

Une interprétation locale du paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen

E. BITSAKIS

Département de Philosophie, Université de Jannina

Département de Physique, Université d'Athènes

RESUME. On sait que la physique avant Maxwell était déterministe et non locale. La théorie de Maxwell, sa version relativiste, ainsi que la théorie de la gravitation d'Einstein, sont des théories déterministes et locales. De l'autre côté, la non-localité de la mécanique quantique non-relativiste, a été considérée plutôt comme une nécessité du formalisme que comme un fait physique. Pourtant l'interprétation de la mesure par Bohr, présupposait déjà une non-séparabilité, donc une non-localité intrinsèque. Selon cette ligne de pensée, la violation expérimentale des inégalités de Bell a été considérée comme une preuve de non-localité. Le présent texte constitue un essai d'interprétation déterministe et locale du paradoxe EPR, donc de la mécanique quantique, fondé sur une dialectique concrète entre le potentiel et le réel. Dans le cadre de cette interprétation, la violation des inégalités de Bell est considérée inévitable et, en plus, comme une preuve de localité.

ABSTRACT. *Physics before Maxwell was deterministic and non-local. Maxwell's theory, its relativistic version as well the relativistic theory of gravitation are local and deterministic. The non-locality of the non relativistic quantum mechanics, on the other hand, was considered rather a necessity of the formalism than a physical fact. Yet, the interpretation of measurement by N. Bohr, presupposed a kind of non-separability and, consequently, an intrinsic non-locality. According to this current of thought, the experimental violation of the Bell inequalities has been interpreted as a proof of non-locality. The present paper constitutes an attempt of deterministic and local interpretation of the E.P.R. paradox and, by this way, of quantum mechanics, on the base of a concrete dialectics between the potential and the actual. In the frame of this interpretation, the violation of the Bell inequalities is considered as inevitable and, moreover, as a proof of locality.*

Les théories avant Maxwell (électrostatique, électrodynamique, magnétisme, théorie de la gravitation de Newton) étaient déterministes et *non locales*. La *localité* s'installa dans la physique avec la théorie de Maxwell. Les théories relativistes (électromagnétisme et théorie de la gravitation d'Einstein) sont déterministes et *locales*. Or, avec la formulation de la mécanique quantique on a d'abord contesté la validité du principe de la causalité. Par la suite, une des conséquences de la recherche d'une description plus complète de la réalité était la mise en doute de la validité de la localité et de la séparabilité.

La causalité a donc été la première "victime" de la mécanique quantique dans les années trente. La localité et la séparabilité ont été par la suite contestées par Bohr, dans sa réponse à Einstein (1935). Pourtant, malgré la "victoire" du chef de l'Ecole de Copenhague, la localité avait une assise solide dans les théories relativistes. Or, après la violation des inégalités de Bell et malgré la désintégration de l'Ecole positiviste, la localité paraît être –ainsi que nous l'avons noté– en situation difficile. La non-séparabilité et la non-localité paraissent inscrites dans les faits, et beaucoup de physiciens pensent qu'il serait possible de concilier le réalisme et la causalité avec la non-séparabilité et la non-localité. Pourtant, un autre courant de physiciens cherche à trouver une issue dans la crise actuelle, avec la formulation de modèles déterministes et locaux. Certains de ces modèles insistent sur la validité des inégalités de Bell ; d'autres considèrent la violation de ces inégalités comme une donnée et cherchent à concilier la mécanique quantique avec la localité. Ainsi, la question : *est-il possible de sauver la causalité et la localité en microphysique*, se trouve au coeur du débat sur les fondements de la mécanique quantique.

1. Le paradoxe EPR

Le paradoxe Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) a été le point de départ du débat actuel sur la localité et de la causalité en microphysique.

L'argumentation de EPR, selon laquelle la mécanique quantique n'est pas une théorie complète, est fondée sur deux principes :

- a. Le principe *réaliste*, selon lequel il y a une réalité objective, indépendante de l'observateur.
- b. Le principe concernant la *localité* des interactions physiques, dont la vitesse finie implique la séparabilité effective de deux systèmes séparés par un intervalle du genre espace.

Einstein et ses collaborateurs ont défini aussi une *condition de complétude* pour une théorie physique. Selon EPR, pour qu'une théorie soit complète, "chaque élément de la réalité physique doit avoir une contre-partie dans la théorie physique".

Einstein a insisté sur le fait que l'on peut extrapoler le principe réaliste au niveau microphysique. Selon lui, il y a quelque chose comme un "état réel" d'un système physique, qui existe objectivement, indépendamment de toute observation [1]. Ainsi, les systèmes microphysiques sont caractérisés par un nombre d'*éléments de réalité* accessibles à la mesure : "Si, sans perturber d'aucune façon que ce soit un système, nous pouvons prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une quantité physique, alors il y a un élément de réalité physique qui correspond à cette quantité physique" [2]. Nous discuterons plus loin les limites de ce critère de réalité.

De l'autre côté, le principe de localité et son implication, la *séparabilité physique*, amènent à la conclusion qu'une mesure sur un système quantique A ne peut pas affecter le système B , si les deux systèmes sont séparés par un intervalle du genre espace. Ainsi, un élément de réalité de B ne peut pas être créé par une mesure sur A . La localité des interactions implique d'ailleurs la conclusion qu'un élément de réalité de A ne peut pas être créé par une expérience future (rejet de la causalité rétrograde).

Nous présenterons maintenant l'aspect principal de l'expérience EPR, telle qu'elle a été illustrée par Bohm et Aharonov [3].

Considérons un système physique de spin total égal à zéro, constitué par deux particules de spin $1/2$. Les deux particules ont interagi pendant un certain temps Δt . Elles sont par la suite séparées par une méthode qui conserve le spin total. Quand les deux particules sont suffisamment éloignées l'une par rapport à l'autre, pour qu'elles n'interagissent plus, nous mesurons, par exemple, la composante de A selon un certain axe. Si nous trouvons la valeur $\pm 1/2$ nous pouvons prévoir avec certitude que la composante correspondante de B est égale à $\mp 1/2$, sans qu'aucune mesure soit faite sur elle, et *vice-versa*.

Si le système envisagé était classique, il n'y aurait pas de problème, car toutes les composantes du spin de chacune des particules auraient à chaque instant une valeur définie. Or, la mécanique quantique prévoit les résultats précédents, mais elle ne peut pas les expliquer. Comment donc expliquer ce fait ?

On suppose, écrivent EPR, que l'état est complètement caractérisé par la fonction d'onde du système. Or, en analysant l'incompatibilité des variables conjuguées, les auteurs sont arrivés à la conclusion suivante : ou (1) la description quanto-mécanique donnée par la fonction d'onde n'est pas complète, ou (2) quand les opérateurs qui correspondent aux deux quantités ne commutent pas, les deux quantités ne peuvent pas avoir une réalité simultanée. Si, en effet, toutes les deux avaient une réalité simultanée, donc des valeurs précises, ces valeurs devraient entrer dans la description complète, selon la condition de complétude posée. Ainsi, accepter l'hypothèse de complétude, en même temps que le critère de réalité donné auparavant, conduit à une contradiction.

