

SPEAKABLE AND UNSPEAKABLE IN QUANTUM MECHANICS

Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, J.S. BELL – 1 Vol. 15x23 cm de 212 pages avec figures – Cambridge University Press, 1987.

La lecture de ce recueil d'articles composés entre 1964 et 1987 par l'auteur du célèbre théorème énonçant l'incontournable non-séparabilité, ou non-localité, inhérente à la mécanique quantique doit être recommandée à quiconque s'intéresse à la philosophie des sciences contemporaines.

Remarquant que la simple existence de la théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie (1927) et de David Bohm (1952) suffit à invalider la soi-disant "impossibilité des variables cachées" déduite par J. von Neumann (1932) et par Jauch et Piron (1963), Bell cherche, et trouve, la faille de l'argument, non pas, bien sûr, dans le raisonnement, mais dans les prémisses invoquées.

Voisines, ces deux déductions postulent une additivité des valeurs moyennes peu conforme à l'esprit de l'entreprise, mais, surtout, *calquée sur celle existant spécifiquement en mécanique quantique*. De ce fait l'argument est dangeureusement proche de la circularité. Quant à un autre argument, basé sur un théorème de Gleason (1957), Bell le réfute d'une manière subtile en mettant en évidence le noeud du débat : pour conclure à un "déterminisme local" sous-jacent, il faut postuler que le résultat d'une mesure portant sur une "observable" ne dépend pas des résultats d'autres mesures effectuées sur le système, – ce qui est faux en mécanique quantique. *La "non-séparabilité" est donc inhérente à la mécanique quantique*; on peut le vérifier, avec Bell, en examinant l'équation de Schrödinger pour un système de deux particules. Or, cette non-séparabilité est inhérente aussi à la "théorie de l'onde pilote", qui n'est en somme qu'une manière de reformuler et d'interpréter l'équation (non-relativiste) de Schrödinger.

Ces arguments, présentés aux Chapitres 1 et 17, sont de purs bijoux de philosophie des sciences.

Le Chapitre 2 reproduit le fameux article de 1964 articulant le "théorème de Bell" qui, sur un exemple concocté *ad hoc*, établit textuellement ceci : on ne peut pas reproduire exactement les conséquences numériques de la formule quantique donnant la probabilité conditionnelle mutuelle de "A si C" ou de "C si A" au moyen d'une formule du type "correspondant" valable en calcul des probabilités classique.

Par exemple, en mécanique statistique de Boltzmann, les états de mouvement de deux molécules A et C s'étant choquées en B dépendent univoquement

de leur mutuelle relation en B , un état considéré comme “réel mais caché” à l’observation macroscopique. La *probabilité* conditionnelle réciproque de “ A si C ” ou de “ C si A ” est de la forme

$$(A | C) \equiv (C | A) = \sum (A | B)(B | C) \quad (1)$$

impliquant une somme sur les “états réels cachés” possibles. Or, selon “l’interprétation statistique de la mécanique ondulatoire ou quantique” proposée par Born (1926) et systématisée par Jordan (1926), *l’amplitude* conditionnelle réciproque, complexe, de “ A si C ” ou de “ C si A ” relative à deux observations possibles effectuées sur deux particules “corrélées” issues d’une source B s’écrit

$$\langle A | C \rangle = \langle C | A \rangle^* = \sum \langle A | B \rangle \langle B | C \rangle ; \quad (2)$$

mais la sommation en B ne peut *pas* être pensée comme impliquant des “états réels cachés” dans la source. En effet, Born et Jordan lient la *probabilité* à *l’amplitude* suivant

$$(A | C) = |\langle A | C \rangle|^2 ; \quad (3)$$

la substitution de (2) dans (3) fait apparaître des termes croisés contenant les différences des phases, c’est à dire un phénomène algébriquement semblable à une *interférence* ondulatoire, géométriquement très “paradoxal” en ceci que les deux mesures A et C peuvent être arbitrairement distantes l’une de l’autre. C’est la *non-séparabilité quantique*.

Donc, “mettant les points sur les i ”, le théorème de Bell énonce *l’incompatibilité* quant à leurs conséquences numériques de formules *des types* classique (1), et quantique (2) compte tenu de (3) – un résultat qui a fait sensation, preuve sans doute, que la “non-séparabilité” est aussi provocante au sens commun de notre temps que l’héliocentrisme le fut à celui du temps de Copernic.

Une autre interrogation récurrente chez Bell concerne l’harmonisation des deux théories, des quanta et de la relativité.

