

## II.

### CONFRONTATION ENTRE REALISME ET POSITIVISME A PROPOS DU PARADOXE D'EINSTEIN — PODOLSKY — ROSEN (\*)

Jean-Louis DESTOUCHES

#### 1. *Réalisme et positivisme en science*

Deux conceptions philosophiques se sont toujours opposées en science, conceptions que je schématiserai par les termes de *réalisme* et de *positivisme*. Il s'agit évidemment d'une schématisation sommaire ne tenant pas compte de la grande variété des nuances et des points de vue regroupés sous ces deux étiquettes. Il me semble qu'on peut tomber d'accord sur le fait que les penseurs scientifiques appartiennent en général à l'une ou l'autre de deux grandes familles d'esprits: ceux qui sont orientés vers des entités objectives, sous-jacentes à l'expérience et au raisonnement et constituant leur référence et leur fondement, donc susceptibles d'être décrites dans un *Weltbild*; ceux-là je les appelle réalistes, que la référence soit matérielle ou idéale. Et ceux pour qui l'expérience est la seule référence à laquelle doit se confronter toute construction théorique. Pour ces derniers la cohérence logique remplace la garantie fournie par le *Weltbild*, lequel n'est plus indispensable. Qu'on les nomme empiristes, phénoménistes, physicalistes, opérationalistes, ou positivistes comme je le fais ici, ce qui les distingue des réalistes est le souci de ne pas faire appel dans la construction scientifique à des entités inaccessibles en principe à l'expérience.

Les nuances et les variétés dans chacun des deux cas viennent chez les positivistes de la difficulté à cerner le fait pur, l'énoncé expérimental indépendant de tout fondement noumé-

(\*) Conférence à la Société belge de Logique et Philosophique des Sciences, Bruxelles, 20 janvier 1979.

nal, chez les réalistes de la difficulté croissante, vis-à-vis des progrès expérimentaux, à constituer ce *Weltbild* unique garantie de l'adéquation.

Que ces deux attitudes incompatibles soient encore effectivement représentées chez les physiciens contemporains s'explique par l'énorme décalage qui existe entre l'objet propre de la physique et ce qui nous en est révélé au moyen de nos expériences et de nos théories, décalage qu'Eddington rappelait par la métaphore suivante :

«... the symbols which represent physical reality have as much resemblance to the real qualities of the material world...as a telephone number has to a subscriber».

Il est normal que ces attitudes se soient manifestées en alternance au cours de l'histoire des Sciences, en raison de la dialectique par laquelle l'une d'elles, en se développant jusqu'à ses conséquences extrêmes, butait finalement sur des difficultés que l'autre en se développant à son tour permettait d'attaquer sous un autre angle. Parallèlement sont intervenus des conflits de générations : par exemple si Berthelot et Duhem étaient positivistes, Langevin et de Broglie peuvent être considérés comme réalistes.

De même qu'il y a des familles d'esprits en physique, on peut en déceler aussi en mathématiques où formalistes et empiristes, platoniciens, constructivistes, intuitionnistes ont contribué au progrès des résultats tout en s'opposant dans leurs conceptions de la nature des mathématiques ; citons, comme représentants de ces différents points de vue, Hilbert, Borel, Bernays, Markov, Brouwer. Quels que soient leur variété et leur objet on peut retrouver, sous-jacentes aux travaux de ces physiciens et de ces mathématiciens, les deux tendances dominantes, l'une qui se fie uniquement à l'expérience mentale ou physique, l'autre qui subordonne les démarches à des entités préexistantes et indépendantes de notre expérience.

## 2. *Réalisme et positivisme chez Newton*

Il peut même arriver que, chez un même penseur, on voie

se manifester simultanément ou à tour de rôle, selon les besoins de la recherche, ces deux points de vue si opposés, la cohérence philosophique étant toujours subordonnée chez le scientifique à l'obtention d'informations nouvelles sur l'objet de ses investigations. On trouve chez Newton des textes qui illustrent ceci: il est l'auteur de la première grande synthèse de la physique unifiant mécanique céleste et mécanique terrestre par identification de la pesanteur et de la gravitation. Or on peut lire dans les *Principia*, d'une part cette profession de foi positiviste: ...«I have not yet been able to deduce from the phenomena the reasons for these properties of gravity and I invent no hypotheses (*hypotheses non fingo*). For everything which is not deduced from the phenomena should be called an hypothesis, and hypotheses, whether metaphysical or physical, whether of occult qualities or mechanical, have no place in experimental philosophy. In this philosophy, propositions are deduced from phenomena and rendered general by induction...» (*General Scholium*); d'autre part des affirmations sur le temps et l'espace, qui sont proprement métaphysiques: «Absolute, true and mathematical time, of itself, and by its own nature, flows uniformly on, without regard to anything external. It is also called *duration*.

Relative, apparent, and common time, is some sensible and external measure of absolute time (*duration*), estimated by the motions of bodies, whether accurate or inadequate, and is commonly employed in place of true time; as an hour, a day, a month, a year... It may be that there is no equable motion, by which time can accurately be measured. All motions can be accelerated and retarded. But the Flow of *absolute* time cannot be changed. Duration, or the persistent existence of things, is always the same, whether motions be swift or slow or null».

«Absolute space, in its own nature and without regard to anything external, always remains similar and immovable.

Relative space is some movable dimension or measure of absolute space, which our senses determine by its position with respect to other bodies, and which is commonly taken immovable (*absolute*) space...

Absolute motion is the translation of a body from one absolute place to another absolute place, and relative motion, the translation from one relative place to another relative place...»

Les propositions suivantes sont-elles des inductions ou des hypothèses ?

- «1. Every body continues in its state of rest or uniform motion except insofar as it is compelled by a force to change that state.
2. Change of motion is proportional to the force and takes place in the direction of the straight line in which the force acts.
3. To any action, there is always an equal and contrary reaction, or the mutual actions of any two bodies are always equal and oppositely directed along the same straight line.»

C'est Ernest Mach, bien connu comme étant un penseur positiviste, qui a mis en évidence cette contradiction chez Newton et s'est efforcé d'éliminer les hypothèses superflues. Mais il a fallu attendre encore longtemps une axiomatisation purement positive des principes de la mécanique. Painlevé, Chazy, Noll en ont marqué des étapes après Mach.

### 3. *Opposition entre positivisme et réalisme en mécanique quantique*

L'opposition positivisme-réalisme s'est manifestée avec beaucoup plus d'acuité en Mécanique quantique. En effet le réalisme exige un *Weltbild*, un tableau du monde, existant indépendamment des observateurs, et qui se décrit géométriquement dans un espace-temps. Or dans la théorie quantique usuelle un tel *Weltbild* ne peut pas exister, parce que les connaissances sur un système ne peuvent être acquises qu'au moyen de mesures, en utilisant des appareils de mesure qui interagissent avec le système étudié et le modifient. Et ces mesures sont effectuées par des observateurs, ce sont des ac-

tions humaines, et donc un tableau objectif est impossible puisqu'il dépend d'actions d'observateurs.

La théorie ne décrit pas des états intrinsèques d'un système, mais des connaissances acquises sur un système au moyen de mesures, et on utilise ces connaissances pour calculer des prévisions pour des mesures ultérieures et ces prévisions s'expriment au moyen de probabilités.

