

Annales de la Fondation Louis de Broglie,
Vol. 10, n° 2, 1985

A propos des inégalités de Bell

et du "paradoxe" E.P.R.

Une courte mise au point de la question.

par Damian CANALS-FRAU

Institut d'Optique
Université de Paris-Sud
Bâtiment 503
Boîte postale 43
91406 ORSAY Cedex

(manuscrit reçu le 19 Avril 1985)

Résumé : a) On montre que la conclusion de BELL, qu'..."ainsi nous ne pouvons pas écarter l'intervention sur un des côtés comme une influence causale sur l'autre", n'est pas une conclusion justifiée physiquement.

b) On défend le point de vue que les arguments avancés par E.P.R. pour dire que la mécanique quantique n'est pas complète, sont, du point de vue physique, "entachés de nullité" puisque métaphysiques.

(Physics Abstracts : 03.65)

Avertissement au lecteur

Dans ce qui suit, il est bon d'avoir à l'esprit que

- 1°) Paradoxe = Etre, chose, fait qui heurte le bon sens (le Petit Robert).
- 2°) Dans le laboratoire de microphysique le comportement du tout petit (photons, électrons, etc.) est fréquemment paradoxal.
- 3°) Il arrive qu'on confonde l'ensemble de nos formules, lois et règles d'application -c'est-à-dire, l'ensemble de nos théories physiques- avec l'ensemble des phénomènes naturels appelés phénomènes physiques. L'ensemble de ces phénomènes naturels c'est simplement *la physique*. Par contre, les théories physiques ne sont qu'une approche idéalisée de la physique. Il y a là une nuance très importante.

Ces théories, nous les avons construites à partir des phénomènes naturels, de façon telle qu'elles remplissent le rôle que nous leur assignons. Elles sont extrêmement fructueuses. Mais en les appliquant nous sommes conscients que, par exemple, les particules élémentaires ne sont pas des points mathématiques. Quand nous avons besoin d'une description plus fidèle, plus détaillée, nous remanions nos théories pour les adapter à nos nouveaux besoins. Confondre *la physique* avec ces théories interprétatives partielles et approximatives est la cause profonde des quiproquos que le présent travail dénonce.

I - INTRODUCTION

Le but de l'argument d'EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN¹⁾ (EPR) est de montrer que la mécanique quantique est incomplète. Pour cela, ils ont imaginé une expérience hypothétique qui devrait tester certaines prédictions de la mécanique quantique. Et à l'aide d'un raisonnement ad hoc ils pensent être arrivés à leurs fins.

Vu le caractère paradoxal desdites prédictions, on en est venu à parler, plus tard, de paradoxe EPR quand on

se réfère à l'argumentation EPR. EINSTEIN lui-même parle de paradoxe en 1949²⁾.

Dans cette Introduction nous présentons le problème d'après le point de vue orthodoxe et nous réservons pour le chapitre IV un éclairage tout à fait différent.

Il est devenu habituel de parler de cet argument comme d'un Gedankenexperiment*.

Une interprétation possible de cet argument est que des propriétés non mesurées ont quand même une réalité physique.

L'analyse que fait BOHR¹¹⁾ de l'argument EPR met

* Je pense que le mot Gedankenexperiment, appliqué à l'argument EPR, prête à confusion. En fait, cet argument n'est pas uniquement une expérience physique pensée, mais aussi une spéculation métaphysique qui -par conséquent- ne peut pas être développée dans le cadre d'une pensée physique.

Un critique anonyme de mon projet de texte m'a fait remarquer qu'il faut distinguer deux choses : le Gedankenexperiment proprement dit et le raisonnement EPR. Le Gedankenexperiment, sous la forme que lui ont donnée BOHM et AHARONOV³⁾ (et qui d'après les spécialistes^{4),5)} n'est pas l'expression exacte du paradoxe EPR) est vraiment une expérience de pensée (d'ailleurs, elle a été réalisée en laboratoire⁶⁾). Par contre, le raisonnement EPR est -ou peut être qualifié de- métaphysique.