Selon la conclusion de EPR la description quanto-mécanique donnée par la fonction d'onde n'est pas complète. Cette conclusion présuppose la localité et la séparabilité. Dans sa réfutation de l'argument EPR, Niels Bohr, au contraire, postula la *complétude* de la description quanto-mécanique et rejeta l'existence du paradoxe [4]. Pourtant, pour sauver la mécanique quantique, il fut obligé de postuler la *non-séparabilité* des deux systèmes A et B , ainsi que de l'appareil, même si les deux systèmes sont séparés par un intervalle du genre espace. Si l'on accepte la non-séparabilité, la difficulté disparaît. Mais alors se pose la question : *Comment, par quelles interactions, est assurée cette non-séparabilité ?* Pour N. Bohr la question n'a pas de sens et le chef de l'Ecole positiviste n'y a jamais donné de réponse. Pourtant la question est tout à fait légitime et la seule réponse, c'est de postuler l'existence d'interactions à vitesse infinie qui assurent sans retard temporel la détermination mutuelle de A et B . Pourtant ces interactions ne sont pas seulement *ad hoc* et inconnues. Elles violent, en plus, le principe de la relativité et sont en dehors de l'horizon de la physique actuelle. C'est le point faible de l'argumentation de Bohr ; et pourtant le principe de non-séparabilité constitua le noyau de l'interprétation de Copenhague toute entière.

Or, après Maxwell et la relativité, il serait difficile d'accepter une action à distance. Par conséquent, la recherche d'une explication causale et locale a été considérée par beaucoup de physiciens et d'épistémologues, comme la seule conforme à la physique actuelle.

Ainsi, il paraît tout à fait plausible de chercher la cause de la corrélation du spin des particules A et B dans le fait que ces particules ont interagi dans le passé. A cause de cette interaction, nous pouvons accepter que les éléments de réalité respectifs ont été corrélés. Selon une expression de Schrödinger, à cause de l'interaction les deux fonctions d'onde

ont été enchevêtrées (*entangled*) [5]. Ainsi, chaque particule possède une certaine “information” au moment de leur séparation, information accumulée pendant le temps Δt . Aussi, nous avons le droit d’accepter que cette “information” est conservée pendant l’évolution non dissipative et déterministe des particules vers les deux appareils de mesure. Par conséquent, la possibilité de prévoir la valeur du spin d’une composante de B , sur la base de la connaissance de la valeur de la composante correspondante de A , ne présente pas de mystère. La non-séparabilité, au contraire, présente deux lacunes : un mécanisme qui expliquerait le processus de perte de l’information accumulée pendant le temps Δt lui fait défaut, ainsi qu’un deuxième mécanisme qui expliquerait les corrélations entre A et B créées pendant la mesure sur A . La “théorie” de Bohr reste muette devant ces deux problèmes.

L’interprétation précédente présuppose la localité et la causalité, donc deux principes fondamentaux des théories relativistes. Cette interprétation paraît donc tout à fait plausible. En plus, elle évite les interactions inconnues qui sont nécessaires pour la non-séparabilité. De telles interactions, si elles étaient prises au sérieux impliqueraient :

- a. La corrélation de tout couple de systèmes physiques, aussi éloignés qu’ils soient.
- b. L’impossibilité de mesurer n’importe quel système “en soi”, sans qu’il soit perturbé par ces fantômes de Niels Bohr.

Pourtant, notre argumentation, conforme à celle de EPR a, elle aussi, son point faible. En effet, elle présuppose implicitement que les composantes du spin des deux particules aient des valeurs précises avant la mesure –elle présuppose donc l’existence d’états *réels et pas simplement potentiels*. Or, au moins, dans le cas du spin, nous pouvons accepter que les éléments corrélés constituent un état qui possède la possibilité de *réaliser* la valeur du spin enregistrée par l’appareil Stern-Gerlach. La mécanique quantique ne dit rien, ni sur le “stockage” d’information corrélée, ni sur la conservation de cette information pendant que les deux particules se dirigent vers les appareils de mesure, ni sur le processus de réalisation des états corrélés *via* l’interaction avec l’appareil de mesure. Ainsi, nous pouvons postuler la non-complétude de la description quanto-mécanique. Mais en même temps nous sommes obligés de reconnaître que le critère de réalité EPR n’est pas assez général car, à cause de la condition de non-perturbation qu’il présuppose, il ne concerne que des éléments de réalité –et des états– réels. Le jeu potentiel-réel échappe à ce critère “classique”.

2. Le caractère restreint du critère EPR de réalité physique

Le critère EPR de réalité physique est fondé sur un présupposé : la non *perturbation* du système par l'appareil de mesure. Acceptons donc qu'il y a des mesures qui ne perturbent pas le système —ou, au moins, l'observable à mesurer (mesures idéales). Dans ce cas là, le critère EPR ne concerne que des états réels et des éléments de réalité pré-existants à la mesure. C'est donc un critère *classique*, au moins de ce point de vue. Dans ce cas là, nous sommes obligés de supposer que les composantes du spin des particules *A* et *B* étaient en acte *avant* la mesure. *Mais alors, le problème posé par EPR devient trivial.* (Il est pourtant évident que même dans ce cas là, le problème des corrélations établies pendant l'interaction des particules reste ouvert et qu'il constitue une indication essentielle de l'incomplétude de la description quanto-mécanique).

Il paraît que EPR avaient conscience du caractère restreint de leur critère. Ainsi ils écrivaient : “Il nous paraît que ce critère, bien qu'il soit loin d'épuiser toutes les manières possibles de reconnaître une réalité physique, nous fournit au moins une telle manière, chaque fois que les conditions posées sont satisfaites. Considéré non pas comme nécessaire, mais simplement comme suffisant, ce critère est d'accord avec les idées classiques ainsi qu'avec les idées quantiques sur la réalité” [6].

Dans le cas classique, en effet, il n'y a pas de problème ; dans ce cas, le critère est “trivially true” (F. Selleri) [7]. Pourtant, notre question n'est pas là. Car la vraie question est :

- a. Si nous connaissons des situations quanto-mécaniques pour lesquelles ce critère “classique” serait valable, et
- b. Si ce critère épuise tous les cas possibles en mécanique quantique.

La réponse à la première question est positive. Ainsi, disent EPR, dans le cas d'une particule libre, l'impulsion est un élément de réalité selon leur définition. D'une manière plus générale, nous pouvons affirmer que les positions et les impulsions des particules individuelles sont en acte avant la mesure.

