »). Parce que nous sommes des êtres macroscopiques seulement aptes à des repré-

sentations d'objet macroscopiques ? Mais, dans le cas des expériences recensées par d'Espagnat, nous n'arrivons pas à nous représenter que deux systèmes microscopiques, apparemment séparés, constituent en fait un seul objet macroscopique (pris au sens d'objet de la théorie et de la pratique expérimentale, c'est-à-dire en tant qu'objet transcendantal). Certes, on pourrait dire que cette impossibilité est due à ce que nous nous représentons encore macroscopiquement le microscopique dans le macroscopique (où l'action à distance et hors temps est exclue par la théorie de la relativité), mais il faut alors aller jusqu'au bout, et reconnaître plutôt que le microscopique a dans le macroscopique des effets macroscopiques inexplicables par la représentation physique du macroscopique, ou plutôt, plus rigoureusement, que les objets représentés tout d'abord comme microscopiques constituent un seul objet qui peut prendre des dimensions macroscopiques, qu'un système quantique n'est donc pas *a priori* microscopique.

La non-séparabilité exige de considérer qu'il existe des systèmes quantiques simples aux dimensions macroscopiques, et qui échappent au mode de représentation de la physique classique tout comme à la représentation en général : c'est *comme si,* dans les expériences de non-séparabilité, chacun des deux systèmes avait le don d'ubiquité. Il n'y a plus d'espoir[28] qu'un regard divin quelconque puisse « voir » en pénétrant dans les entrailles du microscopique. Le Dieu leibnizien est mis hors jeu, en admettant même qu'il calcule les possibles : le réel n'est plus l'actualisation du possible en tant qu'il en constitue l'altération

irréversible et radicalement contingente, qui lui fait pour ainsi dire « effacer » ou « oublier » ses conditions antérieures. Avec la théorie quantique, nous nous trouvons confrontés à une théorie physique mathématique transcendantale, qui a réussi à intégrer dans son appareil les conditions *a priori* de sa possibilité[29]. Qu'en ce sens, elle ouvre à l'irreprésentable, cela devient compréhensible, puisque les conditions de possibilité *a priori* des objets de l'expérience ne peuvent elles-mêmes être des objets de l'expérience, tout comme le fait que l'objet physique auquel elle a affaire est un objet réel, mais au sens transcendantal d'objet transcendantal = X, et non au sens de chose en soi, qui serait représentable en l'absence des moyens de sa manifestation. A ce titre, à moins de constructions logiques qui ne font que reculer le problème, il n'y a pas d'ontologie coextensive ou corrélative de la théorie quantique. Si la violation systématique des inégalités de Bell montre l'impossibilité d'attribuer à un système quantique des propriétés permanentes, ce n'est pas que le « réel » demeure « caché » ou « voilé », mais c'est au contraire qu'il n'a de sens physique qu'à être pris dans l'ordre du *phénomène,* en lequel sont inclus, non pas les observateurs en tant que contemplateurs, mais les appareils expérimentaux d'observation et de mesure. Il appartient *au phénomène* d'être vu ou non vu, c'est-à-dire, ici, enregistré ou pas. Il faut donc concevoir enfin le phénomène, au sens physique mais aussi philosophique, comme manifestation *de monde* et d'être-au-monde ; *ce* qui se manifeste ne se manifeste que selon les moyens envisagés pour *le* faire activement se manifester, en sachant qu'*il* se perd ou

s'épuise dans cette manifestation qui en modifie l'état de manière irréversible, et en sachant qu'il est des manifestations *a priori* incompatibles.

MARC RICHIR

NOTES

1. Il a été exposé sous forme très concise par ces trois auteurs en 1935, in *Physical Review, 47*, pp. 777-780, dans un article intitulé : « Can Quantum - Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ? »
2. Cf. E. Husserl, *Die Krisis der europäischen Wissenschaften...*, Nijhoff, Husserliania, Bd. VI, 2. Auflage, La Haye, 1962, 1re et 2e parties, et M. Heidegger, *Die Frage nach dem Ding* (« Qu'est-ce qu'une chose »), Niemeyer, Tübingen, 1962, pp. 49-86 (trad. fr., par J. Reboul et J. Taminiaux, Paris, Gallimard, 1971, pp. 76-121).
3. Cf. Les travaux récents de B. d'Espagnat, et en particulier « Théorie quantique et réalité », in *Pour la science* (éd. française de *Scientific American*), n° 27, janvier 1980, pp. 72-87. Nous y viendrons.
4. Cf. C. Castoriadis, « Science moderne et interrogation philosophique », in *Les Carrefours du labyrinthe*, Seuil, Coll. « Esprit », Paris, 1978, pp. 147-217.
5. Cf. Heidegger, *op. cit.*
6. N. Bohr, *Physical Review, 48*, pp. 696-702. Alors que l'article d'EPR a été publié en mai 1935, celui de Bohr l'a été en octobre de la même année, et intitulé, significativement, dans les mêmes termes.
7. Cf. B. d'Espagnat, *art. cit.*
8. Remarquons que de Broglie est revenu à sa conception première, après l'avoir abandonnée durant presque trente ans. Cf. *Jalons pour une nouvelle microphysique*, Paris, Gauthier-Villars, 1978.
9. Pour mémoire : le nombre complexe le plus simple, i, est tel que son carré est égal à — 1. Les nombres complexes sont pour ainsi dire des nombres couplés ou à deux « dimensions » (en général : a + ib).
10. Cf. N. Bohr, *art. cit.* Voir aussi la passionnante discussion avec Einstein, traduite en français dans *Physique atomique et connaissance humaine*, Gauthier-Villars, Paris, 1972, pp. 47-99. On consultera également l'ouvrage, difficile pour un non-physicien, de W. Heisenberg, *Les Principes physiques de la théorie des quanta*, Paris, Gauthier-Villars, 1972, pp. 46-48 (ce passage est d'une importance capitale).
11. *Naturwissenschaften, 23*, p. 787, 823, 844. Repris par L. de Broglie in *Jalons pour une nouvelle microphysique, op. cit.*, pp. 169-170.