Dans ces conditions un *Weltbild* ne peut être construit, puisqu'on doit y considérer un état intrinsèque du système évoluant au cours du temps et qu'il n'existe pas un tel état intrinsèque. La théorie que l'on obtient alors en tenant compte d'actions d'observateurs est de caractère positiviste.

De plus le réalisme implique l'inégalité de Bell; or celle-ci est rejetée par l'expérience, d'où l'impossibilité d'un retour au réalisme, mais la possibilité d'un semi-réalisme.

#### 4. *Réalité objective en microphysique*

Pour voir comment se départagent dans le détail de la démarche du physicien, ces diverses positions, je me propose de procéder d'une part à un examen critique de l'idée de réalité objective dans le cadre de la microphysique, d'autre part à une étude plus spéciale du paradoxe E.P.R., au sujet duquel s'affrontent tout spécialement à l'heure actuelle les tenants de ces diverses positions, compte tenu du viol de l'inégalité de Bell.

Tout objet de connaissance d'une part implique un sujet, une expérience, une pensée qui le vise; d'autre part se présente comme transcendant par rapport à ce sujet, cette expérience, cette pensée. Ce qui fait la réalité de l'objet c'est ce qui rend son existence indépendante de la visée du sujet et permet à celui-ci de le distinguer au sein d'une totalité.

En conséquence, à l'échelle usuelle, un objet possède des propriétés intrinsèques indépendantes de l'expérience, mais en même temps accessibles à celle-ci.

Si nous considérons les objets rencontrés en microphysique nous découvrons que ces caractéristiques essentielles de tout objet, compatibles au niveau macroscopique, s'opposent de

telle manière qu'il semble que nous ayons affaire à un autre type de réalité.

Tout d'abord, remarquons que la microphysique est le cadre dans lequel se pose la question très particulière de savoir ce qu'est une particule élémentaire. En effet, le processus analytique qui consiste à expliquer un objet par ses constituants conduit à la question des constituants ultimes. J'ai proposé il y a longtemps, pour y répondre, le concept de « corpuscule relatif à des procédés de morcellement définis », concept qui garde sa signification quelles que soient les particules nouvelles successivement découvertes par la physique contemporaine. Mais la question de leur caractère élémentaire reste ouverte. En fait une théorie cohérente des particules élémentaires n'existe pas encore, mais la manière dont une telle théorie est recherchée entraîne une intrication de plus en plus poussée et complexe entre théorie et expérience, qui a pour résultat d'altérer profondément l'idée d'objet, et de nous interdire de traiter les systèmes étudiés comme une réalité au sens que je viens de décrire.

En effet, en microphysique, l'objet et ses propriétés se trouvent dissociés; les propriétés observées proviennent de l'appareil de mesure aussi bien que du système mesuré; or du point de vue réaliste on aurait la condition fondamentale que tous les résultats de mesures concernant un même objet soient compatibles et puissent être combinés, faute de quoi ils ne pourraient être attribués à cet objet comme des propriétés intrinsèques.

La mécanique terrestre, par exemple, concerne d'abord des objets usuels; puis, à travers la synthèse newtonienne, se développe en mécanique céleste, et plus tard par la théorie cinétique des gaz et la mécanique statistique, en physique moléculaire. Mais une fois au niveau microphysique des inadéquations se manifestent qui ne furent levées que lors de l'apparition de la mécanique quantique et de la mécanique ondulatoire. L'interaction des appareils de mesure et des systèmes mesurés mit en évidence le problème fondamental des rapports entre la théorie et l'expérience, l'opposition entre la conception réaliste et la conception positiviste de ces rapports.

### 5. *Positivism, grandeurs cachées, ondes physiques*

Si l'on cherche à s'en tenir aux phénomènes sans recourir à d'autres hypothèses que celles qui sont strictement exigées par l'expérience, on peut édifier une théorie purement prévisionnelle qui implique l'indéterminisme quantique.

Si l'on admet l'existence de grandeurs cachées inobservables, de réalités inaccessibles à l'expérience, on peut, à ce prix, restaurer un déterminisme caché analogue à celui de la macrophysique mais non à un strict réalisme (cf. § 3).

On peut en se rapprochant d'Einstein et des thèses de Louis de Broglie, parvenir à un semi-réalisme en admettant l'existence d'ondes physiques, ce qui est possible du fait que les prévisions sont calculées selon des règles ondulatoires. Ces ondes physiques doivent obéir à des équations non linéaires pour éviter des extensions indéfinies des trains d'ondes. Une mesure fournit seulement un ensemble d'ondes possibles; la situation est analogue à celle de la mécanique statistique avec un ensemble de mouvements possibles, mais cette fois dans un espace fonctionnel à une infinité de dimensions au lieu d'un espace à  $2n$  dimensions. J'ai montré que si une fonction moyenne peut être calculée et si de plus 4 conditions sont remplies, cette fonction suit à la limite en probabilité une équation linéaire identique à celle de la théorie quantique usuelle. Ceci prouve la cohérence d'un point de vue semi-réaliste, cohérence obtenue moyennant une profonde altération de la notion d'objet, un corpuscule devenant une onde physique, c'est-à-dire une réalité physique dont les limites sont floues. Tandis que l'objet classique peut être caractérisé comme une figure en mouvement, nous avons ici plutôt une image hydrodynamique analogue à un nuage.

### 6. *Pluralité de niveaux du langage scientifique*

En raison de l'impossibilité d'attribuer les propriétés fournies par les mesures comme des propriétés intrinsèques aux objets microphysiques, nous sommes rejetés vers une conception de caractère positiviste, c'est-à-dire essayant de ne prendre en

considération que les faits. Mais la définition du fait scientifique ou encore de la proposition atomique, sans appel à aucun postulat étranger à l'expérience, présente d'énormes difficultés qu'on retrouve dans toutes les tentatives antérieures, en particulier dans toutes les recherches de l'Ecole de Vienne.

J'ai proposé une échelle de niveaux qui permet peut-être de mieux comprendre les rapports complexes entre méthodologie réaliste et méthodologie positiviste dans le domaine de la physique. Ce clivage, qui procède d'un souci de positivité, conduit à distinguer au moins trois niveaux dans l'univers physique: le niveau des systèmes, le niveau des résultats de mesures et le niveau structural des lois régissant les divers aspects des connexions entre observateurs et systèmes. Ceci m'a permis d'élaborer une *théorie prévisionnelle* qui se présente comme la formulation moderne d'une physique positiviste, sous la forme d'un ensemble de conditions régissant les possibilités d'action des observateurs en physique, et par là même relativiste.

Dans la mécanique newtonienne, les trois niveaux que je viens de distinguer sont confondus en une seule réalité; en microphysique, la réalité se décompose, se stratifie, d'où il suit que les prévisions peuvent être exprimées seulement d'une manière probabiliste.

### 7. *Connaissances et prévisions en physique quantique*

Voyons maintenant comment, à partir de l'expression des connaissances et des prévisions en physique quantique, on peut conclure à l'impossibilité d'un *Weltbild*, et examinons la façon dont on peut caractériser comme positivistes ou réalistes les positions philosophiques des physiciens selon leur manière de traiter le paradoxe E.P.R.