Les précédents sont pourtant des cas spéciaux et controversés et de toute façon ne donnent pas une réponse de validité générale. Ainsi, dans le cas des particules *A* et *B*, la valeur du spin présente des fluctuations aléatoires avant l'interaction avec l'appareil Stern-Gerlach. Par conséquent, la question de la valeur avant la mesure n'a pas de sens. La composante donnée du spin est “fixée” (actualisée) pendant l'interaction avec l'appareil. Nous pouvons ainsi supposer que les valeurs opposées des

particules A et B n'étaient pas en acte avant la mesure. Elles étaient de simples potentialités. Ainsi quand la particule A réalise la valeur $+1/2$, la particule B ne réalise pas automatiquement la valeur opposée : *Elle a simplement la possibilité de réaliser cette valeur si l'on fait une mesure convenable*. D'une manière analogue, nous pouvons affirmer que les photons émis dans des expériences de type EPR n'ont pas de polarisation définie et que la polarisation est actualisée pendant l'interaction avec l'appareil (la polarisation est une propriété potentielle dans ce cas).

En mécanique quantique on n'a pas exclusivement des états réels et des mesures idéales. Le cas le plus intéressant est celui d'un état potentiel qui devient en acte pendant la mesure, par la transformation d'éléments de réalité pré-existants. C'est exactement le cas de l'expérience EPR. Ainsi, si nous acceptons que les valeurs des composantes du spin sont caractérisées par une distribution aléatoire avant la mesure, nous sommes obligés de chercher une explication des corrélations EPR dans un cadre plus général, non classique, qui inclut les relations génétiques entre le potentiel et le réel.

La distinction entre le potentiel et le réel paraît essentielle et une bonne partie de la confusion concernant l'expérience EPR provient du manque de compréhension de cette distinction. Nous donnerons ici un exemple qui, entre autres, rend plus clair le caractère classique du critère EPR. Ainsi EPR affirment : "Nous voyons, donc que, à cause de deux mesures différentes effectuées sur le premier système, le deuxième est laissé dans des états avec deux fonctions d'onde différentes". Pourtant, si nous acceptons les définitions de la localité et de la séparabilité données par les mêmes auteurs, nous arrivons à la conclusion que la particule B *n'est pas laissée* dans deux états différents à cause des deux différentes mesures sur A . La particule B possède tout simplement la *possibilité* de réaliser deux états différents dans une correspondance biunivoque avec les états réalisés par A . Cette possibilité est due au fait que les éléments de réalité de A et B sont corrélés à cause de leur préhistoire commune. Dans ce cas il n'y a pas de paradoxe. Il y a un vide de connaissance relativement aux processus qui établissent les corrélations entre A et B . Ainsi la description quanto-mécanique n'est pas complète, et la résolution du "paradoxe" EPR doit être cherchée dans ce qui se passe au moment de l'interaction des particules A et B .

Dans le même esprit, EPR affirment qu'il est possible d'attribuer deux fonctions d'onde différentes à la même réalité, c'est-à-dire au deuxième système après l'interaction avec le premier. Pourtant il n'y

a pas ici de mystère : les deux différents vecteurs d'état du système B correspondent à deux *possibilités* différentes qui seraient actualisées si l'on faisait deux mesures appropriées sur lui (ces deux potentialités étaient établies au moment de l'interaction des deux systèmes). Dans ce cas là aussi, les deux vecteurs d'état sont les mesures des deux potentialités du système sous des conditions différentes.

En conclusion : le critère EPR de réalité physique n'est pas adéquat pour le cas des particules EPR, car dans ce cas les éléments de réalité sont potentiels, et non pas réels. Il nous faudrait donc un critère de réalité plus général pour rendre compte de situations pareilles à celle des particules EPR.

3. Etats potentiels et états réels en mécanique quantique

Ainsi, pour donner une explication locale et déterministe au “paradoxe” EPR, nous sommes obligés de faire la distinction entre les propriétés –et les états–réels et les propriétés –et les états– potentiels. Mais pour cela il nous faut quelques définitions strictes.

Une propriété *réelle* existe avant la mesure –elle n'est pas créée pendant l'interaction du système avec l'appareil. La mesure, dans ce cas, ne perturbe pas l'observable –l'élément de réalité mesuré. (La mesure perturbe d'autres observables, car il y a toujours une interaction entre S et A qui déclenche le processus de la mesure). On appelle de telles mesures, idéales.

Pourtant, sur la base de quel critère nous avons le droit d'affirmer qu'une mesure est idéale ? Pour certains, une probabilité de prévision égale à 1 est une condition suffisante pour qu'une mesure soit idéale, donc, pour que la propriété en question soit réelle. Or, cette condition est nécessaire, mais pas du tout suffisante. Car il est possible que le seul état enregistré soit créé à cause de l'interaction avec l'appareil. Aussi, dire qu'une mesure est idéale et que la propriété mesurée était réelle avant la mesure, si une deuxième mesure immédiatement après la première donne le même résultat, n'est pas un argument suffisant, car il est possible que la propriété soit créée pendant la première mesure.

Une définition de C. Piron paraît donner un critère pour qu'une mesure soit caractérisée comme idéale : “Une question β est idéale, si une proposition a compatible avec la proposition b définie par β et qui était vraie auparavant, continue à être vraie après la mesure, quand la réponse du système est “oui” [8]. A l'aide de ce critère, nous pouvons

affirmer que la valeur de l'observable était réelle avant la mesure, donc que le système était déjà dans un état propre. Exemple : l'impulsion d'une particule libre possède avec une probabilité égale à 1 la valeur P_0 et cette valeur est actuelle avant la mesure. En conséquence cette mesure est idéale et l'espace de Hilbert unidimensionnel est un espace réel, non potentiel.

Pourtant, le précédent n'est pas le cas des particules EPR. Dans ce cas les éléments de réalité sont créés par la mesure. Par conséquent la mesure perturbe le système, réalisant ainsi une propriété qui n'était que potentielle. C'est le cas d'une mesure de *première espèce*. Dans ce cas, nous avons deux possibilités :

- a. L'état est créé avec une probabilité égale à 1. C'est le cas d'un état pur au sens étroit du terme (sharp state). Dans ce cas là le système possède une seule potentialité ; son espace de Hilbert unidimensionnel est un espace potentiel, mesure de l'unique potentialité du système.
- b. Un état pur dans le sens général du terme (superposition d'états) est transformé par la mesure en un mélange. Les états dans ce cas aussi ne pré-existent de la mesure. Ils sont créés à cause de l'interaction $S + A$ en tant que réalisation des potentialités de l'ensemble statistique sous les conditions données. Dans ce cas aussi l'espace de Hilbert multidimensionnel est un espace potentiel. La création des états est un processus non linéaire, irréversible et dissipatif, qui n'est pas décrit par le formalisme actuel de la mécanique quantique. C'est la fameuse "réduction du paquet d'ondes" qui marque l'impasse de l'interprétation de l'Ecole de Copenhague. Cette interprétation, qui est en contradiction avec l'interprétation statistique de Max Born, accepte implicitement que la fonction d'onde concerne non pas un ensemble statistique, mais le système individuel. Elle est une "single system interpretation". Ainsi dans le cas d'une "superposition" l'interprétation orthodoxe accepte tacitement ou bien ouvertement que les états pré-existent, qu'ils sont "réduits" ou "analysés" par l'appareil. Selon l'interprétation que nous esquissons ici, au contraire, la "réduction du paquet d'ondes", ou "la projection du vecteur d'état" etc., est en réalité une *transformation* du système quantique qui réalise une de ses potentialités.

