

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

A propos du critère de réalité physique
d'Einstein, Podolsky et Rosen

par Damian CANALS-FRAU

Institut d'Optique
Université de Paris-Sud
Centre d'Orsay, bâtiment 503
Boîte Postale 43
91406 ORSAY Cedex

(manuscrit reçu le 19 Avril 1985)

Résumé : On montre que le critère de réalité physique d'EPR contient une antinomie.

(Physics Abstracts : 03.65.)

En 1935, EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN (EPR) publièrent un article devenu fameux depuis : Can Quantum-mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?¹⁾ Dernièrement, les travaux de J.S. BELL²⁾ en ont remis le sujet sur le tapis.

Dans leur article, EPR utilisent un critère pour définir une réalité physique, critère qu'ils considèrent comme étant une condition suffisante pour déterminer cette réalité physique.

La présente note a pour objet de montrer que le critère d'EPR est "antinomique" en lui-même.

Le paragraphe de l'article d'EPR définissant le critère (en italique dans le texte) est le suivant* :

"Les éléments de la réalité physique ne peuvent pas être déterminés par des considérations philosophiques *a priori*, mais doivent être trouvés en faisant appel à des résultats d'expériences et de mesures. Toutefois, une définition exhaustive de réalité n'est pas nécessaire à notre propos. Nous nous satisferons du critère suivant, que nous considérons comme étant raisonnable. *Si, sans perturber aucunement un système, nous pouvons prédire avec certitude (c'est-à-dire, avec probabilité égale à 1) la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette quantité physique.* Il nous semble que ce critère, bien que loin d'épuiser toutes les façons possibles de reconnaître une réalité physique, nous fournit au moins une manière de le faire quand les conditions mentionnées sont réunies. Ce critère, qui n'est pas considéré comme une condition de réalité nécessaire mais simplement comme une condition suffisante est en harmonie avec l'idée de réalité de la physique classique comme avec celle de la mécanique quantique."

Je voudrais maintenant attirer l'attention sur la contradiction que renferme ledit critère, contradiction qui est surtout évidente en microphysique. Ma critique sera courte.

*The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.* It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one such way, whenever the conditions set down in it occur. Regarded not as necessary, but merely as a sufficient, condition of reality, this criterion is in agreement with classical as well as quantum-mechanical ideas of reality."

La "valeur d'une quantité physique" est une conséquence, entre autres, de l'action perturbatrice de l'appareil de mesure sur ce qu'on est en train de mesurer.

A première vue, les mesures indirectes pourraient apparaître comme une exception à cette action perturbatrice de la mesure. Mais une analyse détaillée de ces "mesures indirectes" montre qu'elles se réduisent toujours à une mesure ordinaire, c'est-à-dire, à une interaction entre appareil de mesure et chose à mesurer.

Prenons comme exemple la "mesure" de la proportion d'hélium dans une étoile. En fait, ce qu'on mesure c'est le spectre de la radiation qui provient de l'étoile et on le compare au spectre d'une source terrestre qui sert de référence. Après avoir enregistré le spectre, on peut déjà affirmer que l'"étoile" n'est plus la "même" : il lui manquera au moins l'énergie recueillie sur la plaque. L'enregistrement du spectre se réalise avec un spectrographe qui est solidaire de la surface terrestre. Alors, l'étoile et l'appareil de mesure -la surface terrestre avec son spectrographe- sont en mouvement relatif. Il y a donc modification du spectre par effet Doppler, ce qui affectera le calcul de la proportion d'hélium. Si cette perturbation -calculable- est inférieure aux erreurs de mesure, le formalisme classique n'a pas de raison de la prendre en considération. Mais ce qui nous intéresse ici c'est que la perturbation, l'interaction, existe toujours.

Une objection plus sérieuse consiste à dire qu'il y a au moins une exception à l'action perturbatrice de la mesure : le phénomène physique qui se décrit en termes de mécanique quantique comme "la mesure d'une grandeur physique A, effectuée sur un système qui, avant la mesure, est déjà dans un état propre de l'opérateur associé à A".*

Je voudrais montrer pourquoi cette mesure particulière, tout en ne modifiant pas ce qu'on mesure, ne peut être invoquée qu'avec circonspection contre le fait général

*Communication personnelle de B. d'Espagnat.

que l'action de mesurer perturbe la chose qui est mesurée.

Des mesures faites sur des particules de spin $\frac{1}{2}$ nous serviront d'exemple. Supposons que les spins de ces particules se trouvent déjà orientés dans un des deux états quantiques (états propres) définis par la direction du champ magnétique d'un premier Stern-Gerlach. Une deuxième mesure avec un appareil parallèle au premier ne modifiera en rien le résultat de la première mesure : l'action perturbatrice de la deuxième mesure n'aura aucune influence décelable sur les spins de ces particules. Cela permet d'affirmer que la mesure ne perturbe pas toujours la chose à mesurer.

Je pense qu'il ne s'agit pas là, à proprement parler, d'une exception à l'action perturbatrice de la mesure. Car on peut tout aussi bien dire que l'action perturbatrice que la deuxième mesure devrait introduire, n'est pas suffisante pour permettre le saut à l'autre état quantique. Je répète. Pour les particules à spin $\frac{1}{2}$ il y a seulement deux valeurs propres possibles dans un champ magnétique donné. Alors, pour que la perturbation due à la deuxième mesure puisse produire un effet décelable, elle devrait provoquer un saut quantique à l'autre valeur propre possible. Donc, dans notre cas, elle devrait faire un flip-flop. Et l'énergie nécessaire pour faire un flip-flop est largement supérieure à celle qui joue un rôle dans les "interactions physiques" que nous appelons "mesures".

