

La “théorie” de Bell, est-elle la plus grande méprise de l’histoire de la physique ?

D. CANALS-FRAU

22, rue d’Athènes, F-75009 PARIS

RESUME. Les inégalités de Bell étant basées sur une formule qui est un paralogisme physique, sa “théorie” ne peut pas prétendre être un théorie physique. Alors ses conclusions n’ont pas de base physique.

ABSTRACT. As the formula which supports Bell’s inequality is based on a physical paralogism, his theory can not pretend being a physical one. So his conclusions do not concern physics.

1

Ces dernières années la “théorie” de Bell a pris une très grande place dans la physique. Même le “Physics and Astronomy Classification Scheme” (PACS) 1990 a une rubrique “Bell inequalities” avec deux codes : 03 65 B, si le contexte est de mécanique quantique et 42 50 W, s’il est d’optique quantique. En relativement peu de temps cette théorie est entrée de plain-pied dans la physique contemporaine.

Nonobstant, on peut affirmer que les inégalités de Bell, et donc sa théorie, ne correspondent à aucune situation physiquement réalisable dans le laboratoire de microphysique et que ses conclusions ne sont pas des suites obligatoires de phénomènes physiques.

Voyons cela d’un peu plus près en reprenant le début de l’argumentation de Bell [1].

¹ En hommage à M. Guido T. Beck (ancien assistant de W. Heisenberg, mon professeur de mécanique quantique et mon premier “patron”, auquel je dois ce que je suis) tué par une voiture dans une rue de Rio de Janeiro, à 85 ans, en plein usage de ses moyens intellectuels.

Il considère une paire de particules de spin $1/2$ dans l'état singulet qui se déplacent dans des directions opposées. Des Stern-Gerlach *peuvent* faire sur ces particules des mesures des composantes des spins $\vec{\delta}_1$ et $\vec{\delta}_2$ d'après les vecteurs unitaires \vec{a} et \vec{b} : $\vec{\delta}_1 \cdot \vec{a}$ et $\vec{\delta}_2 \cdot \vec{b}$. Bell considère que les diverses *paires* de particules sont caractérisées par des paramètres λ différents qui doivent spécifier plus complètement que ne le fait la mécanique quantique, les spins avant mesure. Le résultat A de la mesure $\vec{\delta}_1 \cdot \vec{a}$ est alors déterminé par \vec{a} et λ , et le résultat B de la mesure $\vec{\delta}_2 \cdot \vec{b}$ est déterminé par \vec{b} et λ . Avec

$$A(\vec{a}, \lambda) = \pm 1 \quad \text{et} \quad B(\vec{b}, \lambda) = \pm 1 \quad (1)$$

Si $\rho(\lambda)$ est la distribution de probabilités de λ , avec $\int \rho(\lambda) d\lambda = 1$, alors l'espérance mathématique du produit des deux composantes $\vec{\delta}_1 \cdot \vec{a}$ et $\vec{\delta}_2 \cdot \vec{b}$ est

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

D'après Bell, cela *devrait être égal* (c'est moi qui souligne) à l'espérance mathématique de la mécanique quantique qui, pour l'état singulet, est

$$\langle \vec{\delta}_1 \cdot \vec{a} \mid \vec{\delta}_2 \cdot \vec{b} \rangle = -\vec{a} \cdot \vec{b}. \quad (3)$$

Bell montre ensuite que cela n'est pas possible et affirme qu'“ainsi l'espérance mathématique de la mécanique quantique ne peut pas être représentée ni exactement, ni de façon arbitrairement approchée sous la forme (2).”

Contrairement à l'opinion répandue, je considère qu'il y a ici une certaine confusion dans la formulation de Bell. Cette confusion est sûrement la cause des conclusions, physiquement non établies [2], auxquelles arrive sa théorie : la non-séparabilité et l'influence instantanée à distance.

La confusion provient du fait qu'il assimile la *composante hypothétique* $\vec{\delta}_1 \cdot \vec{a}$ qui joue un rôle dans la formule (3) et qui, en tant que composante hypothétique, n'a pas subi la quantification spatiale, au résultat $A(\vec{a}, \lambda) = +1$ ou -1 de la *mesure* de $\vec{\delta}_1 \cdot \vec{a}$ par un Stern-Gerlach, qui joue un rôle dans la formule (2) et qui est une conséquence de la quantification spatiale. On ne voit donc pas pourquoi les espérances mathématiques (2) et (3) “devraient être égales” et on voit clairement pourquoi elles ne le sont pas.