Beaucoup de physiciens partagent le point de vue que le raisonnement EPR est métaphysique. Par exemple, Max BORN et Wolfgang PAULI. En parlant de la position d'EINSTEIN (se rapportant à la mécanique quantique), PAULI écrit à BORN : "Je partage totalement votre façon de voir, EINSTEIN s'est "fourvoyé dans sa métaphysique" (Ich teile vollständig Ihre Auffassung, dass EINSTEIN sich "in seine Metaphysik verrannt hat".⁷⁾). (suite de cette note page suivante).

en avant, premièrement, que le formalisme de la mécanique quantique est une description exhaustive du phénomène individuel ; deuxièmement, que la mécanique quantique contient l'inséparabilité entre l'appareil de mesure et l'objet mesuré. D'où on peut conclure légitimement que les mesures physiques sont la seule réalité physique.

A propos de l'argumentation de BOHR, EINSTEIN¹²⁾ disait : "Il n'y a pas de contradiction dans cela ; y croire est donc logiquement possible. Mais, c'est tellement contraire à mon instinct scientifique que je ne peux pas renoncer à chercher une conception plus complète". Plus tard, en 1954, en parlant avec PAULI sur ce que les défenseurs de la mécanique quantique devraient dire pour être inattaquables du point de vue logique, (mais qui ne coïncide pas avec ce qu'il pense lui-même)** : "la description des systèmes physiques par la mécanique quantique est sans doute incomplète, mais il serait vain de la compléter, puisque cette intégrité n'entre pas dans les lois de la nature". PAULI continue : "cependant, je ne suis nullement satisfait de cette formulation qu'on nous propose, car elle semble être une formulation métaphysique d'"ange sur la pointe d'épingle" (si quelque chose existe à propos de laquelle personne ne peut rien savoir)".

Il est caractéristique d'une pensée métaphysique de ne pas être réalisable avec un montage instrumental. BELL et d'ESPAGNAT reconnaissent que les expériences de corrélation de photons ou de spins, ne sont pas la reproduction exacte de l'argument EPR. BELL⁸⁾ dit : "Considérons par exemple, le Gedankenexperiment EPR particulier de BOHM (les italiques sont de moi). Plus tard⁹⁾ il appelle la corrélation mesurée expérimentalement, corrélation EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN-BOHM. A la question : les inégalités de BELL sont-elles l'expression exacte du paradoxe EPR ?, d'ESPAGNAT¹⁰⁾ répond : "non bien sûr, elles ne le sont pas".

** La traduction française¹³⁾ de cette lettre est infidèle : Dans le deuxième grand paragraphe, la phrase entre parenthèses a sauté, ce qui inverse le sens de ce que PAULI a écrit. L'original⁷⁾ dit : "... was nach seiner Ansicht wir Quantenmechaniker sagen müssten um logisch unangreifbar zu sein (was sich aber nicht mit dem deckt was er selber glaubt)...".

Après la publication du travail (pas trop explicite) de BOHR, la plupart des physiciens ont admis que l'argument EPR est métaphysique.

Ensuite BOHM et AHARONOV³⁾ ont suggéré que l'expérience de WU-SHAKNOV¹⁴⁾ sur la polarisation de la radiation d'annihilation du positronium pourrait s'approcher d'une réalisation expérimentale de l'argument EPR.

En développant cette idée, BELL¹⁵⁾ a construit ses inégalités.

II - LA CONCLUSION DE BELL

D'après MERMIN¹⁶⁾, BELL a montré que supposer l'existence de propriétés non-mesurées* peut avoir des conséquences observables qui "peuvent être en contradiction avec des prédictions quantitatives de la mécanique quantique et donc, si la théorie est correcte, avec le comportement physique observable".