Fidèle en un sens à Bohr, qui par principe tenait à exprimer les étrangetés du niveau quantique en termes d’expérimentation (et d’expérience vécue) du niveau macroscopique, Bell pense toujours la relativité en termes de “Lorentz-invariance”, c’est à dire d’invariance des lois *macroscopiques* sous les *rotations* (hyperboliques) du tétrapode spatio-temporel de Poincaré ; celles-ci, on le sait, sont “orthochrones” : elles ne peuvent pas retourner l’axe du temps. Or, *tous* ceux *sans exception* qui prennent “dramatiquement” au sérieux les exigences de la relativité en mécanique quantique constatent que la “conciliation relativité-quanta” n’est possible *que si* l’invariance relativiste est assimilée à la “Lorentz-et-Lüders invariance”, impliquant les rotations *et* les “réflexions fortes” du tétrapode (Lüders, 1952). S’il s’agit d’*interpréter* la mécanique quantique jusque (bien sûr) dans ses plus dérangeantes implications, *il semble naturel d’appuyer le discours sur le formalisme spécifique de la théorie à interpréter*.

Ce n'est pas ce que fait Bell, et il est permis de penser que l'avenir le lui reprochera.

Bell, remarquant que la mécanique quantique est une théorie de l'*observation* des microphénomènes, a la nostalgie d'une *ontologie* ainsi perdue. Il voudrait bien pouvoir rétablir, au delà des "observables", ce qu'il appelle curieusement des "existables". Comme tous ceux qui réfléchissent (et ne se contentent pas de calculer) il est gêné par la perpétuelle diplomatie du "parlable" et du "non-parlable" en mécanique quantique.

Copernic (après Aristarque) a lancé le paradigme de l'héliocentrisme ; Einstein (après Voigt, Larmor, Lorentz, Poincaré) celui des temps relatifs. Quel est donc le paradigme qui cherche si laborieusement à déplier les ailes de sa chrysalide, *formalisées* par Dirac et par Feynman, après Born et Jordan ?

D'après la formule (3), pour dévoiler le résultat *aléatoire* d'une mesure, il faut couper les relations de phase – trancher le Noeud Gordien, en quelque sorte, pour descendre du plan complexe sur l'axe réel. Ce "réel" là ne peut *pas* être un "existant", puisqu'il est de la nature d'une *approximation* d'être subjective ! J. von Neumann (1932) définit l'entropie quantique d'un *ensemble* (encore un être de raison), c'est à dire aussi l'information (changée de signe) acquise lors d'une mesure, en prenant la trace l'opérateur statistique (multiplié par son logarithme). De cette manière aussi l'*acte* de mesure est défini par l'ablation des phases.

Le "*collapse du vecteur d'état*" (comme on dit dans le jargon) n'est donc pas un phénomène physique ; c'est une *interaction psycho-physique*, impliquant (Wigner (1967) y insiste) – action et réaction. Comment alors se fait-il que cette *information à double face* (connaissance et organisation) devienne *intersubjectivité* ? L'implication est qu'à la non-séparabilité physique doit être associée une non-séparabilité psychique ; une forme toute nouvelle de physico-psycho-parallélisme se dessine là.

La formalisation des "existables" devrait-elle donc se faire dans le plan complexe ? Devant les perplexités de Bell, et de tant d'autres, quant à l'interprétation de la mécanique quantique, je sou mets cette interrogation à ceux qu'aura captivés la lecture du "parlable et du non-parlable en mécanique quantique".

O. Costa de Beauregard
Institut H. Poincaré
 11 rue P. et M. Curie, 75005 Paris

Post-Scriptum: CONTRACTION DE LORENTZ ET ABERRATION DE BRADLEY

Dans son recueil consacré aux problèmes d'interprétation de la mécanique quantique, Bell [1] intercale l'article "Comment enseigner la relativité restreinte", qui me semble parfois discutable.

En hors d'oeuvre il propose un apologue équivalent à ceci : arrêté en Gare d'Austerlitz le métro est bondé. A l'heure H il démarre, les deux motrices de tête et de queue accélérant "suivant des programmes identiques" : identiques *en termes du référentiel lié à la voie*. Cela est arbitraire : deux programmes liés *en termes du référentiel lié au train* serait plus physique.