L’orientation du spin de $\vec{\delta}_1$ (et de $\vec{\delta}_2$) étant inconnue avant la mesure, l’intégrale non écrite, sous-jacente à l’équation (3), fait intervenir la condition que toutes les orientations hypothétiques possibles du spin des particules issues de la “source”, supposée “symétrique”, ont la même probabilité. Avec la restriction que $\vec{\delta}_1$ et $\vec{\delta}_2$ sont antiparallèles puisque dans l’état singulet. On peut tenir compte plus explicitement de cette situation en réécrivant la formule (3) (à la façon de Bell)

$$\langle \vec{\delta}_1(\theta_1) \cdot \vec{a} \mid \vec{\delta}_2(\theta_2) \cdot \vec{b} \rangle = - \langle \vec{\delta}_1(\theta_1) \cdot \vec{a} \mid \vec{\delta}_1(\theta_1) \cdot \vec{b} \rangle = -\vec{a} \cdot \vec{b} \quad (4)$$

où on a mis en évidence des variables θ_1 et θ_2 qui caractérisent les orientations hypothétiques des spins $\vec{\delta}_1$ et $\vec{\delta}_2$ [3]. Ces variables tiennent compte du fait que toutes les orientations hypothétiques ont la même probabilité.

Il est difficile d’argumenter ici qu’on ne peut pas parler de spin avant de l’avoir mesuré. D’abord, parce qu’il est question de particules de spin 1/2, donc on est supposé savoir qu’elles ont un spin. Ensuite, parce qu’on dit qu’elles sont dans l’état singulet donc $\vec{\delta}_1 + \vec{\delta}_2 = 0$. C’est l’orientation du spin qui est inconnue avant la mesure : d’où le mot “hypothétique”.

En revanche, l’intégration en (2) se fait par l’intermédiaire des résultats de mesure $A(\vec{a}, \lambda) = \pm 1$ et $B(\vec{b}, \lambda) = \pm 1$, considérés comme fonctions du paramètre λ . Ici λ ne détermine pas l’état de spin qui correspond à +1 (ou -1), mais est censé spécifier les états de spin avant la mesure : pour un \vec{a} fixe, la formulation (2) suppose que tout un domaine de valeurs de λ donne le résultat de mesure +1, et les valeurs du domaine “complémentaire” donnent le résultat -1. De même pour \vec{b} et B .

Il est intéressant d’observer que l’intégration proposée en (2) perd beaucoup de détails qui, au contraire, contribuent à l’intégration (non écrite) de (3) : toutes les contributions à l’intégrale (3) des composantes hypothétiques $\vec{\delta}_1 \cdot \vec{a} = \cos(\vec{\delta}_1, \vec{a})$ et $\vec{\delta}_2 \cdot \vec{b} = \cos(\vec{\delta}_2, \vec{b})$ qui y participent avec des valeurs différentes de +1 et -1. Dans le langage de l’optique ou de la mécanique quantique on dirait que dans (3) des termes d’interférence peuvent jouer un rôle, ce qui n’est plus possible dans (2) [4].

D’un Stern-Gerlach ne “sortent” que deux groupes de particules de spin 1/2 qu’on peut caractériser par +1 et -1. C’est le phénomène de la quantification spatiale. Et on pourrait interpréter l’équation (2) comme une tentative de spécifier, de préciser les états de spin avant la mesure à partir des résultats des mesures. Mais cela n’est pas possible : nous savons qu’un Stern-Gerlach est un “transformateur” d’orientation de

spin et que cette transformation se fait avec un certain “rendement” [5]. Comme un polariseur linéaire est un transformateur de polarisation avec un “rendement” en polarisation proportionnel à $\cos^2 \phi$, si ϕ est l’angle entre la polarisation incidente et la direction de passage du polarisateur.

On ne peut donc pas, en général, conclure du résultat de la mesure à l’état hypothétique avant la mesure [6]. Ce qui est encore confirmé par le fait que la formule (2) (ou ses conséquences) n’a pas été corroborée par les expériences faites [7]. Au contraire, après normalisation, le carré de (3) décrit correctement les faits expérimentaux.

Vu la parenté entre spin et polarisation, les mêmes remarques sont valables pour le cas des photons émis en cascade.