Dans sa démonstration, BELL¹⁸⁾ s'appuie sur l'hypothèse de localité, que j'appellerai Hypothèse n° 1 : "Si on fait deux mesures à des endroits éloignés l'un de l'autre, le réglage d'un des appareils de mesure ne doit pas influencer le résultat obtenu avec l'autre".

Les expériences n'ayant pas vérifié les inégalités, BELL arrive à la conclusion que l'hypothèse de localité (Hypothèse n° 1) est en cause et qu'"ainsi nous ne pouvons pas écarter l'intervention sur un des côtés comme influence causale sur l'autre"¹⁹⁾.

Jusqu'ici rien de nouveau, je n'ai fait que présenter le problème comme aurait pu le faire un élève de BOHR.

* Le résultat d'une mesure est la conséquence de l'action de mesurer l'objet, qui -s'il est permis d'extrapoler à partir du monde macroscopique- doit se trouver dans un certain "état" avant la mesure. J'appelle¹⁷⁾ cet hypothétique "état" (avant mesure), "état ante".

Maintenant je voudrais faire quelques commentaires.

Je pense que la conclusion de BELL¹⁹⁾ -que je viens de citer- n'est pas physiquement obligatoire^{20),21)} : il y a plusieurs hypothèses (ou postulats) dans son raisonnement.

En plus de son hypothèse de localité (que j'ai appelée Hypothèse n° 1), il y a le postulat explicite, que j'appelle Hypothèse n° 2 :
"Les particules ont des propriétés qui dictent leur aptitude à réussir certaines expériences -aussi bien si on les soumet à ces expériences, que si on ne le fait pas".*

BELL fait implicitement une 3ème hypothèse (n° 3) qui s'énonce : On peut parler séparément de chaque particule. Dans les situations expérimentales auxquelles on applique le raisonnement de BELL, on ne s'intéresse pas à toutes les propriétés des particules, mais seulement à la valeur du spin (ou de la polarisation). Il faut alors lire la troisième hypothèse : on peut parler séparément de la valeur de chaque spin (ou de chaque polarisation). Mais nos connaissances de l'état singulet** ne nous permettent pas d'affirmer cela. Ce que nous savons sur cet état ne nous permet de parler ni de la valeur du spin de l'une des particules, ni de la valeur du spin de l'autre particule. Nos connaissances se limitent au fait que la valeur du spin du système total formé par les deux particules est nulle. Et la physique nous a enseigné qu'elle restera nulle, tout le temps que rien n'agira sur le système. Donc, on peut s'attendre à ce que les valeurs des spins -de chaque système partiel- soient corrélées.

* "We are assuming that particles have properties which dictate their ability to pass certain tests -whether or not these tests are in fact made"22).

** Etat dans lequel se trouvent les particules, sur lesquelles on fait les mesures, dans les expériences pour tester les inégalités.

La troisième hypothèse de travail de BELL semble alors assez osée puisqu'elle implique que les valeurs des spins (ou des polarisations) ne sont pas corrélées. C'est bien son droit de faire cette hypothèse ... à condition que ce soit la seule. Ce qui n'est pas le cas ici.

Voyons la signification de chacune de ces trois hypothèses.

L'Hypothèse n° 1 dit qu'il n'y a pas d'action à distance à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

L'Hypothèse n° 2 suppose l'existence de propriétés non-mesurables en physique (voir l'Annexe).

Il est clair que cette hypothèse est une spéculation métaphysique. Supposons pour un instant que ce soit une hypothèse compatible avec nos connaissances de physique. Alors, si l'"aptitude" est une propriété physique des particules, ce serait une propriété sur laquelle on ne pourrait exercer aucune action : vu que les conséquences seraient les mêmes -d'après le postulat explicite de BELL²²⁾- autant si on agit sur les particules (si on les soumet à certaines expériences) comme si on ne le fait pas. D'autre part, faire une mesure c'est faire une expérience. Donc, la mesure n'aurait aucune action sur la propriété physique "aptitude" (contrairement à ce que nous savons sur les mesures) et par contre-coup cette propriété n'aurait aucune action sur la sonde qui sert à faire la mesure. L'instrument de mesure n'indiquerait rien et la propriété physique "aptitude" serait non-mesurable. Ce qui serait passablement gênant pour une propriété physique. Il est vrai que la notion d'"aptitude" peut paraître évidente à l'esprit humain, un peu comme le temps et l'espace absolus de Newton.