Le cas des particules A et B , contrairement à ce que croyaient EPR, présuppose une mesure de première espèce, car les éléments de réalité sont créés par la mesure. Il nous faut donc généraliser le critère EPR,

pour donner une explication locale et déterministe du “paradoxe” et, éventuellement, de la violation des inégalités de Bell.

4. Deux généralisations du critère EPR de réalité physique

Ainsi que nous l’avons noté, le critère EPR implique que les éléments de réalité –dans le cas des particules A et B , les valeurs des composantes du spin– soient réels avant la mesure. La première généralisation du critère EPR, qui introduit la notion de l’état potentiel, concerne le cas que nous discutons, c’est-à-dire le cas de réalisation d’un seul état propre.

Première généralisation. Définition. Si, pendant une mesure de première espèce, nous pouvons prévoir avec certitude la création d’un élément de réalité π , qui est caractéristique de l’état ψ , alors il y a un ou plusieurs éléments de réalité $\{\lambda_i\}$, qui définissent un état $\{\psi_0\}$, ayant la possibilité d’actualiser l’état Ψ *via* l’interaction du système avec l’appareil de mesure.

Exemples : 1. Photons qui traversent un polarisateur et qui réalisent un certain état de polarisation avec une probabilité égale à l’unité. 2. Particules qui traversent un appareil Stern-Gerlach et qui réalisent tous le même état de spin.

Cette première généralisation concerne par conséquent les états purs du sens étroit du terme (sharp states), c’est-à-dire des états qui possèdent, dans les conditions données, une seule potentialité (qui réalisent un espace de Hilbert unidimensionnel).

Mais le cas précédent n’est pas le seul possible. Ainsi nous proposerons une deuxième généralisation pour le cas d’une “superposition”, c’est-à-dire d’un espace potentiel multidimensionnel.

Deuxième généralisation. Définition. Si, pendant une mesure de première espèce, nous pouvons prévoir avec une probabilité P_i , la réalisation d’un état Ψ_i , caractérisé par un élément de réalité π_i , alors nous pouvons affirmer que cet élément a été réalisé pendant la mesure, par la transformation d’un ou de plusieurs éléments de réalité $\{\lambda_i\}$, qui définissent un état Ψ_{0i} capable de réaliser l’état Ψ_i sous les conditions données. Dans ce cas, nous avons plusieurs ensembles d’éléments $\{\lambda_i\}$ qui réalisent des états différents Ψ_i avec des probabilités respectives P_i .

Dans ce cas aussi, il y a passage du potentiel au réel : il y a des éléments de réalité qui disparaissent et d’autres qui passent de la potentialité à la réalité. Les probabilités qui se réalisent sont déterminées,

non seulement par les propriétés du système, mais aussi par celles de l'appareil : du jeu des variables internes du système et des conditions.

Exemple : La soi-disante superposition d'états : $\Psi = \sum_i c_i \Psi_i$, est une expression quantitative des potentialités de l'ensemble pur. Cet ensemble est transformé en mélange *via* une transformation irréversible et dissipative qui actualise les états potentiels Ψ_i [9].

Si l'on considère ainsi la soi-disante "réduction du paquet d'ondes", alors il serait possible d'envisager, comme nous l'avons déjà noté, l'existence de *théories à variables cachées probabilistes*, selon une idée de F. Selleri et G. Tarozzi [10]. Car, une théorie à variables cachées ne doit pas être obligatoirement de caractère déterministe au sens dynamique du terme. Le déterminisme statistique quantique [11] est une forme de détermination plus générale qui n'est pas incompatible avec l'existence de théories à variables cachées probabilistes.

La dialectique entre le potentiel et le réel et la généralisation du critère EPR de réalité physique pour le cas d'éléments potentiels, nous permet de comprendre de façon réaliste un certain nombre de problèmes concernant la transformation des systèmes quantiques.

Prenons de nouveau le cas des particules EPR. Si les valeurs des composantes du spin des particules étaient réelles avant la mesure, il serait en principe possible de décrire une évolution des vecteurs d'état, non dissipative et déterministe, sans perte de l'"information" corrélée qui a été "stockée" pendant la création commune des particules. Pourtant, les valeurs des composantes du spin ne sont pas réelles. D'où la double confusion : Si l'on considère les composantes du spin comme réelles, alors l'argument EPR devient trivial. Si on les considère comme potentielles, alors –disent certains– la réalisation par la particule *A* d'une certaine valeur, signifie que la particule *B* réalise automatiquement la valeur opposée, d'où l'aporie naïve : comment la particule *B* *sait* ce qui se passe dans la région de la particule *A* ? Et comment elle réalise une valeur définie du spin, si rien n'agit sur elle ? C'est peut-être à cause de la *télépathie*, dont Schrödinger parlait avec son ironie habituelle !

De l'autre côté, quelle est la signification physique de vecteur d'état qui décrit le cas des particules EPR, c'est-à-dire de la formule

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |u_+\rangle |v_-\rangle - |u_-\rangle |v_+\rangle \} \quad (1)$$

Selon un certain point de vue, (1) représente l'état du système *avant* la séparation des *A* et *B*. Pourtant, pendant le temps Δt , les particules

interagissent et leurs vecteurs d'état ne sont pas factorisables. Ainsi (1) ne représente pas l'état avant la séparation.

Selon un deuxième point de vue (1) représente l'état *après* la séparation des particules. Or, cette interprétation n'est pas correcte, car après la séparation, l'état constitue un mélange, tandis que (1) représente un état pur (superposition).

Les interprétations contradictoires de (1) ci-dessus, résultent du fait que la mesure n'est pas comprise en tant que processus de passage du potentiel au réel. Or, dans le cadre de l'interprétation que nous esquissons ici, la formule (1) est l'expression quantitative, *la mesure*, des potentialités du couple des particules EPR sous les conditions expérimentales données.

Aussi, dans le cadre de la généralisation du critère EPR de réalité, il serait possible de donner une interprétation réaliste du principe de la superposition, aussi bien dans le cas classique que dans le cas de la mécanique quantique.

5. Les inégalités de Bell

Ainsi que nous l'avons déjà noté, théories à paramètres cachés non locales telles que la théorie de Bohm, reproduisent les prévisions de la mécanique quantique actuelle. Ce fait a été considéré comme un argument fort contre l'hypothèse des variables cachées. Il est vrai que depuis 1952, plusieurs modèles à variables cachées ont été formulés (Bohm-Vigier, Bohm-Aharonov, etc.). Pourtant, aucun de ces modèles n'a donné une preuve tangible de l'existence des variables cachées. Aussi, ces dernières années, B. Hiley et ses collaborateurs, Y. Murayama et d'autres, ont étudié, au moyen de la simulation, le mouvement du "paquet d'ondes", c'est-à-dire de la particule quantique, sous l'influence du *potentiel quantique*, en tant que mouvement déterministe dans l'espace-temps. Pourtant le pas décisif a été franchi par J.S. Bell en 1964.

