

## Le dualisme onde-particule et les probabilités quantiques

O. COSTA DE BEAUREGARD

Fondation Louis de Broglie, 23 rue Marsoulan, 75012 Paris

RESUME. Le postulat statistique de Born, clé de voûte du *dualisme onde-particule*, définit un *nouveau calcul ondulatoire des probabilités* additionnant les *amplitudes* partielles et multipliant les *amplitudes* indépendantes. Synthétisé par Dirac, puis doté par Feynman de la Lorentz et CPT invariance, ce schème définit le code d'un télégraphe qui, affichant la réciprocité connaissance-organisation, illustre l'énoncé par Wigner d'une symétrie connaissance-psychocinèse. Un test est proposé via la « non-séparabilité ».

### 1 Le paradigme du dualisme quantique

Le *quantum d'énergie*  $W=h\nu$  de Planck, promu *quantum d'impulsion-énergie*  $p^i=\hbar k^i$  du photon d'Einstein, impose à l'onde la compagnie d'une particule. Réciproquement l'assimilation par Louis de Broglie via  $h$  des principes d'extremum de Fermat et de Maupertuis impose à toute particule la compagnie d'une *onde matérielle*.

*C'est un coup d'état*, promulguant la règle d'un nouveau « Jeu de Dés ». Entre le continu et le discret la physique connaît un factotum, *la probabilité*. En 1926 Born (inspiré, dira-t'il plus tard, par les calculs d'Einstein concernant le photon) ajoute sa « cerise sur le gâteau »: *l'intensité de l'onde exprime la probabilité de manifestation de la particule*. L'expérience confirme.

Abrogeant le principe d'addition des probabilités partielles, Born décrète celui *d'addition des amplitudes partielles*; abrogeant aussi le principe de multiplication des probabilités indépendantes, il décrète celui *de multiplication des amplitudes indépendantes*. Dans ce *calcul ondulatoire des probabi-*

*lités l'interférence* intervient partout, d'où mille et un *paradoxes formalisés par les équations*.

Le gros *paradoxe* est celui-ci. Dans notre contexte familier, qui était encore celui de la physique pré-quantique, le *calcul des probabilités* défini par Cardano, puis Pascal et Fermat, fonctionne à merveille. Mais au niveau quantique c'est le déconcertant *calcul ondulatoire des probabilités* qui a cours.

Le *Théorème de Bell* met les points sur les *i*. Il déduit de postulats *contre-disant ceux des quanta* une « inégalité » maintes fois testée, et autant de fois réfutée. Pour franchir le canyon séparant le micro- du macro-niveau « les théories à variables cachées » proposent des calculs tirés d'hypothèses ad hoc, non-relativistes en général. Dans l'autre sens, il faut évidemment expliquer comment les *relations de phase, omniprésentes au niveau quantique*, s'effacent au macro-niveau par un jeu de moyennes.

Omniprésente au micro-niveau, la *non-séparabilité* selon Born signifie que, sous-tendant l'ancienne vue du monde, il y a une *terra incognita* où « Dieu joue aux dés » selon des règles surprenantes.

## 2 Bref rappel du calcul classique des probabilités

Énoncé à propos des jeux de hasard par Cardano, puis Pascal et Fermat, le Calcul des Probabilités repose sur deux principes: addition des probabilités partielles, multiplication des probabilités indépendantes.

Le principe de Bayes y formule symétriquement la probabilité jointe de deux occurrences corrélées. Si la corrélation opère à travers le temps il s'ensuit une réversibilité passé-futur de droit. Mais une chose est le droit, autre chose la jurisprudence. Dans le contexte usuel un calcul prédictif va pour ainsi dire de soi, tandis qu'un calcul rétrodictif demande du flair; ceci se rattache au fait que dans le contexte usuel la cause efficiente est beaucoup plus manifeste que la cause finale d'Aristote.

La jurisprudence proposée par Bayes consiste en l'estimation des probabilités a priori, l'initiale et la finale. Pour les classiques c'était le problème dit de la probabilité des causes, étant sous-entendu que « la causalité s'exerce du passé vers le futur ».

Derrière le concept de la probabilité se profile celui de l'information. Chez Aristote il a deux sens « inverses » qu'a retrouvés la cybernétique, où le codage imprime une organisation et le décodage exprime une connaissance.

En mécanique statistique de Boltzmann le calcul de probabilités exprime au micro-niveau un défaut d'information, à la fois connaissance incomplète

et contrôle imparfait. Boltzmann assimile l'entropie thermodynamique au logarithme de la probabilité.