L'Hypothèse n° 3 suppose que les valeurs des spins des particules en état singulet, ne sont pas corrélées.

En plus, le problème proposé par BELL aux expérimentateurs⁶⁾ ne correspond pas aux conditions initiales sur lesquelles BELL construit ses inégalités. Les conditions ini-

tiales de l'expérience n'interdisent nullement aux phases des particules de jouer un rôle. Par contre, la formule initiale de BELL (formule (1) de 15)) implique que les phases des particules ne jouent aucun rôle²³). C'est une hypothèse gratuite puisque non nécessaire pour réaliser l'expérience. Néanmoins, BELL pouvait faire cette hypothèse de travail à condition que ce soit la seule.

BELL met en cause l'Hypothèse n° 1, d'où sa conclusion : "... ainsi nous ne pouvons pas écarter l'intervention sur un des côtés comme une influence causale sur l'autre". D'après moi, les Hypothèses 2 et 3, et la question des phases, rendent la conclusion de BELL non-contraignante.

En d'autres mots, sa conclusion est un paralogisme. En plus, ces hypothèses -comme je viens de les expliciter- contrarient nos connaissances de physique expérimentale. Elles permettent aussi de prédire la non-vérification des inégalités, indépendamment de considérations de mécanique quantique.

D'après mon analyse, le raisonnement de BELL n'est possible que

- a) si on admet que deux systèmes partiels, "unis" par une propriété commune (par exemple, action et réaction, corrélation des spins ou des polarisations, etc.) sont définis comme étant indépendants. Il me semble évident que cette contradiction ouvre la porte à des paralogismes ;
- b) si on admet que les particules -dont parle BELL- ont des propriétés sur lesquelles on ne peut pas agir. Puisque, d'après BELL, le résultat est le même autant si on les soumet à certaines expériences que si on ne le fait pas ;
- c) si on admet que la démarche d'EPR est physiquement valable. Par exemple, si on ne voit pas la contradiction interne dont souffre leur critère de réalité physique : qu'il affirme en même temps deux choses incompatibles, qu'il est antinomique en lui-même (voir Annexe).

Bien sûr, une paire de particules de spin $\frac{1}{2}$ après interaction des spins -c'est-à-dire, dans l'état singulet- est une chose "étrange", qui par certains côtés se comporte

comme une seule "chose", tout à fait comme en optique, où on peut considérer deux photons cohérents comme une seule "chose" du point de vue de la phase. (MERMIN²⁴) dit : "La question n'est plus que la mécanique quantique est une théorie extraordinairement étrange (et pour EINSTEIN, inacceptable), mais que l'univers est un endroit extraordinairement bizarre".).

Les raisonnements que je viens d'exposer ne font référence qu'à nos connaissances de faits expérimentaux connus, ils ignorent la mécanique quantique. Il peut quand même être utile de rappeler maintenant que, basée sur nos connaissances de cet état singulet, la mécanique quantique fait une prédiction qui est vérifiée par la nature.

Pour compléter cet éclairage, je voudrais encore citer une communication personnelle de COSTA DE BEAUREGARD : "L'inégalité de BELL est une déduction mathématique basée sur des hypothèses appartenant au calcul de probabilités classique, qui sont différentes de celles auxquelles obéit le calcul de probabilité quantique. Alors, il n'est pas surprenant qu'il y ait des situations pour lesquelles les conséquences des deux théories sont testablement différentes".

Les arguments avancés montrent qu'on ne peut pas, dans le cadre de la physique, tirer les conclusions que tire BELL de la non-vérification de ses inégalités.