Il s’avère donc que la formule (2) de Bell ne répond pas à la situation physique qu’on a mise en oeuvre expérimentalement avec des particules en l’état singulet. En fait, cette formulation n’a pas de signification physique pour lesdites particules élémentaires puisqu’elle est basée sur un raisonnement ne tenant compte ni du fonctionnement physique des analyseurs ni des “termes d’interférence”. Termes qui sont présents dans l’équation (3) qui décrit correctement les résultats expérimentaux.

Les inégalités de Bell sont une astucieuse construction mathématique basée sur la fonction $P(\vec{a}, \vec{b})$. D’après Bell, elles conduisent à une impasse suite au fait que leurs prédictions ne coïncident pas avec celles de la mécanique quantique. Résumons avec Bell la logique qui conduit à cette impasse [8].

“Quand les analyseurs sont parallèles, les corrélations EPRB² sont telles que le résultat de la mesure du côté A permet de prédire immédiatement celui du côté B . Si nous ne voulons pas considérer l’intervention sur un des côtés comme une influence causale sur l’autre, cela semble nous obliger à admettre que les résultats des deux côtés sont, d’une façon ou une autre, déterminés à l’avance par des signaux de la source et par le réglage de l’aimant local, indépendamment de l’intervention de l’autre côté. Mais cela a des conséquences qui sont en conflit avec la mécanique quantique pour des réglages non parallèles. Ainsi nous ne pouvons pas écarter l’intervention sur un des côtés comme influence causale sur l’autre.”

Les inégalités étant basées sur la fonction (2), elles subissent le même sort que cette fonction. Par voie de conséquence on peut affirmer que

² Les corrélations EPR dans la version de Bohm [9].

ces inégalités n’ont pas été vérifiées expérimentalement et, d’après ce qui a été dit plus haut, elles ne peuvent pas l’être.

Alors les conséquences qu’on en a tirées : la non séparabilité, la propagation instantanée d’influences, de même que les *spéculation*s sur l’existence d’une “réalité physique objective” [10], ne peuvent revendiquer aucune légitimité physique du fait de la théorie de Bell. Au mieux, il ne peut s’agir que de spéculations métaphysiques.

D’autre part, les expériences faites [7], en principe pour confirmer ou infirmer cette théorie, n’ont pu que confirmer les prédictions de la mécanique quantique. Les expérimentateurs ont mesuré effectivement la corrélation entre particules en l’état singulet.³ Donc aucune conclusion physique sur la théorie de Bell ne peut en être déduite.

Par une ironie du sort, une fois les variables θ_1 et θ_2 mises en évidence, la formulation (4) de la mécanique quantique “spécifie” plus complètement les états de spin avant la mesure que ne le fait la formulation (2) de Bell, dont l’objet était précisément de compléter la mécanique quantique. Il est vrai que les guillemets du mot “spécifie” indiquent qu’il s’agit d’états hypothétiques de l’orientation du spin.

Il est évident que Bell avait le droit de suggérer la description mathématique de son choix, en tant qu’hypothèse de travail. Même si quelques physiciens la considéraient inadéquate [12], pour ne pas dire fausse. Mais quand les expériences ont confirmé cette inadéquation, au lieu de conclure qu’alors l’univers est non-séparable et permet une influence instantanée à distance (“Ainsi nous ne pouvons pas écarter l’intervention sur un des côtés comme influence causale sur l’autre”), il aurait dû conclure simplement : ma formulation (2) n’est pas physiquement correcte. Un point, c’est tout.

Pour être complet, quelques mots sur ce qu’on appelle “non-séparabilité”. Chez beaucoup de physiciens ce mot couvre plus que ce que la physique justifie [13]. Si les physiciens tiennent à garder le nom trompeur de non-séparabilité, alors il faut rappeler que la signification *physique* de ce mot se limite aux conséquences de la conservation du spin global des deux particules depuis la source jusqu’aux Stern-Gerlach, dans le cas des électrons en l’état singulet. Et de la conservation de la polarisation globale des deux photons depuis la source jusqu’aux analyseurs, dans le cas de photons émis en cascade. C’est-à-dire, de simples

³ On peut montrer que dans le cas qui nous intéresse, fonction de corrélation et espérance mathématique coïncident [11].

principes de conservation comme il y en a beaucoup d'autres en physique (comme par ex. si rien n'agit sur un système dynamique il reste dans l'état dans lequel il se trouve), suivis ici par la quantification spatiale dans le premier cas et par la transformation de polarisation par les analyseurs, dans le second [14]. Ces phénomènes physiques sont évidemment tout à fait indépendants de la théorie de Bell et il n'est nullement justifié de leur coller une étiquette qui véhicule l'idée de séparation ou de non-séparation.