Un corpuscule en théorie relativiste, ou bien un système de corpuscules en théorie non relativiste, est décrit au moyen d'une fonction d'ondes notée  $\psi$ . Cette fonction évolue au cours du temps à partir d'une fonction d'onde initiale, selon une équation d'ondes en satisfaisant à des conditions aux limites.

Comme pour toute onde, l'intensité, carré de l'amplitude, a une signification physique, ceci conduit à admettre que toute

onde, de quelque nature qu'elle soit, est une fonction de carré sommable, donc un élément d'un espace de Hilbert .

Si l'on ne sait rien sur le système, la fonction d'onde demeure complètement indéterminée: c'est un vecteur normé quelconque d'un espace de Hilbert. Toute connaissance acquise sur le système vient imposer des conditions à ce vecteur, ce qui l'oblige à se situer dans un sous-espace déterminé. Une observation maximale détermine univoquement ce vecteur.

Les prévisions se calculent à partir de la fonction d'ondes au moyen du principe de décomposition spectrale. Considérons pour simplifier une grandeur complète  $A$  ayant un spectre discontinu, c'est-à-dire un ensemble dénombrable de valeurs possibles. A chacune de ces valeurs possibles  $a_i$  correspond une fonction ou un ensemble de fonctions propres  $\varphi_i$  et de l'ensemble des  $\varphi$  on peut extraire une base orthonormée  $\{\varphi_i\}$  sur laquelle on peut décomposer la fonction d'ondes  $\psi$ :

$$\psi(t) = \sum_i C_i(t) \varphi_i$$

Le principe de décomposition spectrale de Born dit que:

$$\text{Prob} \{ \text{RéMes } A = a_i \text{ à } t \} = |C_i(t)|^2$$

ceci en se plaçant à une époque  $t$  où l'on fait la prévision, antérieure à l'époque  $t_1$  où l'on effectuera la mesure de la grandeur  $A$ , mais postérieure à l'époque  $t_0$  de la prise de connaissance qui est venue fixer la fonction d'ondes initiale  $\psi_0$ ; soit

$$t_0 < t < t_1$$

Si l'on n'effectue pas de mesure à  $t_1$ , la fonction d'ondes demeure  $\psi(t)$  évoluant selon l'équation d'ondes. Si, au contraire, à une époque  $t_1$  on effectue la mesure de  $A$ , le résultat sera l'une des valeurs  $a_i$  possibles à probabilité non nulle. Soit  $a_j$  la valeur obtenue; alors une fois ce résultat acquis, les connaissances ont changé, les prévisions aussi; la fonction d'ondes n'a plus la forme  $\psi(t)$  précédente mais devient  $\varphi_j$  à l'instant  $t_1$ , une

fonction correspondant à la valeur  $a_j$ . Il y a eu une brusque réduction du train d'ondes:

$$\begin{aligned} \psi(t) & \text{ pour } t < t_1; & \psi_1(t_1) & = \varphi_j \text{ à } t_1 \\ \psi_1(t) & \text{ pour } t > t_1 \end{aligned}$$

Si  $U(t, t_0)$  désigne l'opérateur d'évolution, on a:

$$\begin{aligned} \psi(t) & = U(t, t_0) \psi_0 = \sum_i C_i(t) \varphi_i \text{ pour } t < t_1 \\ \psi_1(t) & = U(t, t_1) \varphi_j \text{ pour } t > t_1 \end{aligned}$$

Il y a eu ce qu'on appelle en anglais le «collapse» du  $\psi$ .

La mesure est un acte irréversible. On ne peut revenir en arrière et de  $\psi_1(t)$  revenir à  $\psi(t)$ , ce qui est le point technique essentiel. Ceci conduit à l'impossibilité du Weltbild, mais ceci conduit aussi à un paradoxe qui a été signalé autrefois par Einstein, Podolsky et Rosen et appelé en abrégé paradoxe E.P.R. C'est ce paradoxe que je voudrais exposer maintenant.

### 8. Le paradoxe E.P.R.

Soient deux corpuscules a et b, d'espèces différentes pour simplifier, sur lesquels on effectue une observation maximale à une époque  $t_0$ , puis qui entrent ensuite en interaction (à partir d'une époque  $t_1$ ) et dont l'interaction cesse ultérieurement (à partir d'une époque  $t_2$ ), les deux particules s'écartant alors l'une de l'autre. A une époque  $t_3$  on peut faire une mesure d'une grandeur A choisie arbitrairement sur a ou ne pas la faire, et à une époque  $t_4$  on effectue une mesure d'une grandeur B sur b. L'instant  $t_4$  est tel que  $t_3 < t_4 < t_5$  en désignant par  $t_5$  l'instant où arriverait un signal émis à  $t_3$  de l'endroit de la mesure de A et reçu à l'endroit de la mesure de B.

Si l'on décrit ce processus par la théorie quantique usuelle, à  $t_0$  on détermine des fonction  $\psi_{a,0}$  et  $\psi_{b,0}$  par les mesures initiales constituant une observation maximale (préparation du système). Pour  $t_0 \leq t < t_1$  on a comme fonction d'ondes

$$\Psi(t) = \psi_a(t) \cdot \psi_b(t)$$

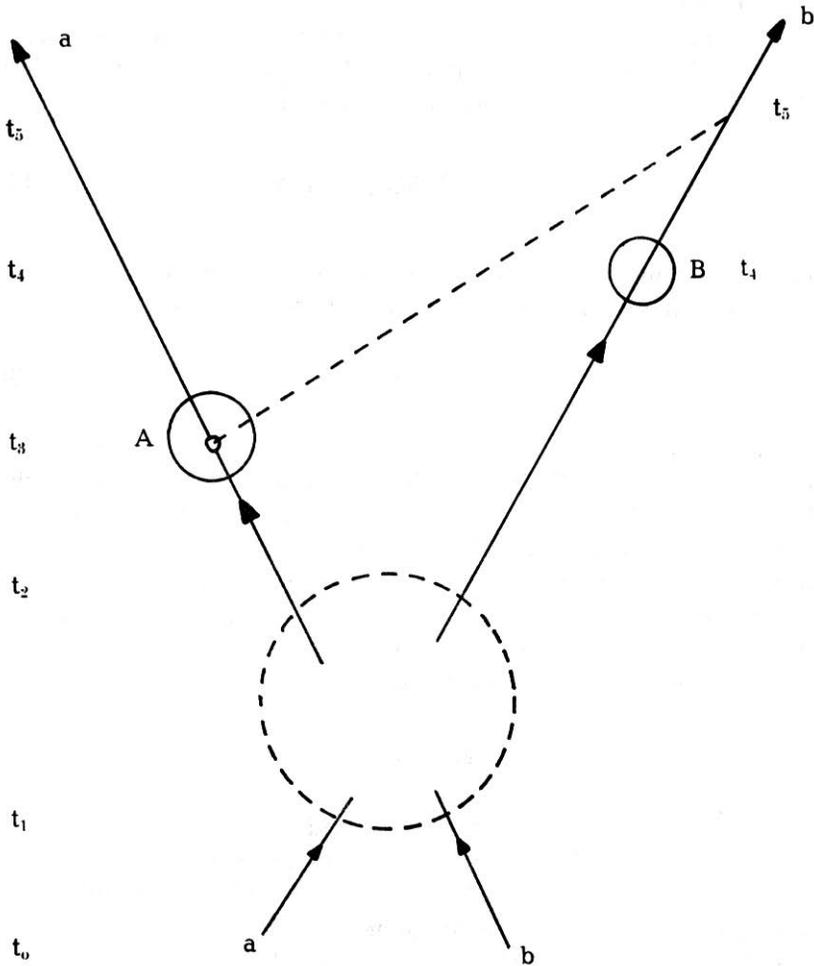


Figure 1

Schéma du paradoxe E.P.R.

où  $\psi_a(t)$  est issue de la condition initiale  $\psi_{a_0}$  et  $\psi_b(t)$  est de même issue de  $\psi_{b_0}$ .