12. Une démonstration remarquable et simple de cette impossibilité est donnée par R. Feynman dans *La Nature de la physique*, Seuil, Coll. « Points-Sciences », Paris, 1980, pp. 151-176.
13. L. de Broglie, *op. cit.*, en particulier pp. 16-17, 21-24, 164-180.
14. Un phénomène quantique est, en ce sens, un *phénomène de monde* (au sens quasi heideggérien du concept de monde), tout comme la théorie quantique devrait être, en droit, une théorie de monde (cf. R. Feynman, *Cours de mécanique quantique*, §§ 8-1, 8-2, 8-3), et une théorie *principiellement* marquée par la « *finitude* » du *Dasein* humain, dans la mesure où elle est principiellement affectée d'équivoque, quant à ce qu'elle se représente comme le réel hors d'elle (les « x » avec lesquels elle travaille en tant que théorie, les indéterminations irréductibles qu'il y a dans ses interventions sur la nature, les mesures, qui doivent pourtant l'assurer de sa validité). Cela permet de rejeter comme relevant d'un idéalisme « vulgaire » les interprétations de la théorie selon lesquelles la « conscience » de l'observateur (qui peut regarder ou ne pas regarder un appareil de mesure) jouerait un rôle capital pour la constitution de l'état d'un système. C'est là une manière de disloquer le phénomène quantique dans son unité, disjoindre l'état du système de la *connaissance* de cet état par l'*enregistrement* du résultat de la mesure (qu'il faut distinguer de la « préparation »). A cet égard, il est faux de dire, tout simplement que la fonction d'état d'un système « contient » l'information (ou la connaissance) que nous pouvons avoir de ce système. Car en général, cette fonction d'état est un être mathématique qui *ne* « contient » *potentiellement* l'information que nous pouvons avoir d'un système *que* si les *conditions physiques* précises dans lequel se trouve ce système sont effectivement spécifiées (par exemple : présence d'un champ de telle ou telle symétrie, en général, définition d'éléments d'interaction qui préparent le système à livrer telles ou telles mesures, c'est-à-dire tels ou tels états propres, avec leurs probabilités d'occurrence). Qu'un expérimentateur dispose un appareil et omette de mesurer (ou de regarder le résultat de la mesure), cela signifie qu'il fait la moitié du chemin, qu'il est distrait de son projet de monde. A ce compte, le monde n'existerait que quand nous le regardons.
15. Dont une expression paradoxale, très claire, est donnée par L. de Broglie (pour en souligner le caractère insatisfaisant) : « Un phénomène ne peut pas dépendre d'autres phénomènes qui étaient possibles, mais qui ne se sont pas produits. » (*Jalons, op. cit.*, p. 17). Le concept d'états virtuels est couramment utilisé en théorie quantique, pour rendre compte de la largeur naturelle des raies spectrales, et en théorie quantique des champs (pour l'électrodynamique quantique, cf. les diagrammes de Feynman, devenus célèbres), qui sans lui, serait tout simplement impossible (cf. par ex. Feynman, *Cours de mécanique quantique*, § 10-2). Ce concept a été repris significativement par Prigogine et ses collaborateurs, dans la théorie de l'irréversibilité, sous la forme du fort intéressant concept d'*hypnon*.
16. Une ébauche en est proposée par I. Prigogine et I. Stengers, dans *La Nouvelle Alliance*, pp. 260-264. Nous ne pouvons manquer d'être frappé par le parallèle possible entre ces idées

et les récentes conceptions de L. de Broglie sur la « thermodynamique cachée » des particules et le « milieu subquantique » (cf. *op. cit.*, en particulier pp. 51-61).

17. Il est remarquable que L. de Broglie soit obligé de réintroduire ce concept sous le nom d'« état précurseur » (*op. cit.*, pp. 124-129).

18. Ce dernier cas est traité par R. Feynman dans son cours de mécanique quantique (*op. cit.*, § 18-3), et discuté sous l'angle du paradoxe EPR. Le lecteur intéressé pourra donc utilement s'y reporter s'il veut étudier la manière dont la mécanique quantique traite le problème.

19. Le détail du *principe* de cette déduction est donné par B. d'Espagnat, *art. cit.*

20. Ce qui ruine les espoirs de L. de Broglie.

21. Cf. I. Prigogine et I. Stengers, *op. cit.*, pp. 233-238.

22. Galilée, en 1638, dans les *Discorsi* (cf. Heidegger, *op. cit.*, p. 70, trad. fr., pp. 101-102).

23. A moins d'introduire une théorie à variables cachées non locales ou non séparables.

24. Ce mouvement de la théorie d'intégrer en elle-même, c'est-à-dire dans son langage (logico-mathématique), ses propres conditions de possibilité, est propre tant à la physique (c'est aussi le cas en théorie de la relativité) qu'aux mathématiques (que l'on pense aux théories de limitation de Gödel et de Löwenheim-Skolem). C'est par là aussi que la philosophie (et non pas seulement la « métaphysique » au sens heideggerien) est passée *explicitement* dans les sciences.