Voilà les faits. Analysons maintenant pourquoi cette théorie pseudo-physique a eu un tel impact sur la physique.

Je ne me sens pas qualifié pour apporter une réponse à cette question. Je voudrais quand même aligner quelques observations en laissant aux épistémologues le soin d'en apprécier la pertinence.

Je pense qu'il faut faire une différence entre les premiers partisans de la théorie de Bell, ceux qui, au lieu d'y mettre le holà, ont contribué à la "fonder" ; et ceux qui, postérieurement, ont commencé à construire sur les conclusions de Bell en admettant d'emblée qu'elles s'appuyaient sur des résultats expérimentaux. Ceux qui forment le deuxième groupe n'ont qu'une faible responsabilité : ils ont basé leurs travaux sur des études antérieures publiées dans des revues sérieuses et qui "avaient l'air" d'être correctes. On peut seulement regretter qu'ils n'aient pas crû nécessaire de vérifier par eux-mêmes, la validité physique de l'équation de base de Bell.

L'argument que "les travaux sur la théorie de Bell doivent être corrects puisqu'ils ont été publiés dans des revues sérieuses" est entaché, en fait, d'un défaut logique qui s'apparente à la pétition de principe : l'auteur qui a basé son travail sur les conclusions de Bell ou de ses premiers partisans, soumet son manuscrit à une revue sérieuse, qui désigne un referee. Referee choisi parmi les "spécialistes" de la théorie de Bell. Donc au début, l'un de ceux qui ont participé à la mise sur pied de cette théorie. Evidemment, le rapport du referee sera positif et le travail sera publié. Ainsi le nombre de "spécialistes" de la théorie de Bell augmente, de même que le nombre de travaux basés sur les conclusions de Bell. D'où une sorte de cercle vicieux puisque tout travail qui met en doute les conclusions de Bell sera refusé. Chaque referee étant toujours partisan de la théorie de Bell, donc juge et partie. Ses "oeillères" de spécialiste l'empêchent de voir et de comprendre tout raisonnement qui met en doute la "démonstration" de Bell et qui dévaloriserait sa spécialité. Par voie de conséquence, ce sont les adeptes de cette théorie

qui décident de ce que la masse de physiciens *doit* lire ou ne *doit pas* lire sur Bell. D'où une paupérisation de la littérature physique, privée de la stimulation de toute mise en cause. Le progrès de la vraie théorie physique a été barré pendant des années par de tels errements [15].

Maintenant tâchons de comprendre pourquoi les premiers partisans de la théorie de Bell n'ont pas vu que sa théorie n'avait aucune base physique. Pendant longtemps ce fait m'a laissé perplexe vu la qualité de ceux qui ont “poussé à la roue” pour établir cette théorie. Une phrase lue dans l'autobiographie d'Einstein [16] m'a mis sur une piste. Isolée de son contexte et en traduction libre cette phrase dit : “...même des chercheurs avec un esprit de grande envergure et un instinct sûr, peuvent être inhibés dans l'interprétation de *faits physiques* par des préjugés philosophiques”. (C'est moi qui souligne).

Je suggère donc l'interprétation suivante. Les premiers adeptes de cette théorie étaient des physiciens éminents qui, dans leur for intérieur, étaient probablement aussi adeptes de la doctrine philosophique qui suppose l'existence d'une réalité physique objective.⁴ Comme par exemple, Einstein après (disons) 1915, et en particulier dans son travail avec Podolsky et Rosen (EPR) [17]. Les conclusions de Bell allaient dans le sens de ce qu'attendaient EPR dans leur formulation de ce qui allait devenir le “paradoxe EPR”. C'est-à-dire : ou l'existence d'une “réalité physique objective” ou une “incomplétude” de la mécanique quantique. Ainsi les premiers adeptes de cette théorie se sont trouvés inhibés par leurs préjugés philosophiques de voir le fait physique, il est vrai assez subtil, que la théorie de Bell n'avait pas d'assise physique. Ils ont été obnubilés par la possibilité que semblait offrir Bell avec ses inégalités : amener sur le terrain expérimental le dilemme posé par EPR. Ce qui aurait mis fin à une polémique épique, née dans les années 20 par le refus d'Einstein d'admettre la nouvelle méthodologie physique [18]. Méthodologie qui en grande partie était son propre enfant [19]. On comprend que pour nos physiciens-philosophes, qui dans le plus profond d'eux-mêmes n'ont jamais voulu admettre que la problématique d'EPR n'était qu'une problématique purement métaphysique, l'enjeu était de taille. D'où sans doute leur inhibition pour voir la subtile méprise de Bell.