III - LA NON-LOCALITE

Mon commentaire est court et phénoménologique. Des résultats des expériences pour tester les inégalités de BELL on peut conclure que les valeurs des spins des particules en état singulet (ou celles des polarisations des photons émis en cascade) sont non-locales ou non-séparables, si on appelle de la sorte le fait et les conséquences de la corrélation mesurée expérimentalement. L'évidence qui découle de cette vérification expérimentale, peut-on l'étendre aux propriétés autres que les spins des dites particules (ou les polarisations desdits photons) ? Je pense que le faire est trop solliciter l'expérience²⁵).

IV - LE "PARADOXE EPR"

Depuis 1935, on a beaucoup écrit sur ce sujet. Presque 50 ans plus tard, il semble inutile d'y revenir. Nonobstant, pour compléter ce travail et si le lecteur me le permet, je voudrais quand même résumer en quelques lignes, comment, en fonction de l'enseignement de la mécanique quantique que j'ai reçu, on arrive à la conclusion que les arguments avancés par EPR pour dire que la mécanique quantique est incomplète sont "entachés de nullité" (du point de vue de la physique) puisque métaphysiques²⁶).

Supposons que les deux systèmes partiels S_1 et S_2 d'EPR soient deux particules de spin $\frac{1}{2}$ comme l'ont suggéré BOHM et AHARONOV³).

Un temps après avoir été créées (ou après avoir interagi) elles se trouvent très éloignées l'une de l'autre. La fonction d'état ψ_{12} du système total S_1+S_2 est -d'après la mécanique quantique³-

$$\psi_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \psi_+(1) \psi_-(2) - \psi_-(1) \psi_+(2) \},$$

où $\psi_+(1)$ se rapporte à la fonction d'onde du système partiel S_1 dont le spin est s_1 , etc.

Bien qu'elle soit appelée fonction d'onde ou fonction d'état du système, ψ_{12} n'est rien de plus qu'une "version sténographique" de la connaissance que nous avons du système total. Le module carré $|\psi_{12}|^2$ nous dit que si nous mesurons S_1 nous trouverons soit $+s_1$ soit $-s_1$, l'un ou l'autre avec probabilité $\frac{1}{2}$; et que si nous mesurons S_2 nous trouverons $-s_2$ ou $+s_2$, l'un ou l'autre avec la même probabilité $\frac{1}{2}$. Et si nous mesurons S_1 et S_2 nous trouverons $(+s_1)$, $(-s_2)$ ou $(-s_1)$, $(+s_2)$. En d'autres mots, ψ_{12} contient les probabilités potentielles des *résultats* de mesures faites sur S_1 ou S_2 , d'après nos connaissances (expérimentales) du système S_1+S_2 .

Comme toute probabilité, $|\psi_{12}|^2$ devient caduque quand nos connaissances du système total changent. Si par exemple, je mesure S_1 et trouve $+s_1$, cela rend caduque la

fonction primitive ψ_{12} , puisque notre connaissance du système total a changé. Avec nos nouvelles connaissances nous pourrions écrire une nouvelle fonction d'onde, disons $\psi_2 = \psi_-(2)$ qui tient compte du fait que nous connaissons à présent S_1 . Son module carré $|\psi_2|^2$ nous dit que si nous mesurons S_2 nous trouverons $-s_2$ avec probabilité 1. Mais j'insiste, elle ne nous dit rien sur S_2 si nous ne faisons pas de mesure sur S_2 : les équations de la mécanique quantique expriment toujours des probabilités conditionnelles.

Le passage de ψ_{12} avant mesure à ψ_2 après mesure de S_1 , est fréquemment interprété comme la "réduction" d'une somme algébrique à un seul terme, comme s'il s'agissait de deux aspects d'une même expression mathématique. On appelle cela "réduction du paquet d'ondes". Mais, nous avons vu qu'il s'agit en fait de deux expressions mathématiques différentes, qui se réfèrent à deux situations physiques différentes: dans le premier cas nous ne savons rien de S_1 ni de S_2 ; dans le deuxième cas nous savons que S_1 vaut $+s_1$, mais nous ne savons rien de S_2 . A ces deux situations physiques différentes correspondent deux équations mathématiques différentes, ψ_{12} et ψ_2 .