Peut-on accélérer une rame de métro en maintenant inchangée sa longueur propre? Certainement. Dans l'espace-temps, les arcs de courbe reliant les droites du genre temps figurant les états inertiels, initial et final, de chaque élément de la rame devront être des arcs d'hyperbole équilatère, impliquant que, ce-pendant, l'accélération normale est constante. De la sorte, la rame accélère d'un seul bloc, sa longueur propre restant inchangée (Figure 1). C'est ce qui n'a pas lieu avec la prescription de Bell.

Bell argue ensuite que, regardé du Pont d'Austerlitz alors qu'il traverse le pont de Bercy à la vitesse $v = c\beta$, le métro est vu "Lorentz-contracté", en sorte que, si ses attelages n'ont pas cassé, il est distendu, et les voyageurs aussi. La vérité est *qu'il n'est pas vu Lorentz-contracté mais, du fait de l'aberration de Bradley, tourné de l'angle $\alpha = \arctg \beta$* . C'est ce qu'explique Terrell [2] dans un article intitulé "inobservabilité de la contraction de Lorentz".

L'explication est obvie : *à l'instant où il est vu du Pont d'Austerlitz le métro n'est plus là où il est vu*; de même qu'un chasseur (je n'en suis pas un) doit viser en avant un lièvre au galop, de même les photons issus du métro doivent être émis sous l'angle α pour atteindre l'observateur. Il s'ensuit que la face *arrière* du train, de largeur l , est visible, et vue avec une largeur $l \sin \beta$; et que son côté gauche, de longueur L , est vu contracté, et vaut $L \cos \beta \simeq L(1 - \beta^2/2)^{1/2}$: la "contraction de Lorentz" (Figure 2).

J'ai discuté ce phénomène dans mes deux livres [4] pp. 45-48 et [5] pp. 58-61.

A la question de Bell "Comment enseigner la relativité restreinte" ma réponse personnelle serait donc : *Toujours penser, et toujours calculer, en termes de géométrie spatio-temporelle*. C'est ce qu'a conseillé Poincaré [6], mais ce qu'il n'a pas fait dans ses études philosophiques.

Références

- [1] J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, (1987).
- [2] J. Terrell, *Phys. Rev.* **116**, 1041-1245 (1959).
- [3] R. Penrose, *Proc. Camb. Phil. Soc.* **79**, 137-139 (1959).
- [4] O. Costa de Beauregard, *Precis of Special Relativity*, Academic Press, New York (1966).
- [5] O. Costa de Beauregard, *Time, The Physical Magnitude*, Reidel (1987).
- [6] H. Poincaré, *Rendic. Circ. Mat. Palermo* **21**, 129-175 (1906).

O. Costa de Beauregard
Institut H. Poincaré
 11 rue P. et M. Curie, 75005 Paris

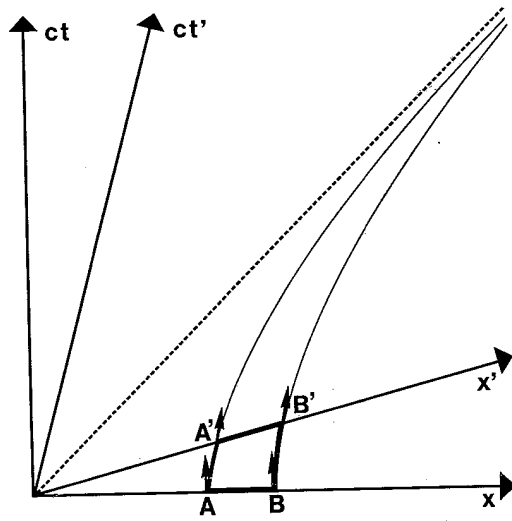


Figure 1.

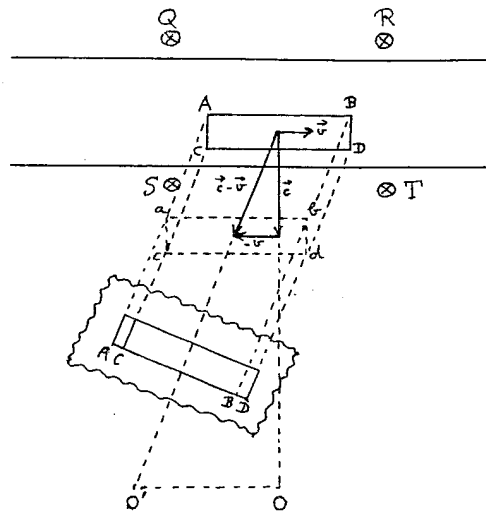


Figure 2.