Pendant et après l'interaction, donc à partir de l'instant  $t_1$ , on a pour décrire les prévisions sur le système une fonction  $\Psi(t)$  qui n'est plus un produit de fonctions de  $a$  et de  $b$ .

Si  $\varphi_{a,i}$  désigne la  $i^{\text{ème}}$  fonction propre pour la grandeur A de a mesurée à  $t_3$ , et  $\chi_{b,i}$  la fonction propre de la grandeur B corrélée avec la grandeur A, on a, avant la mesure à  $t_3$ , une fonction d'onde  $\Psi(t)$  qui peut se développer sous la forme

$$\Psi(t) = \sum_i C_i(t) \cdot \varphi_{a,i} \cdot \chi_{b,i} \quad (2)$$

et après la mesure supposée de durée très courte si la  $j^{\text{ème}}$  valeur s'est manifestée, il y a collapse du  $\Psi$  et on a :

$$\Psi_j(t_3) = \varphi_{a,j} \cdot \chi_{b,j} \quad (3)$$

A  $t_4$ , on a une fonction d'onde  $\Psi(t_4)$  développable selon la formule (2) si l'on n'effectue pas de mesure à  $t_3$ , et toute valeur de la grandeur B peut alors se manifester. Au contraire si l'on a effectué la mesure à  $t_3$  la  $j^{\text{ème}}$  valeur a été fixée à  $t_3$  pour la grandeur B ayant les fonctions propres  $\chi_{b,i}$ . Ceci fixe une condition initiale à  $t_3$  pour  $b$  et l'on aura pour  $b$  une fonction d'ondes  $\psi_{b,j}(t)$  pour  $t > t_3$ , issue de  $\psi_{b,j,0}(t_3) = \chi_{b,j}$ .

L'époque  $t_4$  a été fixée telle que

$$t_3 < t_4 < t_5$$

où  $t_5$  est l'instant de réception, à l'endroit de la mesure de B, d'un signal émis à  $t_3$  à l'endroit de la mesure de A. C'est la mesure faite à cet instant  $t_4$  inséré entre  $t_3$  et  $t_5$  qui vient créer le paradoxe. Dans tout ce raisonnement les fonctions  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\Psi$ ,  $\chi$  ont été supposées normées. Les spectres de A et B ont été supposés discontinus pour simplifier, mais le raisonnement s'étend immédiatement au cas de spectres continus.

Si l'on interprète les fonctions  $\Psi$  comme purement prévisionnelles, permettant de faire des prévisions à partir de connaissances fournies par des résultats de mesures, une connaissance acquise à  $t_3$  vient réagir sur les possibilités physiques à  $t_4$  au loin.

Si l'on interprète les fonctions  $\Psi$  comme ayant une signification directement physique, alors elles agissent sur les phéno-

mènes plus vite que les signaux. Dans les deux cas il y a un paradoxe difficile à accepter, puisqu'il y a contradiction avec la théorie de la relativité qui exige que les actions physiques ne se propagent pas avec une vitesse dépassant la vitesse limite des signaux, c'est-à-dire la vitesse de la lumière. «C'est de la magie» aimait à dire Einstein devant ce résultat. Nous allons voir qu'au contraire le paradoxe disparaît si l'on fait intervenir les fonctions d'ondes physiques  $u$  de M. Louis de Broglie.

### 9. *Le point de vue réaliste*

Puisqu'en théorie quantique les prévisions se calculent par des règles ondulatoires à partir des fonctions  $\psi$  (principe de décomposition spectrale), pour un physicien réaliste comme Louis de Broglie, il est naturel de poser que si l'on a des règles de caractère ondulatoire c'est qu'il existe physiquement des ondes qui caractérisent les phénomènes considérés, et ce sont les ondes physiques  $u$  qu'il a introduites. Mais nous n'aurons pas besoin de faire intervenir ici toutes les hypothèses qu'il a faites sur ces ondes, et nous admettrons des hypothèses légèrement différentes de façon à violer l'inégalité de Bell.

### 10. *Les hypothèses de la théorie fonctionnelle des corpuscules*

1°) Nous admettrons qu'un corpuscule est décrit physiquement par une onde  $u$ , champ à bosse, ayant des composantes, et de variance définie (spinéur de Dirac pour un corpuscule de spin  $1/2$ ), appartenant à un espace de Hilbert et obéissant à une équation non linéaire.

Des idées anciennes d'Einstein sur la concentration de l'énergie des corpuscules conduisent à admettre que les ondes  $u$  doivent être des éléments d'un espace de Hilbert. D'autre part plusieurs arguments peuvent être avancés pour que les ondes  $u$  obéissent à une équation d'ondes non linéaire:

1 — si les ondes  $u$  pouvaient obéir à une équation linéaire, on n'aurait pas eu besoin d'édifier la mécanique quantique en donnant aux ondes  $\psi$  l'interprétation qu'on leur donne, et on

aurait pu conserver une interprétation du genre ondes classiques (comme Schrödinger a cherché à le faire), mais alors on ne peut y intégrer les corpuscules et des effets de caractère localisé.

2 — on produit des phénomènes identiques avec des photons ou des particules issus d'appareils de laboratoire et des photons ou des particules issus des étoiles. Or pour ceux-ci, avec une équation linéaire on aurait une onde sphérique dont l'intensité irait en décroissant; mais il n'est pas physiquement acceptable qu'un élément infiniment petit (ici l'intensité de l'onde émise très loin) provoque des phénomènes d'énergie finie (produits par les corpuscules). Il est donc nécessaire qu'il y ait des termes non linéaires pour éviter l'étalement des trains d'ondes et garder une amplitude finie à l'onde.

3 — il y a des processus dans lesquels il y a séparation de faisceaux (par exemple réflexion et réfraction séparant le faisceau incident en deux parties). Ceci exige qu'il y ait des points de bifurcation pour les solutions  $u$  des équations, et ceci ne peut se produire que si l'on a des équations non linéaires.

4 — Il y a des corpuscules qui s'annihilent ou qui sont créés ou qui se transforment en corpuscules d'autres espèces. Ceci ne peut se produire que s'il y a des catastrophes dans l'évolution des ondes et cela exige des équations non linéaires.

2°) Nous admettrons que toute connaissance sur des corpuscules ne peut être acquise qu'au moyen de mesures, et qu'une mesure ne détermine qu'un ensemble infini  $\{u_0\}$  de fonctions initiales acceptables.

Une mesure physique, même une observation maximale, ne peut déterminer une seule fonction  $u$ , il y a toujours une infinité de fonctions  $u$  acceptables, des fonctions de l'ensemble étant tour à tour réalisées pendant un court intervalle de temps (mouvement brownien de M. de Broglie).