Ainsi analysée, la démarche d'EPR (à savoir: la fonction d'état de la mécanique quantique et différentes mesures de S_1 donnent différentes prédictions pour S_2 ; mais, comme il ne peut y avoir qu'une seule "réalité physique", la mécanique quantique donne une description incomplète de la réalité physique), cette démarche donc, est contournée.

Au total, les difficultés d'EPR proviennent de trois causes:

- Considérer que la "fonction d'onde" de la mécanique quantique est une chose en soi. D'où l'habitude de prendre la "réduction du paquet d'ondes" pour un phénomène physique quand, en réalité, ce n'est qu'une façon commode -et peu claire- de dire qu'il faut changer de fonction d'onde.
- Postuler implicitement que la prédiction sur la "valeur d'une quantité physique" a une signification physique même si on ne fait pas les opérations nécessaires pour obtenir

cette "valeur". (Attention à la nuance : la prédiction porte sur la "valeur" de la quantité physique. Si on ne fait pas la mesure pour obtenir cette "valeur", la prédiction ne porte sur rien et est, en réalité, une fausse prédiction) (voir l'Annexe).

- c) Admettre l'existence d'une "réalité physique" indépendante de toute mesure (ce qui n'est nullement évident en microphysique).

Aux philosophes de discuter le dernier point : pour faire de la physique sans contradictions internes, le physicien n'a pas besoin de prendre position sur l'"existence" ou non d'une réalité physique en dehors des résultats de mesure. Quant au premier point : la fonction d'onde ne contient rien d'autre que ce que nous savons sur le système.

Mais, la mécanique quantique ne peut pas tout. Si elle nous permet de prédire le résultat des mesures de corrélation entre les spins (ou les polarisations), même si les détecteurs ne sont pas parallèles, elle ne peut pas nous aider -et pour cause- à proposer un modèle (macroscopique) de ce qui se passe.

Pour finir, je voudrais faire mienne la très belle phrase de COSTA de BEAUREGARD²⁷) : "Il faut rappeler qu'isomorphisme entre le formalisme et son discours interprétatif est la condition d'une théorie satisfaisante".

A N N E X E

La définition de réalité physique d'EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN est-elle une spéculation métaphysique ?

Pour définir un élément de réalité physique EPR considèrent comme raisonnable le critère suivant :

"Si, sans perturber aucunement un système, nous pouvons prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette quantité physique¹).

Voyons d'abord comment le physicien du laboratoire de microphysique voit la mesure.

Pour que l'appareil de mesure puisse donner une indication, il faut que la chose à mesurer agisse sur lui et réciproquement, pas de mesure sans interaction. Alors, le physicien ne peut pas mesurer la valeur d'une quantité physique sans la perturber : ce qu'il sait mesurer, c'est la résultante de l'interaction de son appareil de mesure avec la chose à mesurer. Il lui est difficile de parler de la valeur que la "quantité" mesurée "aurait pu avoir" avant perturbation par la mesure, puisqu'il ne sait pas comment et de combien l'acte de mesurer modifie la chose à mesurer.

En résumé, EPR appliquent leur critère au cas particulier d'un système I+II, qu'on sait être formé par deux systèmes partiels I et II et dont *seulement l'évolution globale* (c'est-à-dire, le système I+II) peut être calculée par l'équation de Schrödinger (même si I et II sont actuellement très éloignés l'un de l'autre et n'interagissent plus). Ensuite, ils arguent qu'il suffit de mesurer une certaine propriété sur un des systèmes partiels (ce qui provoque la "réduction du paquet d'ondes") pour pouvoir prédire la valeur de la même propriété sur l'autre, *sans perturber* ce deuxième système partiel.

