Annales de la Fondation Louis de Broglie,
Vol. 9, nº 4, 1984

A PROPOS DES EXPÉRIENCES DE TYPE EPR

par F. SELLERI

Dipartimento di Fisica - Università di Bari
INFN - Sezione di Bari (Italie)

(manuscrit reçu le 14 Septembre 1984)

N.D.L.R.- Dans l'éditorial du premier numéro de cette année, nous faisions part à nos lecteurs de l'attitude que nous adoptons lorsqu'un manuscrit qui nous est envoyé pour publication fait l'objet d'objections sérieuses de la part du ou des rapporteurs auxquels il est soumis, sans qu'on puisse pour autant conclure au rejet de l'article : notre politique est alors de le publier, puis de publier la réfutation du rapporteur, et le cas échéant une contre-réponse de l'auteur.

C'est précisément ce que nous faisons ici pour l'article de M. C. Cormier-Delanoue paru dans le volume 9, nº 2, p. 143 ; M. F. Selleri, qui était un de nos rapporteurs, n'était pas d'accord, et il a bien voulu, à notre demande, rédiger in extenso ses objections ; nous l'en remercions vivement. On trouvera à la suite la réponse de M. Cormier-Delanoue.

Dans le papier de M. C. Cormier-Delanoue[1] on essaye de donner une description strictement causale et locale des expériences de type EPR, selon laquelle l'interaction d'un photon avec un polariseur est décrite d'une double façon en même temps déterministe et probabiliste.

1 - D'un côté on introduit une variable cachée λ. Sa nature déterministe entre dans les calculs là où on fait l'hypothèse que pour une orientation arbitraire de l'axe du polariseur il n'y a que deux types de photons : ceux qui

passeront avec certitude et ceux qui seront absorbés avec certitude. Evidemment un comportement *certain* est un comportement *déterministe*.

2 - De l'autre côté on introduit une "polarisation plane équivalente" qui régit par la loi de Malus bien connue la *probabilité* pour que le photon traverse le polariseur sans être absorbé (mieux : la probabilité pour qu'un photon quelconque ait un facteur λ lui permettant de traverser à coup sûr un polariseur placé sur sa trajectoire).

En considérant deux polariseurs PM_1 et PM_2 qui peuvent être placés alternativement sur la trajectoire du photon et les probabilités a priori respectives $P(1)^+$ et $P(2)^+$ pour que le photon les traverse, M. Cormier-Delanoue écrit la formule suivante

$$P(2)^+ = P(1)^+\cos^2\phi + [1 - P(1)^+]\sin^2\phi \pm \sin 2\phi\sqrt{P(1)^+[1 - P(1)^+]} \qquad (1)$$

Ici on ne conteste nullement la validité de cette formule qui est une conséquence légitime de la description probabiliste. D'ailleurs, tout le travail en question est intelligemment conçu et bien écrit. Malheureusement, il y a aussi une erreur qui s'introduit là où on fait la confusion entre la description probabiliste et la description déterministe en posant $P(1)^+ = 1$ pour ceux des photons qui traverseraient à coup sûr PM_1 s'il était en place.

On peut mieux comprendre la question avec l'exemple qui suit : soit $w(i)$ la probabilité de jeter un dé et d'obtenir le résultat "i" ($1 \leqslant i \leqslant 6$). Si le cube est régulier on sait que pour n'importe quel "i" on a $w(i) = 1/6$ d'où on déduit, par exemple, la relation

$$w(3) = w(5) \qquad (2)$$

Mais si on considère les cas où la sortie "3" est certaine (on fait ici la supposition qu'on peut connaître toutes les variables aléatoires qui déterminent le résultat -peu importe que ceci puisse être concrètement fait ou non) et on déduit pour le sous-ensemble de ces cas $w(3) = 1$, on ne peut pas

utiliser (2) et en tirer que $w(5) = 1$ pour le même sous-ensemble !

Il y a dans l'exemple des dés (et dans le papier en question) une confusion conceptuelle entre deux probabilités différentes : la probabilité *a priori*, où on ne connait rien des variables cachées, et la probabilité *a posteriori*, où elles sont connues. Une formule valable pour le premier cas ne l'est pas, en général, pour le deuxième.

Par conséquent, toutes les formules qui suivent l'équation (1) dans le papier de M. Cormier-Delanoue ne sont pas correctes, et on peut en dire autant des conclusions qu'on en tire. Le dramatique problème de la localité et de la mécanique quantique n'est pas résolu et aucune "réhabilitation" n'est possible.

Une autre façon de voir le même problème c'est de raisonner sur le schéma proposé dans le papier en question. Considérons un ensemble de paires de photons décrits par le paramètre λ variable dans l'ensemble Λ. Si sur le trajet des photons on interpose un polariseur dont l'axe est orienté selon la direction x, on peut considérer Λ comme divisé en deux sous-ensembles, Λ_x et $\tilde{\Lambda}_x$, tels que $\Lambda = \Lambda_x \cup \tilde{\Lambda}_x$, et tels que si $\lambda \in \Lambda_x$ (si $\lambda \in \tilde{\Lambda}_x$) le photon passe (est absorbé). Considérons trois valeurs différentes de x ($x = a,b,c$) et appelons m la mesure (probabilité a priori) d'un ensemble. Si on pose

$$m(\Lambda) = 1 \quad ; \quad m(\Lambda_x) = m(\tilde{\Lambda}_x) = 1/2 \qquad (3)$$

et si on considère la situation générale de la Fig. 1,

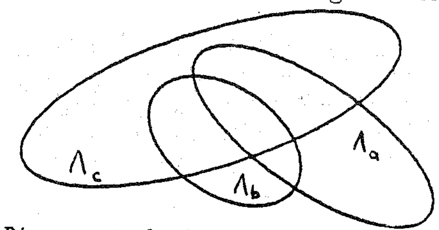

Fig. 1 : Diagramme de Venn pour les trois ensembles Λ_a, Λ_b, Λ_c.