⁴ Pour le profane : le physicien n'a aucune donnée expérimentale qui lui permet d'évoquer une “réalité physique objective”, c'est-à-dire indépendante de tout observateur.

Une fois les résultats expérimentaux confirmés sans aucune possibilité de doute, ces résultats ont été interprétés comme un désaveu de Bell quant à sa prétention de compléter la mécanique quantique, et comme un acquis positif quant à la “non-séparabilité”, la propagation instantanée d’influences et *peut-être* comme un premier pas vers une espèce de reconnaissance d’une réalité physique objective [10].

Mais nous avons vu que la théorie de Bell n’a pas d’assise physique et les expériences faites n’ont que confirmé les prédictions de la mécanique quantique. Donc, aucun concept issu de cette théorie ne peut avoir cours dans des discussions scientifiques à propos de phénomènes physiques. Ce qui nous oblige à répondre par l’affirmative à la question posée dans le titre de cette note.

Références

- [1] J.S. Bell, *Physics*, **1**, 195 (1964).
- [2] E. Bitsakis, *Ann. Fond. L. de Broglie*, **15**, 35 (1990) p. 55. D. Canals-Frau, *Ann. Fond. L. de Broglie*, **11**, 301 (1986) p. 304.
- [3] D. Canals-Frau, *Ann. Fond. L. de Broglie*, **14**, 263 (1989) p. 270.
- [4] O. Costa de Beauregard, *Nuovo Cimento*, **42B**, 41 (1977), chap. II.
- [5] Feynman, Leighton, Sands, *The Feynman Lectures on physics III*, Addison-Wesley, Reading, 1965, p. 5-5.
- [6] G. Lochak in *The Wave-Particle Duality*, S. Diner, D. Fargue, G. Lochak et F. Selleri, éd., Reidel, Dordrecht, 1984, p. 15.
- [7] L. Kasday, *Fondamenti di Meccanica Quantistica* cours 49 de l’école “Enrico Fermi”, Academic Press, 1971. J.F. Clauser, *Phys. Rev.*, **6**, 49 (1972). S.T. Freedman, J.F. Clauser, *Phys. Rev. Lett.*, **28**, 938 (1972). J.F. Clauser, *Phys. Rev. Lett.*, **36**, 1223 (1976). E.S. Fry, R.C. Thompson, *Phys. Rev. Lett.*, **37**, 465 (1976). M. Laméhi-Rachti, W. Mittig, *Phys. Rev. D*, **14**, 2543 (1976). A. Aspect, *Phys. Lett. A* **54**, 117 (1975), *Phys. Rev. D*, **14**, 1944 (1976) ; Thèse, Institut d’Optique, Université de Paris-Sud, 1983. A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 460 (1981) **49**, 91 (1982).
- [8] J.S. Bell, *J. de Phys. Colloques C-2*, **42**, 41 (1981), p. 52.
- [9] D. Bohm, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1951.
- [10] B. d’Espagnat, *Une incertaine réalité*, Gauthier-Villars, Paris, 1985, chap. 10.
- [11] Réf. 7, A. Aspect, Thèse, p. 20.
- [12] Je ne connais que quatre cas. Deux articles dans *Found. of Phys.* : J. Bub, **3**, 29 (1973) et G. Lochak, **6**, 173 (1976). Le début de l’article d’O. Costa de Beauregard, réf. 4 et une lettre de V. Weisskopf dans *Scientific American*, May 1980.
- [13] Réf. 10, p. 116.
- [14] Voir l’interprétation physique des corrélations EPR, réf. 3.

- [15] Font l'exception les referees des Annales de la Fondation Louis de Broglie qui, par leur indépendance d'esprit, ont sauvé l'honneur de la physique dans cette affaire.
- [16] Albert Einstein, philosopher-scientist, Tudor Publ. Com., New York, 1951, p. 48.
- [17] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Phys. Rev., **47**, 777 (1935).
- [18] Le volume hommage à Einstein (réf. 16) traite de cette question.
- [19] D. Canals-Frau, Ann. Fond. L. de Broglie, **14**, 33 (1989).

(Manuscrit reçu le 18 juillet 1990)