Selon Einstein, une théorie à paramètres cachés devait restaurer non seulement le déterminisme dynamique mais aussi la *localité*. La théorie de Bohm avait le désavantage de n'être pas locale et de reproduire (pour cette raison) les prévisions statistiques de la mécanique quantique. Or, J.S. Bell démontre qu'une théorie à variables cachées, locale et déterministe, serait incompatible, sous certaines conditions, avec les prévisions de la mécanique quantique. Dans ce cas là les variables cachées devaient se manifester : leur existence serait testée expérimentalement.

Une éventuelle falsification de la mécanique quantique, serait le triomphe posthume d'Einstein.

Le point de départ de Bell était l'expérience EPR [12]. Considérons donc les deux particules A et B qui pendant le temps Δt forment un système unique de spin total égal à zéro. Nous séparons par la suite nos particules par une méthode qui conserve le spin total. Supposons maintenant que les particules se meuvent sur la même droite mais dans des sens opposés. Sur des distances égales du point de séparation des particules sont posés des appareils Stern-Gerlach, qui mesurent une composante donnée du spin des particules. Supposons que les appareils sont parallèles. Alors, si la particule A réalise la valeur ± 1 , la particule B va réaliser la valeur opposée. Il est évident que dans ce cas ($\theta = 0$) nous observerons les probabilités suivantes :

$$P(+1, +1) = 0$$

$$P(+1, -1) = \frac{1}{2}$$

$$P(-1, +1) = \frac{1}{2}$$

$$P(-1, -1) = 0$$

La mécanique quantique n'explique pas ce fait ; pourtant, au moins elle le prévoit. Supposons maintenant que nos appareils font un angle $\theta \neq 0$. Alors, selon le modèle des variables cachées, nous aurons :

$$P(+, +) = P(-, -) = \frac{(a - b)^2}{2}$$

$$P(+, -) = P(-, +) = \frac{1}{2} - \frac{(a - b)^2}{2}$$

a et b sont les directions des appareils qui font un angle θ . La mécanique quantique, au contraire, donne les probabilités suivantes :

$$P(+, +) = P(-, -) = \frac{1}{2} \left(\sin \frac{a - b}{2} \right)^2$$

$$P(+, -) = P(-, +) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\sin \frac{a - b}{2} \right)^2$$

Il est alors facile de constater que pour $(a - b) = 0$, $(a - b) = \pi/2$ et $(a - b) = \pi$, le modèle à variables cachées *reproduit* les prévisions de la

mécanique quantique. *Pourtant, pour les angles intermédiaires le modèle local-déterministe et la mécanique quantique donnent des distributions statistiques différentes* [13].

J.S. Bell formula l'inégalité (qui porte son nom) sur la base de laquelle il serait en principe possible de tester l'incompatibilité de la mécanique quantique avec des théories à variables cachées locales. Par la suite, Clauser, Horne, Shimony et Holt ont généralisé le théorème de Bell pour qu'il soit testé par des expériences réelles. Ainsi, depuis 1967 on a fait plusieurs expériences en utilisant des couples de photons corrélés émis en cascade par désexcitation d'atomes de calcium ou de mercure, en utilisant des rayons γ produits par annihilation du positronium, etc. (Papaliolios, 1967 ; Coher et Commings, 1967 ; Casday, 1971 ; Friedman et Clauser, 1972 ; Holt, 1973 ; Faraci et al., 1974 ; Clauser, 1976 ; Fry et Thomson, 1976 ; Wilson et al., 1976 ; Rapasadra et al., 1979). La totalité presque des expériences étaient pour la mécanique quantique et contre les inégalités de Bell [14].

Enfin, plusieurs spécialistes considèrent comme décisives les expériences de A. Aspect et de ses collaborateurs, qui, ces dernières années ont utilisé des "time varying analyzers", dont la distance de la source était 6,5 m. Ainsi, selon Aspect et al. la transmission d'un signal relativiste entre *A* et *B* était exclue. Les résultats des expériences d'Aspect et al. étaient aussi en faveur de la mécanique quantique [15].

La violation, pratiquement certaine, des inégalités de Bell, a provoqué –ainsi que nous l'avons noté– une nouvelle crise concernant la validité de la causalité et de la localité en microphysique. Devant ces données, plusieurs tendances ont été formées ces dernières années, tendances qui proposent des solutions différentes et souvent incompatibles.

6. Causalité et localité : la Tour de Babel

Ainsi, nous pouvons signaler, de façon un peu schématique, les tendances suivantes de sortir de la crise actuelle :

1. Pour certains physiciens, la violation des inégalités de Bell est un argument décisif en faveur de la non-séparabilité. Pour eux, l'expérience semble favoriser les idées de N. Bohr. Or, la non-séparabilité présuppose (dans l'esprit de Copenhague) l'existence d'interactions à vitesse infinie ; cette condition constitue un handicap fondamental de cette solution. Mais il y a plus : l'Ecole de Copenhague donne une interprétation subjectiviste de la mesure. La transformation des systèmes quantiques est

considérée par cette Ecole comme une “réduction du paquet d’ondes” instantanée et non causale. Or, la réduction est impossible dans le cadre de cette même interprétation. Aussi, on est obligé d’accepter le “principe” positiviste de non-existence des grandeurs physiques non observées, et plus généralement, l’attitude anti-réaliste de l’Ecole de Copenhague. Les contradictions internes de IC, ont obligé plusieurs physiciens *d’accepter la non-séparabilité d’un point de vue réaliste*.

2. Une deuxième solution a été proposée par O. Costa de Beauregard. La séparabilité et l’objectivité sont pour lui des illusions liées à notre approche pragmatique. Costa de Beauregard accepte la possibilité de transmission superlumineuse d’énergie (ou d’information). Dans son schéma, l’énergie positive peut être propagée vers le passé et l’on peut influencer le futur *via* le passé. La causalité rétroactive est donc possible dans cette interprétation paradoxale, qui viole l’ordre relativiste des événements physiques. Ainsi, il n’y a pas de “priorité ontologique” de la cause par rapport à l’effet, et la liaison directe du genre espace devient possible [16].

3. D’un autre côté, Bohm et Hiley ont proposé une solution qui conserve le réalisme et la causalité, mais rejette la séparabilité. Selon ces auteurs, la non-localité est une caractéristique nouvelle et essentielle de la mécanique quantique. Bohm et Hiley ont introduit le “potentiel quantique” pour expliquer les propriétés quantiques de la matière. La non-séparabilité implique la nouvelle notion de *unbroken wholeness* (totalité indivisible) pour l’univers tout entier. On pourrait pourtant objecter que le potentiel quantique viole le principe de relativité. Or, Bohm et Hiley affirment que ce type d’interaction n’implique pas nécessairement la transmission d’énergie (ou de signal) [17]. Pourtant, comment une interaction, qui ne transporte pas d’énergie, peut produire des effets observables ?