on peut évidemment écrire

$$\frac{1}{2} = m(\Lambda_c) \geqslant m[\Lambda_c \cap (\Lambda_a \cup \Lambda_b)]$$

$$\geqslant m(\Lambda_c \cap \Lambda_a) + m(\Lambda_c \cap \Lambda_b) - m(\Lambda_a \cap \Lambda_b). \qquad (4)$$

Dans une théorie telle que celle dont nous sommes en train de parler ces dernières mesures sont évidemment égales aux probabilités de double transmission des deux photons dans une situation de type EPR. Si nous indiquons avec $T(x, y)$ la probabilité que le premier photon soit transmis par le polariseur avec axe x et que le second photon soit aussi transmis par le polariseur avec axe y, nous pouvons tout de suite déduire de (4)

$$T(c, a) + T(c, b) - T(a, b) \leqslant \frac{1}{2} \qquad (5)$$

Il s'agit essentiellement de l'inégalité de Bell qui a été déduite ici du schéma conceptuel de M. Cormier-Delanoue. Ce même schéma ne peut donc pas être compatible avec la mécanique quantique. Cette théorie prévoit en effet :

$$T(x, y) = \frac{1}{2} \cos^2(x - y) \qquad (6)$$

pour l'état singulet, et on montre aisément que (6) viole (5): si, par exemple, on prend $|c - a| = |c - b| = 30°$ et $|a - b| = 60°$, l'inégalité (5) devient $\frac{5}{8} \leqslant \frac{1}{2}$.

* * *

La tentative de M. Cormier-Delanoue n'est que la dernière d'une série de recherches[2] qui ont essayé de réconcilier la mécanique quantique avec le réalisme local. A mon avis il est abondamment prouvé qu'une telle réconciliation n'est pas possible. On ne peut sortir de cette crise que de l'une des façons suivantes :

1 - Modification de la mécanique quantique. C'était à un certain moment l'opinion de Louis de Broglie[3], et aussi celle de Jauch[4] et de Dirac[5]. A mon modeste avis c'est encore l'issue la plus vraisemblable de la grave crise des fondements de la période actuelle.

2 - Renonciation au réalisme. Déjà, dans sa réponse classique à EPR, Bohr[6] proposait essentiellement cela. La même idée a été redécouverte par des auteurs contemporains[7].

3 - Renonciation à la séparabilité. C'est le point de vue de Bohm et Hiley[8] et de Vigier et collaborateurs[9].

Il va de soi que je ne considère pas du tout comme concluante la situation expérimentale actuelle. On a en effet montré que les expériences de type EPR souffrent de deux types de difficultés : celles de nature strictement expérimentale à cause de la diffusion multiple des photons dans le faisceau[10], et celles de nature plus conceptuelle dues à la petite efficacité des photomultiplicateurs utilisés[11]. En tout cas un nouveau panorama expérimental -cette fois, espérons-le, concluant- devrait bientôt s'ouvrir.

REFERENCES

1. C. Cormier-Delanoue, Violation des inégalités de Bell par les théories déterministes à variables cachées, Ann. Fond. L. de Broglie, Vol. 9, n° 2, 1984

2. L. de la Pena et A. M. Cetto, Lett. Nuovo Cim. 5, 177 (1972)
   J. Bub, Found. Phys. 3, 29 (1973)
   L. de Broglie et al., Found. Phys. 6, 3 (1976)
   G. Lochak, Found. Phys. 6, 173 (1976)
   T.A. Brody, Where does the Bell inequality lead ? IFUNAM preprint (1980)

3. L. de Broglie, C.R. Acad. Sci. 278, 721 (1974)

4. J. M. Jauch, Proc. S.I.F., Corso IL, Academic Press, New York (1971)

5. P.A.M. Dirac, Directions in Physics, H. Hora et J.R. Shepanski ed. Wiley, Sidney (1976)

6. N. Bohr, Phys. Rev. 48, 696 (1935)

7. D. Canals-Frau, Ann. Fond. L. de Broglie, 7, 217 (1982)
   P. Rastall, Locality, Bell's theorem, and quantum mechanics, Univ. of British Columbia, preprint (1984)

8. D. Bohm et B.J. Hiley, Found. Phys. 5, 93 (1975)

9. N. Cufaro Petroni et J.P. Vigier, Phys. Lett. 93A, 383 (1983)

10. F. Selleri, Lett. Nuovo Cim. 39, 252 (1984)
    S. Pascazio, A careful estimate of photon rescattering in atomic cascade experimental tests of Bell's inequality, Bari Univ. prep. (1984)

11. T.W. Marshall, E. Santos et F. Selleri, Phys. Lett. 98A, 5 (1983)
    A. Garuccio et F. Selleri, Phys. Lett. 103A, 99 (1984).