La critique qu'on peut faire à ce raisonnement est la suivante : en fait, la prédiction -dont parle le critère- porte et ne peut porter que sur le *résultat* de la mesure du

deuxième système partiel (II), puisque cette prédiction est basée sur le *résultat* de la mesure du premier système partiel (I). Donc, d'après ce qu'on a vu plus haut, la prédiction est basée sur la conséquence de la perturbation du premier système par l'opération de mesure. Un philosophe dirait que le critère d'EPR est antinomique en lui-même, puisque c'est une contradiction de dire, et, "valeur d'une quantité physique" (dans laquelle est comprise la perturbation produite par l'appareil de mesure), et, "sans perturber aucunement" (28).

C'est donc une illusion de croire, comme EPR, qu'on puisse prédire* le *résultat* d'une mesure sans perturbation du système, ou qu'on puisse parler de l'état hypothétique dans lequel pourrait se trouver le système avant mesure. EPR prétendent montrer que c'est l'état de II avant mesure qui est une "réalité physique". C'est pour cela que je dis qu'on ne peut que prédire le résultat de mesure.

Voyons dans un exemple simple la subtile différence entre une mesure faite et une non-faite. Cela n'est pas évident pour l'homme de la rue.

Supposons que j'ai un appareillage d'expérimentation complètement automatisé. Il enregistre toute une série de résultats de mesure de I, et les résultats des mesures correspondantes de II. Sans regarder les résultats de II, à partir des résultats de I, je prédis les résultats correspondants de II. En regardant ensuite la liste de résultats de II, je constate que j'ai prédit avec certitude tous les résultats.

Ici il faut ouvrir une parenthèse pour dire qu'il y a symétrie, puisque je peux aussi bien prendre les résultats de II pour prédire ceux de I. Le critère d'EPR - cité au début de cette annexe - parle de prédire. Les auteurs auraient pu tout aussi bien parler de "rétrodire", car la mesure distante à laquelle on pense a pu être faite avant. COSTA de BEAUREGARD (29) va un pas plus loin et utilise le néologisme "télédire". Pour comprendre l'exactitude du terme, il faut avoir à l'esprit le diagramme de l'espace-temps de la relativité. Sur ce

* Attention : prédire vraiment (voir plus loin)

diagramme le cône de lumière de l'évènement I (mesure en I) est séparé du cône de lumière de l'évènement II (mesure en II) par un intervalle du type espace. Dans ce cas la théorie nous montre que, si les évènements I et II ne sont pas simultanés, on peut toujours trouver un référentiel dans lequel ils le sont. Ce qui relativise les mots *prédire* et *rétrodire*. Evidemment, la symétrie est la même si l'intervalle est du type temps, comme dans le cas des photons, où, à l'aide de miroirs, on peut faire les mesures pratiquement au même endroit de façon simultanée ou non. Le mot "télédire" est alors moins frappant. Fermons la parenthèse sur la symétrie.

Si dans une deuxième série d'expériences, je fais mesurer seulement I par mon appareillage automatique, ma nouvelle liste de résultats de mesure de I, me permet encore de prédire des "résultats" de mesure de II. Mais, des "résultats de mesure" qu'on aurait pu faire sur II et qu'on n'a pas faits. Disons de "résultats imaginaires de mesure", puisque II ne se trouve pas dans le même état que dans la première série d'expériences où II a été mesuré. C'est-à-dire, mes "prédictions" actuelles portent sur une chose qui n'a pas existé, n'existe et n'existera pas.

Alors, après la mesure de I on peut toujours "prédire", mais la prédiction n'est une vraie prédiction (elle a un sens) que si on mesure II. La prédiction est une fausse prédiction (elle n'a pas de sens) si on ne mesure pas II. D'ailleurs le langage est précis : on prédit le *résultat* de mesure de II. Pas de mesure de II, pas de résultat. Et la "prédiction" ne porte sur rien.