4. Un autre modèle pour résoudre la contradiction entre la localité et la violation des inégalités de Bell a été proposé par J.P. Vigiér. Lui aussi rejette la localité pour sauver le réalisme et la causalité. Pourtant son schéma n’est pas non local dans le sens strict du terme, car il présuppose l’existence d’interactions superlumineuses et non instantanées. Le point de départ de Vigiér est l’éther de Dirac, ou bien le milieu subquantique, considéré comme un milieu capable de transmettre des mouvements collectifs à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Selon Vigiér le principe de relativité n’est pas violé car ces mouvements stochastiques ne transportent pas d’énergie [18].

Si le schéma précédent correspondait à la réalité, nous pourrions affirmer qu'il s'agit *d'un modèle de causalité et de localité généralisées*. Cette idée est intéressante et conforme aux points de vue d'Einstein, de de Broglie et de Dirac. Or, l'existence d'interactions super-lumineuses, non-instantanées, tombe aussi sous le coup de la violation des inégalités de Bell : nous pouvons imaginer une synchronisation absolue des mesures sur les deux particules de l'expérience EPR. Dans ce cas, nous avons besoin d'interactions instantanées pour expliquer les corrélations observées. Selon Vigier, ces "ondes de phase", ne violent pas le principe de la relativité, car elles ne transportent pas d'énergie. Mais dans ce cas on a besoin d'une explication concrète concernant le mécanisme à travers lequel des effets observables se produisent sans échange d'énergie. Ces dernières années Vigier propose un modèle semblable à celui de D. Bohm.

5. Une proposition intéressante a été formulée par F. Selleri, à partir de la vieille idée d'Einstein concernant l'existence de "ghost waves" (ondes-fantômes) qui guident le photon. Selon cette idée, toute l'impulsion-énergie est transportée par la particule, qui est plongée dans un phénomène ondulatoire, objectivement réel, *l'onde vide*. Cette dernière ne transporte pas d'impulsion-énergie. Or, malgré le fait qu'elle ne transporte pas d'énergie, l'onde vide peut stimuler l'émission. L'expérience de Gozzini est, selon Selleri, compatible avec l'idée de l'onde vide. Aussi, une analyse détaillée de l'autre expérience de Pise, conduit à la même conclusion. L'évidence accumulée est assez forte pour nous inciter à la recherche d'expériences qui pourraient *prouver* (au lieu d'indiquer) l'existence des ondes vides. Cette idée intuitive *est en contradiction avec la non-localité*. Ainsi la confirmation de l'existence des "ghost waves" pourrait donner un mécanisme pour une explication locale et déterministe de la corrélation EPR.

6. Une autre idée que nous avons déjà signalée, serait la suivante : La seule forme de détermination en physique n'est pas la forme dynamique qui caractérise la théorie électromagnétique et la théorie relativiste de la gravitation. Il y a aussi la forme classique (mécaniste ou laplacienne) qui est caractéristique des phénomènes mécaniques. Il y a, enfin, les formes statistiques (classique et quanta-mécanique). Ainsi, nous pouvons poser la question : *une théorie à variables cachées locales doit-elle être obligatoirement déterministe au sens classique-dynamique du terme ?* Les théories que les inégalités de Bell présupposent sont déterministes dans le sens dynamique. Pourtant, on ne peut pas exclure *a priori* la possibilité d'une théorie probabiliste à variables cachées.

Comme le note Selleri, depuis la formulation de l'inégalité de Bell, plusieurs démonstrations probabilistes de ces inégalités ont été proposées, "mais elles contiennent toutes, quelques caractéristiques qui permettraient difficilement de considérer le problème résolu de façon satisfaisante". Selleri lui-même, à partir d'un critère généralisé de réalité, déduit une inégalité qui est violée par la mécanique quantique, exclusivement à partir de ce critère de réalité et la séparabilité. Il est possible de tester cette inégalité sur la base de modèles probabilistes locaux [19].

Une théorie probabiliste à variables cachées locales pourrait être le cas le plus général, qui accepterait, en tant que possibilité moins générale, le modèle dynamique-déterministe. Selon ce point de vue, la loi probabiliste est la forme la plus générale de loi physique. Le statut de la loi probabiliste n'est pas uniquement épistémologique. Les lois probabilistes possèdent un statut ontique aussi, car, probabilité ne signifie pas absence de causalité et de détermination, mais une détermination plus compliquée et multivalente de l'effet par les causes.

7. Une autre issue de l'impasse actuelle serait la preuve que les prémisses physiques des inégalités de Bell ne sont pas compatibles avec les processus physiques qui se réalisent pendant l'expérience EPR. Ainsi, Louis de Broglie affirme que Bell considère deux électrons séparés et en même temps portés sur le même train d'ondes. Or ces deux hypothèses sont contradictoires [20]. Dans un autre article, de Broglie, Lochak, Beswick, et Vasselo-Pereira affirment que Bell définit un schéma probabiliste classique et calcule les valeurs moyennes des résultats de mesure sur la base des probabilités classiques. Or, ce schéma classique est incompatible avec la mécanique quantique [21].

7. La violation des inégalités de Bell était-elle inévitable ?

Oublions pour un instant la violation des inégalités de Bell. Ainsi que nous avons déjà soutenu, il serait possible d'accepter, sur la base des relations génétiques entre le potentiel et le réel, et la généralisation du critère EPR de réalité physique, que les résultats de la mesure sur les particules EPR soient corrélés tandis que les mesures elles mêmes ne le soient pas. (Les corrélations ont été établies dans le passé et sont conservées à cause de l'évolution déterministe et non dissipative). Sur la base de cette conception *locale*, il serait, en principe, possible, d'interpréter localement les corrélations qui se manifestent, non seulement avec des polarisateurs statiques, mais aussi avec des "time varying analyzers", dans le cas des expériences d'Aspect et de ses collaborateurs. Le fait que ces expériences

confirment les prédictions de la mécanique quantique paraît être, sous ce point de vue, une confirmation de la localité des corrélations EPR.

Malheureusement, c'est à ce point là que le fantôme de la violation des inégalités de Bell émerge, pour nous mettre devant un dilemme crucial : la seule façon de sauver la causalité *et* la localité serait ou bien de falsifier la mécanique quantique par des expériences nouvelles ou bien de montrer que les présupposés des inégalités sont en contradiction avec la réalité physique des particules EPR. Nous essayerons maintenant de formuler un argument en faveur de la deuxième solution, dans le cadre des relations entre le potentiel et le réel, telles qu'elles ont été définies dans ce qui précède.

On sait que des particules non séparées violent les inégalités de Bell, qui sont pourtant toujours respectées par des particules séparées. Ce fait est valable aussi bien pour la mécanique classique que pour la mécanique quantique, malgré le caractère non local de la première. Ainsi la physique classique toute entière –mécanique classique et électromagnétisme– satisfait aux inégalités de Bell sous la condition que les systèmes en vue ne soient pas corrélés.