Les fonctions  $u$  sont interprétées d'une façon complètement différente des fonctions  $\psi$  usuelles. Le fait que l'on dispose d'un ensemble  $\{u\}$  de fonctions  $u$  acceptables après une mesure ne doit pas conduire à considérer le processus comme «un mélange» au sens de von Neumann de la mécanique quantique

usuelle. Un tel ensemble  $\{u\}$  correspond à un «cas pur» au sens de von Neumann. Les ondes  $u$  ne peuvent être interprétées comme les ondes  $\psi$ , sinon elles seraient superflues et n'auraient pas une signification directement physique.

3°) Nous admettrons qu'un appareil de mesure produit une interaction avec les corpuscules mesurés et vient modifier les conditions aux limites. Les fonctions  $u$  évoluent d'une manière continue dans le temps en obéissant à l'équation d'ondes sans admettre le processus brusque du collapse. Les conditions aux limites varient progressivement et d'une façon continue lorsqu'on déplace un appareil de mesure.

4°) Nous admettrons de plus que l'ensemble  $\{u(t)\}$  des fonctions d'ondes acceptables issues de  $\{u_0\}$  déterminé par la mesure initiale décrit le corpuscule considéré, car un système n'est jamais complètement isolé, d'après les conceptions d'Emile Borel et de Khinchine. Une autre manière de s'exprimer, équivalente à la précédente, consiste à dire que le corpuscule est décrit par une fonction d'onde  $u(t)$  de l'ensemble  $\{u(t)\}$  qui est changée continuellement au cours du temps sous l'influence de petites perturbations extérieures. De ce fait, seul l'ensemble  $\{u(t)\}$  de fonctions a une signification physique. On a en somme une mécanique statistique dans un espace fonctionnel. Ceci généralise au cas des ondes physiques  $u$  la conception de Garrett Birkhof et von Neumann de la Mécanique classique où seuls les ensembles Lebesgue-mesurables des mouvements et de mesure non nulle ont une signification physique.

#### 11. *L'interprétation du paradoxe E.P.R. par une théorie réaliste*

Si l'on accepte les hypothèses du paragraphe précédent, on peut surmonter le paradoxe E.P.R. comme nous allons le voir.

A l'instant initial  $t_0$  les mesures initiales déterminent des ensembles  $\{u_{a0}\}$  et  $\{u_{b0}\}$  de fonctions d'ondes initiales acceptables respectivement pour les corpuscules  $a$  et  $b$ . D'où pour  $t_0 < t < t_1$  des ensembles de fonctions  $\{u_a(t)\}$  et  $\{u_b(t)\}$  pour les corpuscules  $a$  et  $b$ . La correspondance entre  $\{u_{a0}\}$  et  $\{u_a(t)\}$  n'est

pas en général biunivoque à cause, d'une part, de points de bifurcation et de points de raccordement, et d'autre part de fonctions  $u$  qui ne peuvent être prolongées au delà de certains instants; mais la correspondance est telle que, des ensembles  $\{u_a(t)\}$  et  $\{u_b(t)\}$ , on peut remonter à l'instant initial  $t_0$  aux ensembles  $\{u_{a,0}\}$  et  $\{u_{b,0}\}$ .

Entre les instants  $t_1$  et  $t_2$  s'établit une interaction entre les particules a et b. Pendant cette interaction les corpuscules a et b sont encore décrits par des ensembles  $\{u_a(t)\}$  et  $\{u_b(t)\}$  de fonctions. Contrairement au cas de la théorie de Schrödinger, il n'y a pas une onde unique dans l'espace de configuration pour un système, mais chaque corpuscule est décrit par une onde. Pendant l'interaction ces ondes réagissent entre elles et nous avons à considérer des ensembles de paires ordonnées de fonctions  $\{\langle u_a(t), u_b(t) \rangle\}$  qui évoluent en obéissant au système des deux équations d'ondes concernant les corpuscules a et b.

L'interaction conduit donc à des paires corrélées de fonctions pour a et pour b. Quand l'interaction cesse, à  $t_2$ , chaque fonction reprend une évolution séparée, mais la *corrélacion* établie pendant l'interaction *va demeurer*, car cette corrélation se traduit à l'époque  $t_2$  comme une condition initiale pour l'évolution séparée qui suit. Autrement dit nous aurons des ensembles  $\{u_a(t)\}$  et  $\{u_b(t)\}$ , chaque fonction d'un des ensembles étant corrélée à des fonctions de l'autre ensemble d'où inséparabilité.

Si l'on n'effectue pas de mesure à  $t_3$ , toute valeur permise par l'ensemble  $\{\langle u_a(t), u_b(t) \rangle\}$  peut se manifester comme résultat de la mesure de B à  $t_4$  sur b.

Au contraire si l'on effectue sur a une mesure à  $t_3$  on détermine ainsi un ensemble  $\{u_a(t_3)\}_j$  de fonctions acceptables si la  $j^{\circ}$  valeur s'est manifestée dans le cas d'un spectre discret, ou le  $j^{\circ}$  intervalle dans le cas d'une décomposition en intervalles d'un spectre continu. Cet ensemble est un sous-ensemble de l'ensemble  $\{u_a(t_3)\}$  issu de la mesure initiale. Cette connaissance nouvelle complète la connaissance initiale; il y a réduction de l'ensemble des fonctions d'ondes acceptables par augmentation des connaissances. Il y a eu modification des ondes par la mesure mais pas une réduction instantanée d'un train

d'ondes lors de la prise de connaissance, comme c'est le cas avec les ondes  $\psi$ . On peut alors revenir en arrière à l'époque  $t_2$  de la fin de l'interaction puisque l'évolution des ondes  $u$  au cours du temps est causale, selon une équation d'ondes. En remontant ainsi le cours du temps jusqu'à l'instant  $t_2$  on aura un ensemble  $\{ \langle u_a(t_2), u_b(t_2) \rangle_j \}$  de paires de fonctions. Cet ensemble est un sous-ensemble de l'ensemble  $\{ \langle u_a(t), u_b(t) \rangle \}$  déduit des conditions initiales  $\{ u_{a0} \}, \{ u_{b0} \}$ , soit

$$\{ \langle u_a(t_2), u_b(t_2) \rangle_j \} \subseteq \{ \langle u_a(t), u_b(t) \rangle \}$$

A cause des corrélations entre les fonctions, on en tirera pour  $t > t_2$  un ensemble  $\{ u_b(t)_j \}$  qui sera un sous-ensemble de  $\{ u_b(t) \}$  déduit des conditions initiales  $\{ u_{a0} \}, \{ u_{b0} \}$ , soit

$$\{ u_b(t)_j \} \subseteq \{ u_b(t) \}$$

L'ensemble  $\{ u_b(t)_j \}$  est formé de fonctions corrélées à  $\{ u_a(t)_j \}$ . Dans ce cas à l'instant  $t_4$  nous aurons un ensemble  $\{ u_b(t_4)_j \}$  qui est un sous-ensemble de  $\{ u_b(t) \}$  issu des mesures initiales  $\{ u_{a0} \}, \{ u_{b0} \}$ . Ainsi si la  $j^e$  valeur de la grandeur  $A$  s'est manifestée comme résultat de la mesure de  $A$  sur  $a$  à  $t_3$ , ce résultat vient de l'ensemble de paires de fonctions acceptables qui existait à  $t_2$ , et le second élément des paires va constituer  $\{ u_b(t_3)_j \}$  qui correspond à la  $j^e$  valeur de la grandeur  $B$  de  $b$  corrélée à  $A$  de  $a$ . Il n'y a pas de paradoxe de cette façon et ceci fournit un argument en faveur des ondes physiques de Louis de Broglie.