Ce schème entrelace les deux réversibilités de droit, celle de l'évolution mécanique et celle de l'inversion bayésienne. Un vif échange entre Boltzmann et Loschmidt s'ensuivit. Loschmidt: « Vous prétendez déduire statistiquement l'irréversibilité thermodynamique, mais c'est impossible, parce que les équations de Newton sont réversibles. Si à un instant  $t$  l'on retourne exactement les vitesses de ses molécules un gaz retraversera en sens opposé ses états antérieurs ». Boltzmann : « Chiche, faites le donc ! ».

Il y a le droit, et il y a la jurisprudence. En 1913 van der Waals formalisera la dispute en termes Bayésiens.

Comment la physique exprime-t'elle cette jurisprudence ? Peu réceptifs à la métaphysique « les physiciens au nez dur » le sont aux arguments opérationnels. Le problème relève ici d'une discussion des unités pratiques.

L'unité d'information, le bit, est adaptée à la logique du oui ou non. L'unité d'entropie, disons le clausius, a des origines historiques. On la tire par exemple de l'équation des gaz parfaits  $pV = RT$ , ou de fait la constante  $R$  est un nombre petit -les classiques auraient pu poser  $R = 1$  par définition de la température lue sur un thermo-mètre à gaz parfait. Or, le facteur de conversion entre une information  $I$  et une néguentropie  $N$  est  $k \log 2$ , où  $k = R/A$  note la constante de Boltzmann et  $A$  le nombre d'Avogadro « qui est très grand parce que les molécules sont très petites ».

De fait un clausius vaut donc beaucoup de bits: « la connaissance est très bon marché, mais l'organisation hors de prix ». La « théorie de la conscience épiphénomène », qui tenait la connaissance pour gratuite et l'action libre pour illusoire, posait implicitement  $k = 0$ . Pour la cybernétique,  $k$  est non-nulle mais très petite.

En d'autres termes, si « l'acquisition de connaissance est normale la psychocinèse est paranormale ». C'est ce que dira Wigner dans le contexte de la mécanique quantique, mais le problème se posait déjà en théorie classique.

### 3 Le postulat de Born clé de voûte du dualisme onde-particule

En 1926 la physique des quanta poursuivait sa vie toujours sensationnelle, vérifiant les phénomènes formalisés par les Heisenberg, Schrödinger, Dirac. Mais Il manquait encore à l'omniprésent *dualisme onde-particule* sa clé de voûte: *la probabilité selon Born*.

Le *calcul ondulatoire des probabilités* reformule l'association des deux réversibilités de droit: l'onde retardée sert à la prédiction, l'onde avancée à la rétrodictioin. Son schème, formalisé par Dirac, reçut ensuite de Schwinger, Feynman, Dyson, une *explicité Lorentz et CPT invariance*, et même une

*invariance topologique entre préparations et mesures, codages et décodages. Le graphe de Feynman figure la toile d'un télégraphe spatio-temporel réversible ; son code formalise la « non-séparabilité » stigmatisée par Einstein au 5<sup>ème</sup> Conseil Solvay.*

On argue ici que, tout comme le *principe d'inertie de Galilée*, celui de la *réversibilité cause-effet* exprime un droit universel aux conséquences en fait parasitées dans le contexte usuel : pour le bon sens « il est clair qu'un corps soustrait à toute force reste au repos » mais moins évident qu'il puisse être en mouvement uniforme » ; ceci, du fait que maintes forces opèrent dans l'environnement, notamment les forces du genre friction.

On argue ici que la *rétrocausation*, symétrique en droit à la *causation retardée*, est mise en évidence par la *non-séparabilité quantique*, par exemple dans l'expérience à double décision différée d'Aspect. *Qu'il soit bien clair que cette rétrocausation ne porte pas du tout sur des objets au sens usuel, mais sur des phénomènes sui generis étiquetables en coordonnées spatio-temporelles.*

Par exemple, dans l'expérience pensée de Heisenberg de 1927, variante de celle d'Einstein, un faisceau laser scindé par une lame semi-transparente est reçu par deux photodétecteurs A et B. Comment concevoir la *corrélacion* que si un photon est reçu en A il ne l'est pas en B, ou *vice versa* ? *Il est absolument exclu de dire que « le photon tombant sur la lame choisit au hasard la voie A ou la voie B »* parce que, depuis Fresnel, le *calcul des deux intensités, transmise et réfléchi, se fait par l'optique ondulatoire: il y a sur la lame des termes croisés de style interférentiel. L'occurrence aléatoire surgit à la détection ; c'est là que le photon se concrétise.*