Ainsi des systèmes classiques *ou* quantiques satisfont aux inégalités de Bell s'ils sont séparés. Pourtant, même des systèmes classiques, macroscopiques, violent les inégalités de Bell, s'ils ne sont pas séparés. C'est D. Aerts qui a donné un exemple macroscopique d'une telle violation, et selon lui, il n'y a pas de mystère dans ce fait [22].

On peut poser maintenant la question : les particules EPR satisfont-elles la condition de séparabilité quand elles sont séparées ? La question paraît contenir une contradiction dans les termes. Pourtant sur la base de l'analyse précédente la réponse sera négative. Car, même si les particules sont spatialement séparées, leurs éléments de réalité (actuels ou potentiels) sont corrélés. C'est une sorte de "non séparabilité" qui se rapporte au *passé* et qui est tout à fait différente de la non séparabilité professée par l'Ecole orthodoxe. J'essayerai de montrer que ce fait n'était pas pris en considération lors de la dérivation des inégalités de Bell.

Des particules EPR spatialement séparées, sont corrélées. Cette contradiction phénoménale est explicable par le fait que l'"information" corrélée a été "stockée" pendant le temps de l'interaction des deux particules. Ce fait a été souligné dans un langage différent il y a un demi-siècle, ainsi que nous l'avons noté, par E. Schrödinger qui, en analysant l'argument EPR, remarqua qu'à cause de leur interaction, les fonctions Ψ qui représentent les particules, sont "entangled" (enchevêtrées). Pour

les séparer (disentangle) nous avons besoin d'information expérimentale supplémentaire. Mais, exactement, à cause de cette "enchevêtrement", ajoute Schrödinger, la fonction $\Psi(A, B)$ n'est pas un produit des fonctions $\Psi(A)$ et $\Psi(B)$ [23]. Ce fait signifie qu'à cause de leur interaction passé, il est impossible d'écrire un vecteur d'état factorisé $\Psi(A, B)$.

Un mélange de vecteurs d'état factorisables, satisfait toujours l'inégalité de Bell. Des systèmes corrélés, au contraire, qui sont donnés par un mélange de vecteurs d'état non factorable, peuvent violer les prévisions empiriques de l'inégalité de Bell [24]. Ainsi nous devons nous poser la question : *est-il possible de factoriser les vecteurs d'état des particules EPR ?*

A partir des conditions de causalité et de localité, J.S. Bell a calculé la valeur moyenne du produit des deux composants $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a}$, $\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b}$:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) B(\vec{b}, \lambda) \quad (2)$$

qui est en contradiction avec la mécanique quantique, dans le cas décrit auparavant.

Pourtant, qu'est-ce que c'est λ ? Selon Bell, λ indique une seule variable ou un ensemble de variables, ou bien un ensemble de fonctions. Pourtant, continue Bell, nous avançons comme si λ était un seul paramètre continu. Alors, le résultat de mesure de $\vec{\sigma}_1 \vec{a}$ sur A est déterminé par $\vec{a}$ et λ et le résultat de mesure de $\vec{\sigma}_1 \vec{b}$ sur B au même moment est déterminé par $\vec{b}$ et λ .

La dérivation de (2) et de l'argument précédent, sont fondés sur l'hypothèse de la localité et de la séparabilité. Pourtant, est-il possible à deux états séparés et différents d'être déterminés par la même variable λ ? Et cette hypothèse n'est pas en contradiction avec la séparabilité qui constitue la base de la dérivation des inégalités de Bell ?

La nature de λ est complètement inconnue. Plus loin Bell écrit : "Quelques uns pourraient préférer une formulation dans laquelle les variables cachées seraient divisées en deux classes avec A dépendante de l'une et B de l'autre ; cette possibilité est contenue dans ce qui précède, étant donné que λ représente n'importe quel nombre de variables et la dépendance de A et B d'elles est sans restriction" [25]. Cette deuxième expression semble introduire une *séparabilité classique* et, en conséquence, une *statistique classique* dans le cas des particules EPR. Cette conclusion est renforcée par l'ensemble de l'argumentation de

Bell. Pourtant, les éléments de réalité de ces particules (réels ou potentiels) et les variables cachées éventuelles, *ne satisfont pas la condition de séparabilité*, même si les particules A et B sont spatialement séparées et n'interagissent pas à cause de la condition de localité. Dans le cas EPR il y a –ainsi que nous l'avons signalé– une sorte de “non-séparabilité”, différente de celle professée par l'Ecole orthodoxe.

Dans un travail plus récent, sous le titre, “Bertlmann's Socks and the nature of reality”, Bell est plus clair en ce qui concerne l'indépendance des deux ensembles des variables cachées. Les exemples cités sont les chaussettes de Mr Bertlmann et la fréquence des crises cardiaques à Lyon et à Lille [26]. Ces deux exemples sont *macroscopiques* et *classiques*, les événements respectifs sont mutuellement indépendants et la confirmation des inégalités de Bell dans leur cas est *a priori* certaine. Pourtant le cas quantique est différent.

Nous posons de nouveau la question : *les vecteurs d'état des particules EPR sont-ils factorisables ?* J.S. Bell, et Clauser et Horn plus tard, ont considéré comme possible la factorisation, sur la base de la localité et la séparabilité. Le principe de la localité est évidemment valable dans le cas EPR. Pourtant les éléments de réalité des deux particules ne sont pas indépendants. Est-il donc possible dans ce cas de postuler une séparabilité, de factoriser les vecteurs d'état et d'introduire une statistique classique ? Les corrélations établies pendant l'interaction des deux particules sont conservées après leur séparation. (Aucun mécanisme de “disentanglement” n'a pas été proposé jusqu'aujourd'hui ; un tel mécanisme serait vraiment “mystérieux” dans l'optique de la physique actuelle). Ainsi nous sommes en présence d'une situation paradoxale de localité, de séparabilité spatiale, et en même temps de corrélation physique. Dans ce cas il est plausible de mettre en question la légitimité de la factorisation du vecteur d'état. Mais si la factorisation n'est pas légitime, alors la violation des inégalités de Bell est inévitable.

La vitesse finie des interactions physiques implique la *localité* des processus physiques. La localité, à son tour, implique la séparabilité de deux systèmes S_1 et S_2 , séparés par un intervalle du genre espace. Dans ce cas “la situation réelle factuelle du système S_2 est indépendante de ce qui se passe au système S_1 , qui est spatialement séparé du premier” [27]. L'indépendance des mesures est respectée dans le cas des particules EPR. Pourtant, la validité de la localité et de la séparabilité n'implique pas l'indépendance des résultats de mesure et des deux ensembles des éventuelles variables cachées.

Pour conclure : Il n'y a pas de paradoxe EPR. Il y a un vide de connaissance en ce qui concerne les processus de corrélation et de transformation des systèmes quantiques. Le grand mérite d'Einstein, Podolsky, Rosen et de Bell, consiste dans le fait qu'ils ont formulé de manière dramatique et concrète le problème de la complétude du formalisme quantomécanique. La violation des inégalités de Bell était, peut-être, inévitable. Pour donner une réponse à la question posée par EPR, il sera éventuellement nécessaire d'avoir une connaissance plus profonde des structures et des processus de la réalité microphysique. Or, cette voie longue est préférable de modèles *ad hoc*, non déterministes, non causaux, non locaux, et ainsi de suite. Leur nombre, qui augmente toujours est, peut-être, un signe d'aberration de ce qui constitue le noyau du problème [28].