Si au lieu de mesurer la grandeur  $B$  à  $t_4$ , grandeur corrélée à  $A$ , on mesure une grandeur  $B'$  non corrélée avec  $A$ , si l'on n'effectue pas de mesure à  $t_3$ , les valeurs possibles de  $B'$  et leurs probabilités sont déterminées à partir de l'ensemble  $\{ u_b(t) \}$  issu des mesures initiales  $\{ u_{a0} \}, \{ u_{b0} \}$ , d'où une certaine loi de probabilité pour  $B'$  exprimant les prévisions pour l'époque  $t_4$ . Si au contraire à  $t_3$  on a mesuré  $A$  sur  $a$ , l'ensemble des valeurs possibles pour  $B'$  et leurs probabilités seront déterminées à partir de l'ensemble  $\{ u_b(t)_j \}$  qui en général fournira une loi de probabilité différente de la précédente pour exprimer les prévisions pour l'instant  $t_4$  en accord avec l'inséparabilité.

## 12. *Opposition entre les diverses descriptions*

La grande différence entre la description du processus conduisant au paradoxe E.P.R. par la théorie prévisionnelle positiviste et la description par la théorie fonctionnelle réaliste est due au fait que dans la théorie prévisionnelle chaque mesure lors de la prise de conscience de son résultat provoque une réduction du train d'ondes (collapse du  $\psi$ ), et une mesure étant un acte irréversible, à partir du résultat de la mesure on peut faire des prévisions pour l'avenir mais non pour le passé. Donc on ne peut remonter le cours du temps de  $t_3$  à  $t_2$  date de la fin de l'interaction et repartir de  $t_2$  vers le futur concernant b.

Au contraire dans l'interprétation réaliste, l'hypothèse d'une réalité permanente indépendante de toute expérience permet d'avoir un support constitué par les fonctions  $u$  qui évoluent d'une manière causale, ce qui permet de remonter le temps et ainsi d'éviter le paradoxe en revenant à l'époque de l'interaction. La différence essentielle entre les deux théories est là: avec la théorie prévisionnelle positiviste on ne peut remonter le temps d'où le paradoxe, avec la théorie fonctionnelle réaliste on peut remonter le cours du temps et le paradoxe se trouve levé. Il faut bien remarquer que le paradoxe n'est pas issu de la théorie quantique seule, qui est parfaitement cohérente en elle-même, mais de la théorie quantique complétée par les exigences de la théorie de la relativité. On rencontre en plusieurs points des difficultés à concilier relativité et quanta. C'est ici l'un de ces points.

Olivier Costa de Beauregard admet qu'un résultat de mesure permet de faire des prévisions non seulement pour le futur, mais aussi pour le passé, d'une manière symétrique, et ainsi permet de remonter le cours du temps et de lever le paradoxe comme avec la théorie réaliste; mais cette interprétation n'est pas celle de la théorie usuelle, et elle néglige le fait qu'une mesure modifie le système et constitue un acte irréversible. Il me semble que sans un support objectif impliqué par une théorie réaliste le cours du temps ne peut pas être remonté

lorsqu'il y a des événements irréversibles. La théorie usuelle ne permet pas cette remontée du temps.

D'autre part j'ai entendu soutenir par un réaliste que lorsqu'on avait des résultats statistiques on pouvait toujours imaginer un processus déterministe et réaliste conduisant aux mêmes résultats statistiques. Si cela est vrai lorsqu'on considère une seule grandeur, il n'est pas du tout évident que cela soit possible quand on considère un ensemble de grandeurs dont certaines sont non simultanément mesurables. Il n'existe pas une démonstration de cela. Pour la théorie quantique on peut le faire au moyen des ondes  $u$ , mais cela est lié à la structure particulière de la théorie quantique et au fait qu'on a su construire une théorie semi-réaliste qui retrouve comme un cas limite la théorie quantique usuelle essentiellement prévisionnelle et positiviste. C'est ce dernier point qu'il nous faut préciser maintenant.

### 13. *Raccordement de la théorie semi-réaliste avec la théorie quantique positiviste*

Les principes exposés au § 10 nous ont conduit à une théorie réaliste qui permet de lever le paradoxe E.P.R. grâce au fait que l'on peut remonter le cours du temps. Mais une telle théorie n'est acceptable que si elle s'accorde avec la théorie usuelle, c'est-à-dire que si dans les cas limites où la théorie usuelle est adéquate elle retrouve les mêmes résultats et fournit les mêmes prévisions. C'est ce point qu'il faut examiner: on doit retrouver les ondes prévisionnelles  $\psi$  avec leur interprétation usuelle comme un cas limite.

Supposons alors que sur chacun des ensembles de fonctions  $u$  que nous avons à considérer on puisse définir une fonction moyenne, soit  $\bar{u}_{a_0} = f. m. \{u_{a_0}\}$  et de même des fonctions  $\bar{u}_{b_0}$ ,  $\bar{u}_a(t)$ ,  $\bar{u}_b(t)$ ,  $\bar{u}_a(t)_j$ ,  $\bar{u}_b(t)_j$ .

Supposons de plus que les quatre conditions soient remplies pour que ces fonctions  $\bar{u}$  obéissent à la limite en probabilité à une équation linéaire. On peut alors définir des fonctions d'ondes prévisionnelles  $\psi$  par

$$\psi_a(t) = \frac{\bar{u}_a(t)}{\|\bar{u}_a(t)\|}$$

et des formules semblables pour les autres fonctions  $\bar{u}$ , d'où des fonctions  $\psi_b(t)$ ,  $\psi_a(t)_j$ ,  $\psi_b(t)_j$ . Dans ces conditions les prévisions s'évalueront selon la méthode habituelle de la théorie quantique. Mais ici il n'y a plus de paradoxe en raison de la façon dont évoluent les fonctions  $u$ .

On voit que quand on remonte le temps après la mesure à  $t_3$  pour revenir à  $t_2$ , on peut le faire non pas directement par les fonctions  $\psi(t)$ , mais par les fonctions  $u$  selon la méthode indiquée au § 11. A partir de l'ensemble de fonctions  $\{u_b(t)_j\}$  on passera à  $\psi_b(t)_j$  d'où les prévisions à  $t_4$  pour  $b$  après la mesure à  $t_3$  pour  $a$ . Ici on voit que le support réaliste constitué par l'ensemble  $\{u_b(t)_j\}$  est essentiel pour remonter le cours du temps.