*Lues à la lettre les équations disent donc ceci: il y a sur la lame une interférence qui y est rétro-télégraphiée depuis les deux détections-ou-non-détections. Aucune échappatoire n'est possible. Mais ni Einstein, ni Bell, ni Shimony, pour ne citer que ces noms éminents, n'ont tiré cette conséquence des équations.*

#### **4 La mécanique quantique relativiste comme télégraphe spatio-temporel**

Le graphe de Feynman illustre la recette d'un calcul Lorentz et CPT invariant de *l'amplitude de transition corrélant N préparations et mesures - rétropréparations* dira Hoekzema. Les deux versions Fourier associées, espace-temps ou 4-fréquence, formalisent le code d'un télégraphe spatio-temporel. *L'interférence*, affichée sur le graphe, exclut que celui-ci puisse figurer un « réel autoporteur » au sens ancien. Disons que *le codage imprime une réali-*

sation et que le *décodage exprime une représentation*. Plutôt qu'à un « réel voilé », le monde serait assimilable à un *inconscient collectif* à la Jung.

Que l'on me permette une anecdote. Vigier, rencontré à l'Institut Henri Poincaré, me dit à propos de l'interprétation rétrocausale de la non-séparabilité: « Je ne peux ni réfuter votre argumentation ni l'accepter, parce qu'elle justifierait le paranormal ».

## 5 Le collapse du PSI

Les classiques tenaient pour subjective l'*occurrence aléatoire* apparue lors d'un test; ils l'assimilaient à une *ré-estimation de l'information-connaissance*, à « une meilleure approximation de la représentation du réel ».

Mais il advint que plusieurs des promoteurs de la « nouvelle mécanique quantique » associèrent à la *ré-estimation de l'amplitude  $\phi$  de l'onde*, à son *collapse*, un *changement d'état* du micro-système. Ceci se justifie par le fait qu'un système *préparé* dans l'état  $\langle \phi |$  puis *mesuré* dans l'état  $|\phi\rangle$  n'est *ni dans l'un ni dans l'autre* « état », mais dans une *superposition interférentielle*  $\langle \phi | \phi \rangle$ .

Ainsi, en corollaire à la *réactualisation de la connaissance*, il y aurait une *modification de la réalisation*, une *psychocinèse*. Cela, Wigner<sup>1</sup> le propose explicitement, ce qui indigna Jaynes<sup>2</sup> comme « une confusion entre ontologie et épistémologie », et même comme « un désordre psychiatrique » dans l'École de Copenhague. Les « paradoxes » du *chat de Schrödinger* et de l'*ami de Wigner* illustrent le dilemme.

*L'hypothèse est testable*; Schmidt<sup>3</sup> l'a fait dans une forme édulcorée du « chat de Schrödinger », avec l'aide d'un générateur aléatoire. Une enceinte contient une atmosphère soit agréablement sèche et chaude soit désagréablement humide et fraîche. Si un chat y est enfermé, l'expérience montre que la première option est statistiquement favorisée.

## 6 Non-séparabilité, psychocinèse, télépathie, précognition

Revoyons l'exemple de Heisenberg illustrant la non-localité. Deux photocompteurs A et B reçoivent les faisceaux « d'égales intensités » issus d'un séparateur S. Si alors un « agent » augmente ou diminue à volonté le nombre de photons captés en A par unité de temps, le nombre de photons captés en B sera *corrélativement* diminué ou augmenté d'autant. Ceci équivaut à une télégraphie supralumineuse violant l'interdit de Shimony selon lequel « la non-localité est une passion, non une action à distance » : l'observation est passive, la psychocinèse active. Incidemment, au lieu d'une télégraphie

supra-lumineuse on peut avoir une rétro-télégraphie si l'on « plie » le faisceau SA au moyen de miroirs.

Ainsi, la *Lorentz et CPT invariance* de la mécanique quantique relativiste, avec en corollaire l'*invariance topologique sous l'échange codage-décodage*, « rationalise le paranormal », et permet psychokinèse, télépathie, précognition

### Références

- [1] E. P. Wigner, *Symmetries and reflections*, M.I.T. Press Cambridge Mass. 1967, 184.
- [2] E.T. Jaynes, *Clearing up mysteries*, in *Maximum entropy and Bayesian methods*, J. Skilling ed., Kluwer, Dordrecht, 1978, 1.
- [3] A. Shimony, *Controllable and uncontrollable nonlocality* in *Foundations of quantum mechanics in the light of new technology*, S. Kamefuchi et al eds, Phys. Soc. Japan, Tokyo 1983, 225.
- [4] H. Schmidt, cité par S. Ortolí et J. P. Pharabod in *Le Cantique des quantiques*, Editions La Découverte, Paris 1984, p. 72.

(Manuscrit reçu le 28 septembre 2005)