8. Sur le statut de la séparabilité et de la non-séparabilité

Une interprétation (et éventuellement une formulation) réaliste et déterministe de la mécanique quantique, doit être fondée sur deux principes : le *réalisme*, et une certaine forme de *déterminisme*. La localité n'est pas une condition nécessaire pour une conception réaliste et déterministe de la mécanique quantique, car il est possible d'imaginer, et éventuellement de découvrir, des formes plus générales de détermination que les formes relativistes-locales. Les interprétations de Bohm-Hiley et Vigier sont réalistes et causales, sans être locales.

Pourtant on peut constater que le statut de la non-localité (et la non-séparabilité) n'est pas le même que celui de la localité (et de la séparabilité).

Le concept primaire des théories physiques est celui de l'interaction ; la causalité et le déterminisme sont des concepts dérivés. Or, toutes les interactions physiques connues se propagent à vitesse finie. La localité est une caractéristique bien fondée de toutes les formes connues d'interaction. Elle est en conséquence un concept physique bien défini, et vérifié par l'évidence expérimentale. Il s'agit de même de la séparabilité, qui est une implication de la localité.

La non-séparabilité, au contraire, présuppose une action instantanée à distance. Or, une telle interaction est hypothétique et, en plus, elle contredit le principe de relativité qui est expérimentalement vérifiée. Par conséquent, la non-séparabilité est basée sur une classe hypothétique d'interactions, inobservables, donc de nature inconnue. Ainsi, *elle ne possède pas le statut de concept scientifique*.

La non-séparabilité, ainsi que nous l'avons déjà noté, a besoin :

- a. D'un mécanisme de perte de l'information stockée pendant le temps d'interaction des particules.
- b. D'un mécanisme de détermination instantanée des éléments de réalité de B , lors d'une mesure effectuée sur A . La non-séparabilité ne possède, pour le moment, de base théorique.

On peut bien sûr objecter que le formalisme actuel de la mécanique quantique est non local. Pourtant, la mécanique quantique conventionnelle est une approximation non relativiste de la vraie nature relativiste des systèmes et des interactions quantiques. Ainsi, cet argument ne modifie pas le statut de la notion de non-séparabilité.

La distinction ci-dessus est un argument supplémentaire en faveur des efforts pour sauver la causalité *et* la localité en mécanique quantique [29].

Références

- [1] A. Einstein, in : *Louis de Broglie, physicien et penseur*, Albin Michel, Paris 1952.
- [2] Einstein, Podolsky, Rosen, *Phys. Rev.*, **47**, 777 (1935).
- [3] D. Bohm, Y. Aharonov, *Phys. Rev.*, **108**, 1070 (1957).
- [4] N. Bohr, *Phys. Rev.*, **48**, 696 (1935).
- [5] E. Schrödinger, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **31**, 555 (1935).
- [6] Einstein, Podolsky, Rosen, op. cit.
- [7] F. Selleri, *Found. of Phys.*, **12**, 645 (1982).
- [8] C. Piron, *Foundations of Quantum Physics*, Benjamin, 1976, p. 68.
- [9] Cf. E. Bitsakis, "A generalization of the EPR criterion of reality", in : *Problems in Quantum Mechanics*, Gdansk Conference (1987), World Scientific, 1988.
- [10] F. Selleri, G. Tacozzi, *Lett. Nuovo Cim*, **26**, 327 (1981).
- [11] Cf. E. Bitsakis, *Found. of Physics*, **18**, 331 (1988).
- [12] J.S. Bell, *Physics*, **1**, 195 (1964).
- [13] Cf. les rapports de F. Lalöe et J.S. Bell dans : *Journal de Physique*, **42**, Suppl. n° 3 (1981).
- [14] La bibliographie est énorme et en général technique. Pour une revue critique des expériences, voir M. Paty, in : *Quantum Mechanics, a Half Century Later*, J. Leite-Lopes, M. Paty (Eds), Reidel, 1977.
- [15] Cf. :
 - a. A. Aspect, Ph. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 461 (1981).
 - b. A. Aspect, Ph. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 91 (1982).
 - c. A. Aspect, J. Dalidar, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 1804 (1982).
- [16] Cf. O. Costa de Beauregard, *Epist. Lett.*, May 1977, January 1988, June 1979.

- [17] D. Bohm, B. Hiley, in : *Quantum Mechanics a Half Century Later*, op. cit.
- [18] Cf. :
 - a. D. Bohm, J.D. Vigier, *Phys. Rev.*, **109**, 882 (1958).
 - b. J.P. Vigier, *Epist. Lett.*, Nov. 1980.
 - c. G. Patroni, J.P. Vigier, *Phys. Lett.*, **73**, 289 (1979).
 - d. J.P. Vigier, *Lett. Nuovo Cim.*, **29**, 467 (1980).
 - e. Garuccio, J.P. Vigier, *Found. of Phys.*, **10**, 797 (1980).
- [19] Cf. :
 - a. F. Selleri, *Found. of Phys.*, **12**, 645 (1982).
 - b. F. Selleri et G. Tarozzi, *Lett. Nuovo Cim.*, **29**, 533 (1980).
- [20] L. de Broglie, C.R.Ac.Sc. de Paris, 278, 7 22 série B (1974).
- [21] L. de Broglie et al., *Cah. Fund. Scientiae*, **55** (1976).
- [22] Cf. les textes de D. Aerts, A. Aspect et C. Piron, in : *Les fondements de la mécanique quantique*, Chr. Gruber et al (Eds), Montana 1987. Aussi :
 - a. D. Aerts, VUBITF 81 04 Preprint.
 - b. A. Sudbery, Y01 5DD preprint.
 - c. F. Selleri, G. Tarozzi, *Nuovo Cim.*, 48B, 120 (1970).
- [23] E. Schrödinger, op. cit.
- [24] Cf., F. Selleri, "History of the EPR Paradoxe", Preprint 1982. Aussi : F. Selleri, G. Tarozzi, *Il Nuovo Cim.*, 48B, 120 (1978).
- [25] J.S. Bell, *Physics*, **1**, 195 (1964).
- [26] J.S. Bell, in : *Journal de Physique*, op. cit.
- [27] A. Einstein, in : *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, P.S. Schilpp (Ed.), The Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, 1949, p. 85.
- [28] Pour l'analyse précédente, cf. : E. Bitsakis, "A generalization of the EPR criterion of Reality", op. cit.
- [29] Cf., E. Bitsakis, in : *Open Questions in Quantum Physics*, G. Tarozzi et A. van der Merne (Eds), Reidel, 1985.

(Manuscrit reçu le 20 février 1989)