Si à l'instant  $t_4$  au lieu de mesurer la grandeur  $B$  corrélée à  $A$  on mesure une grandeur  $B'$ , sans mesure à  $t_3$  les prévisions se calculent à partir des fonctions  $\psi$  issues des conditions initiales à  $t_0$ , et au contraire s'il y a eu mesure à  $t_3$  elles se calculent à partir de  $\psi_b(t)_j$  issue de  $\bar{u}_b(t)_j$ . Ainsi on se trouve placé dans des conditions conformes à la mécanique quantique usuelle. Mais dans la théorie quantique usuelle l'onde  $\psi$  déterminée à partir d'une mesure n'est utilisable que pour les prévisions vers le futur parce qu'une mesure est un acte irréversible changeant brusquement l'onde  $\psi$  qui porte les connaissances (collapse de  $\psi$ ). On ne peut s'en servir en rétrodiction mais passé. M. Costa de Beauregard s'en sert en rétrodiction mais en faisant des hypothèses différentes de celles de la théorie quantique usuelle.

Ainsi la théorie fonctionnelle utilisant les ondes  $u$  se raccorde à la théorie quantique usuelle qu'on obtient comme un cas limite, mais le support fourni par les ondes  $u$  permet la remontée du temps pour lever le paradoxe E.P.R., ce qui ne peut se faire sans l'aide de ce support.

#### 14. *Expériences liées au paradoxe E.P.R.*

Le paradoxe E.P.R. constitue une représentation schématique

sommaire de circonstances qui apparaissent dans certaines expériences. L'une de ces expériences peut être schématisée comme suit: on considère un atome tel qu'il admette un état excité intermédiaire provoquant l'émission successive de deux photons: un électron de l'atome passe sur un niveau excité d'énergie  $E_i$ , émet un photon de fréquence  $\nu_1$ , se trouve alors sur un niveau intermédiaire d'énergie  $E_j$ , puis émet un second photon de fréquence  $\nu_2$  et retombe sur le niveau fondamental d'énergie  $E_0$  selon le schéma de la figure 2. Le temps pendant lequel l'électron demeure sur le niveau intermédiaire est très court. Pour observer ce processus on dispose l'expérience selon le schéma de la figure 3. Les deux photons de fréquence  $\nu_1$  et  $\nu_2$  sont observés en sens inverse l'un de l'autre en plaçant d'abord un monochromateur pour ne laisser passer d'un côté que les photons de fréquence  $\nu_1$  et de l'autre côté seulement ceux de fréquence  $\nu_2$ , de façon à éliminer les lumières parasites. Après les monochromateurs on place des analyseurs  $A_1$  sur le premier trajet et  $A_2$  sur le second. Puis derrière ces analyseurs on place des détecteurs  $D_1$  et  $D_2$  qui détectent les photons qui passent et ces deux détecteurs sont reliés à un dispositif de coïncidences

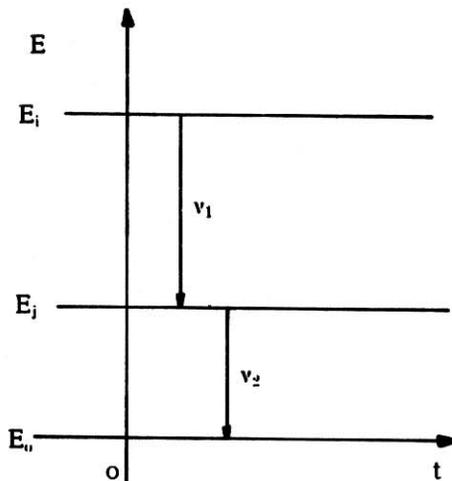


Figure 2

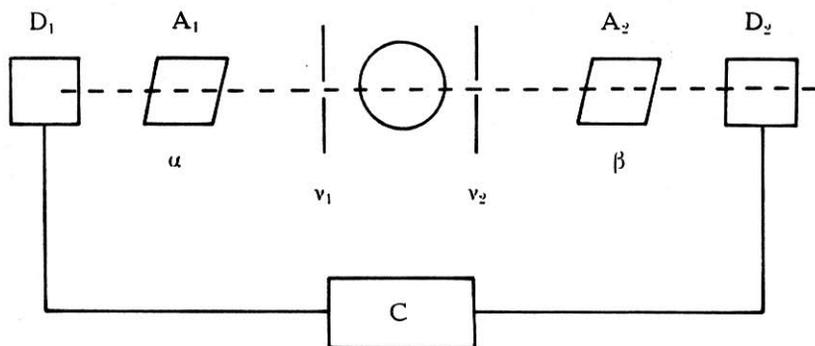


Figure 3

Schéma d'un dispositif expérimental

qui compte les photons arrivant simultanément sur les détecteurs.

On constate que quelle que soit la position de l'analyseur  $A_1$ , il n'y a aucune coïncidence lorsque l'analyseur  $A_2$  est orthogonal à  $A_1$ . Ce résultat est contraire à ce que donnerait l'optique classique et contraire aussi à la théorie quantique usuelle traitée d'une façon sommaire car alors les deux émissions successives seraient considérées comme deux phénomènes indépendants. Tout se passe donc comme si la position de l'analyseur  $A_1$  déterminait la polarisation du second photon de fréquence  $\nu_2$ , comme s'il y avait une action du futur sur le présent. On voit clairement que le dispositif expérimental implique des conditions entraînant le paradoxe E.P.R. La position de l'analyseur  $A_1$  correspond à la mesure de  $A$  à  $t_3$  sur  $a$  décrite plus haut à propos du paradoxe E.P.R. tandis que la position de l'analyseur  $A_2$  correspond à la mesure de  $B$  à  $t_4$  sur  $b$ . Quant à l'instant  $t_5$  il est rejeté à une époque très lointaine, un signal émis par  $A_1$  ne pouvant rejoindre le deuxième photon. Celui-ci d'ailleurs est annihilé avant. Mais ici la période  $t_1, t_2$  de l'interaction entre  $a$  et  $b$  est remplacée par un processus plus complexe correspondant à une double émission de photons: au moment de l'émission du premier photon il y a une interaction entre ce photon et l'électron qui a provoqué son émission parce qu'en théorie fonctionnelle les particules, photons ou élec-

trons, ne sont pas ponctuelles, mais d'étendue liée à la valeur de l'intensité  $|u|^2$  d'une onde  $u$ , et d'autre part, le photon dans la théorie de de Broglie a une masse  $\mu_0$  non nulle. Ainsi il y a une interaction pendant un temps court mais non nul entre le premier photon et l'électron. De ce fait l'électron sur le niveau intermédiaire a eu son mouvement conditionné par cette interaction et l'émission du second photon dépend de cette interaction préliminaire à son émission. Là encore il y a interaction de ce second photon avec l'électron. De ce fait le second photon se trouve corrélé au premier photon par l'intermédiaire de l'électron. Alors les polarisations des deux photons sont corrélées, et l'on comprend le résultat de l'expérience. En somme comme dans le cas du paradoxe E.P.R., ou bien le futur (position de l'analyseur  $A_1$ ) agit sur le présent: émission des photons conditionnée par la position de  $A_1$  qui sera plus tard traversé par le premier photon, ou bien on peut remonter le cours du temps grâce à une chaîne causale due à un support constitué par les fonctions d'ondes physiques  $u$  (concernant spécialement l'onde  $u$  du premier photon) et tout est conditionné par le processus d'émission des deux photons; c'est là, dans ce processus, que se déterminent les corrélations des polarisations. Cette fois le paradoxe est levé et le processus est qualitativement expliqué. On peut expliciter ce processus sur les formules concernant les ondes  $u$ ; ce n'est pas ici le lieu pour le faire; il faut seulement exprimer les idées fondamentales selon lesquelles les processus peuvent être décrits soit d'une manière prévisionnelle positiviste, soit d'une manière réaliste au moyen d'ondes physiques. Mais il était important de montrer que la discussion sur le paradoxe E.P.R. n'est pas académique mais concerne des expériences qui sont réalisées et dont l'interprétation est difficile.