Dans le cas de la polarisation des photons, le phénomène est analogue.

Je peux donc conclure qu'il est contradictoire de dire
et, "valeur d'une quantité physique",
et, qu'on puisse l'obtenir "sans perturbation aucune".

En d'autres mots, le critère en question nous garantit l'existence d'un élément de réalité physique, si deux conditions contradictoires se trouvent réalisées, puisque la valeur d'une quantité physique comprend la perturbation.

D'une autre façon encore. On demande de prédire la conséquence d'une perturbation apportée au système par l'appareil de mesure, sans mettre en jeu précisément la perturbation qui participe (d'une façon ou d'une autre) à la genèse de la "valeur de la quantité physique".

Il me semble alors légitime de conclure que le critère d'EPR est antinomique en lui-même et que par conséquent, il ne peut pas y avoir d'élément de réalité physique basé sur son application. Je pense qu'il ne peut s'agir que d'une spéculation métaphysique³.*

Je voudrais encore rappeler que les valeurs des quantités physiques, avec lesquelles travaille le physicien, sont la conséquence de l'introduction d'une sonde dans le système dont on veut connaître la valeur d'une de ses propriétés. La sonde dérange le système et le signal qu'elle recueille, et qui comprend l'effet du dérangement, finit par déplacer une aiguille devant un cadran (ou appareillage analogue).

Ouvrons une parenthèse. A ceux des lecteurs qui seraient encore tentés de penser que le type de mesure qui nous intéresse dans notre contexte, ne perturbe pas forcément le système qu'il est en train de mesurer, je leur dirai : la sonde de l'appareil de mesure doit obligatoirement recueillir un signal aux dépens du système qu'on mesure. Ce signal (positif ou négatif : la mesure est une interaction), après amplification due à une source d'énergie extérieure au système à mesurer, déplace une partie macroscopique de l'appareil de mesure. Alors, si la sonde ne "prenait" ou ne "donnait" rien au système qu'on est en train de mesurer, nous serions en présence d'une situation physiquement absurde : l'appareil de mesure se "déclencherait" sans aucun apport ou perte d'énergie. C'est-à-dire, sans que le système qu'on mesure ne dépense ou

* Cette critique-ci se limite à attirer l'attention sur le fait que le critère d'EPR n'est pas utilisable pour définir une réalité physique puisque antinomique en lui-même. L'auteur (D.C.F.) ne prend nullement position sur la "signification profonde" du phénomène physique décrit par le mot "corrélation".

reçoive quoi que ce soit. Donc, sa présence ne serait même pas nécessaire : on pourrait à la limite obtenir le résultat d'une mesure sans que le système à mesurer existe.

Il est vrai qu'une mesure sur un système macroscopique permet de tenir plus ou moins compte de l'importance de ce signal pris par la sonde. Ici, "plus ou moins" veut dire "tenir compte macroscopiquement", c'est-à-dire, pas à une particule élémentaire près. Alors, quand on fait des mesures sur ces particules élémentaires elles-mêmes, la perturbation apportée par la sonde est totalement incontrôlable. Fermons la parenthèse.

C'est à partir des indications données par la lecture de la position de l'aiguille que le physicien construit les équations qui servent à décrire notre monde physique. Donc, notre connaissance du monde physique se fait à travers des résultats de mesure. Le physicien n'a pas de réponse à la question de la valeur que la quantité mesurée "aurait pu avoir" avant l'introduction de la sonde. Et si pour une raison quelconque -par exemple, une information donnée par un démon de Laplace ou de Maxwell- il venait à connaître, disons, la "valeur d'une quantité physique avant perturbation par la sonde", il ne pourrait pas l'utiliser dans ses équations, puisque la valeur en question ne serait pas homogène avec les résultats de mesure : elle ne comprendrait pas la perturbation produite par la sonde qui normalement sert à recueillir le résultat de mesure.

Après avoir constaté que le critère d'EPR n'est d'aucun secours pour déterminer des éléments d'une "réalité physique", je pense que nous devons continuer de construire nos équations -les "lois" de la physique- à partir de résultats de mesure. Je laisse les philosophes réfléchir sur la nécessité -ou non- d'une réalité physique autre que celle qui découle des résultats de mesure.

REFERENCES

- 1) A. EINSTEIN, B. PODOLSKY et N. ROSEN, Phys. Rev., 47, 777 (1935).
- 2) J.S. BELL, Physics, 1, 195 (1964).
Voir aussi "Les Implications Conceptuelles de la Physique Quantique", supplément au J. de Phys., 42, N° 3, Colloque C-2. Mars 1981.
- 3) D. CANALS-FRAU, An. Fond. L. de Broglie, 7, 217 (1982),
Revue de Métaphysique et de Morale, 89, (N° 3), 405 (1984).
Voir aussi : "A propos des inégalités de Bell et du "paradoxe" E.P.R. Une courte mise au point de la question".
(dans ce même numéro des Ann. Fond. L. de Broglie).