Quand on fait une "fausse prédiction" on est beaucoup plus proche de la métaphysique que de la physique. Jusqu'aux années 20 cette métaphysique était d'ailleurs considérée comme allant de soi, puisque basée sur des notions qui paraissent évidentes à l'esprit humain. Ensuite, les progrès expérimentaux en microphysique ont conduit à son échec en ce domaine. Depuis, la nouvelle méthodologie physique, mise au point par les physiciens, a fait table rase des préjugés, des a priori, des "évidences", pour ne s'appuyer que sur des données physiques du laboratoire. Cette nouvelle méthodologie

physique a été très fertile : son application conséquente a donné la Mécanique Quantique.

Je voudrais encore ajouter que la plupart des livres de texte présentent la Mécanique Quantique (ou Théorie Quantique) de façon axiomatique. Cela est très commode pour les applications, où on utilise des "recettes de cuisine". Mais, la compréhension pâtit. Un court chapitre sur la "philosophie" qui est à la base de cette théorie pourrait éviter beaucoup de quiproquos. "Philosophie" qui n'est autre que la méthodologie physique dont on vient de parler.

Remerciements

Cet article trouve son origine dans des échanges de lettres entre M. François BONSACK et l'auteur. Qu'il soit ici vivement remercié.

L'auteur a aussi et surtout une dette de gratitude envers M. Olivier COSTA de BEAUREGARD "for helpful advice and discussion".

REFERENCES

- 1) A. EINSTEIN, B. PODOLSKY et N. ROSEN, Phys. Rev., 47, 777 (1935).
- 2) A. EINSTEIN : Philosopher-Scientist, P.A. Schilp éditeur ; Tudor Publ. Comp., New York, 1949 ; page 681.
- 3) D. BOHM et Y. AHARONOV, Nuovo Cimento, 17, 964 (1960).
- 4) J.S. BELL.
- 5) B. d'ESPAGNAT.
- 6) A. ASPECT, Thèse, Université de Paris-Sud, Orsay, France.
- 7) A. EINSTEIN-M. Born, Briefwechsel 1916-1955 ; Edition Erbrich, Frankfurt am Main, 1982 ; page 298, lettre du 15/4/54.
- 8) J.S. BELL, J. de Phys. Colloques C-2, 45, 41 (1981), page 42.
- 9) Voir 8), page 48.
- 10) B. d'ESPAGNAT, Revue de Métaphysique et de Morale, 86, 379 (1981).
- 11) N. BOHR, Phys. Rev., 48, 696 (1935).
- 12) Voir 2), page 235.
- 13) EINSTEIN-BORN, Correspondance 1916-1955, Seuil, Paris 1972.
- 14) C.S. WU, Phys. Rev., 79, 393, 476 (1936).
- 15) J.S. BELL, Physics, 1, 195 (1964).
- 16) N.D. MERMIN, Am. J. Phys., 49, 940 (1981).
- 17) D. CANALS-FRAU, Lettres Epistémologiques, 34, 1 (1983).
- 18) Voir 15), page 195.
- 19) Voir 8), page 52.
- 20) D. CANALS-FRAU, Ann. Fond. L. de Broglie, 7, 217 (1982).
- 21) Voir aussi : G. LOCHAK, Found. Phys., 6, 173 (1976), Revue de Métaphysique et de Morale, 88, 85 (1983) et diverses livraisons des Lettres Epistémologiques.

- 22) Voir 8), page 51.
- 23) Voir 20), page 227.
- 24) Voir 16), page 940.
- 25) Voir 20), page 232.
- 26) Voir aussi D. CANALS-FRAU, Revue de Métaphysique et de Morale, 89, (N° 3), 405 (1984), article soumis en 1981.
- 27) O. COSTA de BEAUREGARD, Phys. Lett., 50, 867 (1983).
- 28) D. CANALS-FRAU, "A Propos du Critère de Réalité Physique d'EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN" (dans ce même numéro des Ann. Fond. L. de Broglie).
- 29) O. COSTA de BEAUREGARD, Nuovo Cimento, 42 B, 41 (1977).