### *Conclusion*

Des diverses tentatives effectuées pour surmonter le paradoxe E.P.R. semble résulter actuellement une radicalisation des points de vue réaliste et positiviste, beaucoup plus poussée que dans les étapes antérieures que j'ai décrites plus haut.

On peut remarquer d'abord qu'à l'échelle macroscopique, loin de se définir préalablement aux démarches qu'ils orientent, positivisme et réalisme se posent l'un par rapport à l'autre dans un rapport dialectique. Le théoricien moderne peut passer de l'un à l'autre par une démarche qui les altère progressivement en dépassant les contradictions du genre de celle qui était déjà présente chez Newton: son *Weltbild* demeure utilisable à une certaine échelle pour le physicien actuel, mais ses hypothèses philosophiques sont dépassées, et d'autre part ce n'est plus sur la mécanique classique que l'on discute.

On peut toujours dire que le positivisme épure les conceptions issues du réalisme en supprimant les hypothèses superflues, et que le réalisme est, par la conviction qu'il entraîne chez le chercheur de pénétrer les secrets du monde objectif, plus apte à stimuler l'imagination, à suggérer de nouvelles représentations, donc de nouveaux schèmes de pensée. Le réalisme est inspirateur, le positivisme est garant de l'esprit scientifique.

L'inconvénient du postulat réaliste est le caractère inaccessible de la réalité supposée, laquelle ne peut s'atteindre qu'à travers des conceptions théoriques, des modèles représentatifs, et l'objectivité ne se manifeste que sur les coïncidences expérimentales, compte tenu de toutes les considérations à faire sur la nature de la mesure en microphysique.

En croyant atteindre une réalité intrinsèque et préexistante, la physique ne fait qu'utiliser un modèle, qu'appliquer des schémas ordonnateurs et structurants.

Si l'on fait appel à la notion de sémantique il est possible de caractériser l'opposition entre les deux points de vue de la manière suivante: le positivisme prend comme référent une description mathématique constituant un modèle, le réaliste prend comme référent une entité physique prédonnée. Mais le choix du référent n'est pas essentiel au progrès de la recherche, car celui-ci ne se fait pas au niveau de la sémantique, mais au niveau des structures. Ceci dit, il faut bien préciser la nature actuelle des affrontements entre positivistes et réalistes.

La critique positiviste de Mach à l'égard du réalisme newtonien ne portait finalement que sur des idées philosophiques

ou métaphysiques et, techniquement, que sur la formulation d'une axiomatisation de la mécanique classique sans répercussion aucune sur son développement. Le programme de cette axiomatisation énoncé au grand congrès des mathématiciens de Paris en 1900, ne s'est trouvé réalisé effectivement qu'après 50 ans, vers 1950.

Le second affrontement entre positivistes et réalistes a eu lieu à la fin du siècle dernier à propos de la théorie atomique entre énergistes et atomistes. Là, déjà le niveau technique intervenait d'une manière essentielle et les théories en question étaient déjà tout à fait différentes comme forme et comme structure; il s'agissait des lois fondamentales de la chimie, du mouvement brownien, et de l'explication du bleu du ciel: Il s'agissait donc de phénomènes que tout le monde pouvait voir, et là les réalistes ont fini par l'emporter parce qu'il ne s'agissait ni de philosophie ni de métaphysique, mais de faits expérimentaux à expliquer.

Le troisième affrontement eut lieu au début de la mécanique ondulatoire entre 1925 et 1927, et là les positivistes triomphèrent très facilement pour des raisons de cohérence.

Le quatrième affrontement a lieu actuellement et il est impossible de prévoir comment il se terminera.

Débutant par des considérations philosophiques d'Einstein et de Louis de Broglie sur le déterminisme et l'indéterminisme, sur le caractère complet ou incomplet des théories quantiques, et se continuant par quelques points techniques d'intérêt secondaire comme le caractère purement formel de la fusion des corpuscules ou au contraire son caractère physique, le conflit s'est manifesté grâce au paradoxe E.P.R. et aux expériences récentes sur des points techniques et expérimentaux très précis.

En fait ces deux positions constituent deux manières différentes de construire des modèles, mais à l'heure actuelle les modèles positivistes, incompatibles avec la supposition d'une réalité préexistant à la mesure, sont mis en échec par le cas particulier du paradoxe E.P.R., puisqu'ils interdisent la rétro-diction par suite du collapse du  $\psi$ . Une expérience est indispensable pour vérifier la prévision en l'absence de tout support indépendant de cette prévision; comme il n'y a pas de vérifica-

tion possible la rétrodiction est interdite, sauf dans le cas d'expériences qui se trouvent avoir été déjà faites. En revanche les modèles positivistes permettent les prévisions concernant l'avenir puisqu'il est possible de préparer une mesure.

Ce qu'il faut bien voir c'est que, dans tous les exemples que j'ai cités, l'orientation des physiciens vers une position réaliste ou positiviste, même si elle pouvait rejoindre une préférence philosophique, était toujours en fait imposée par des raisons techniques, qu'il s'agisse de résultats expérimentaux ou d'implications théoriques. C'est le cas plus que jamais en ce qui concerne le paradoxe E.P.R. et l'inégalité de Bell.

Les positivistes ont exclu les positions réalistes sommaires par des arguments proprement techniques (théorèmes de J. von Neumann, de P. Février, inégalités de Bell). Aujourd'hui un réalisme plus subtil se propose. Pour départager les deux points de vue il y a une question précise à résoudre qui se ramène à ce choix: on admet ou bien que le futur agit sur le présent, ou bien qu'on peut transmettre des actions au loin immédiatement (mais ces deux assertions ne sont ni positivistes ni dans la tradition de la Science physique), ou bien qu'il faut revenir au réalisme avec un déterminisme caché et une nouvelle forme de théorie. Mais en fait il ne s'agit que d'un semi-réalisme.

L'appel à une réalité inaccessible à l'expérience permet de concevoir un support pour l'évolution du système pendant les intervalles de temps qui séparent des mesures successives, et d'éviter l'action immédiate à distance comme conséquence des hypothèses admises initialement. Il permet aussi, point essentiel, de remonter le cours du temps puisque cette réalité est censée avoir une histoire, même entre les mesures .

L'essentiel est de conserver dans la théorie qu'on élabore, quelle qu'elle soit, toutes les structures dont la validité a été vérifiée, car c'est l'enrichissement progressif de ces structures qui constitue l'approche scientifique, non les positions philosophiques provisoirement favorables qui ont permis d'y parvenir.

Il se trouve qu'actuellement la position semi-réaliste semble être celle qui présente le plus de cohérence puisqu'elle permet de lever le paradoxe E.P.R. sans heurter de front nos cadres habituels de pensée et en préservant l'acquis de la théorie quantique.