

OLIVIER COSTA DE BEAUREGARD

UN PROBLÈME BRÛLANT :
LE PARADOXE DES CORRÉLATIONS
A DISTANCE D'EINSTEIN

Extrait de *DIOGÈNE*, n° 110

Avril-Juin 1980

1, rue Miollis, 75732 PARIS CEDEX 15

UN PROBLÈME BRÛLANT :

LE PARADOXE DES CORRÉLATIONS
À DISTANCE D'EINSTEIN

par

OLIVIER COSTA DE BEAUREGARD

En 1927, au V^e Conseil Solvay qui réunissait tout le Gotha de la physique théorique, Einstein, penché sur le berceau de la « nouvelle mécanique quantique » des Louis de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, tout juste née, discernait, avec sa coutumière sagacité, un indice indélébile et destiné à devenir, au fil des années, un brandon de discussions passionnées parmi ceux dont la vocation est de courtiser cette énigmatique et capricieuse personne.

C'est Born qui, en 1926, avait mis la touche fatidique au portrait. Recourant à la probabilité comme au factotum attitré de la conciliation du continu et du discontinu — ici, l'onde et la particule associées — il avait transmuté la mécanique ondulatoire de L. de Broglie et de Schrödinger en un *calcul ondulatoire des probabilités*, déduisant d'un principe surprenant des conséquences plus surprenantes encore, mais toujours admirablement bien vérifiées par l'expérience. Partant de l'idée que l'intensité de l'onde est la probabilité de la détection de la particule en un point et à un instant donnés, Born remplace le classique principe d'addition des probabilités partielles par son « principe d'addition des amplitudes partielles » qui sont (comme déjà en optique classique) représentées par des grandeurs « complexes », avec une partie réelle et une partie imaginaire. D'une manière générale, le carré du module de la somme des amplitudes sera la probabilité. Cette expression contient, bien entendu, des termes « carrés » et des termes « rectangles ». Les premiers, s'ils étaient seuls, redonneraient l'ancienne loi; quant aux seconds, ils expriment l'existence de phénomènes d'interférence, ou de battement,

qui sont à l'origine des mille et un paradoxes (fort bien vérifiés) de la « nouvelle mécanique » — le mille et unième étant celui qu'on va considérer ici.

Dans son intervention de 1927, Einstein attirait notamment l'attention sur ce qui lui semblait être une incompatibilité entre une certaine conséquence du principe de Born et un principe de sa propre théorie de la relativité de 1905. L'exemple discuté était celui-ci. Soit (fig. 1) une onde tombant d'aplomb sur un écran plan percé d'une petite ouverture C et diffractée par celle-ci; une plaque photographique hémisphérique de centre C recevra en l'un de ses grains, L, la particule associée (supposée unique pour simplifier); comment, demande Einstein, un autre grain, N, est-il « instantanément » informé qu'il n'a pas à recevoir la particule? Bien sûr, il n'y aurait aucun paradoxe si l'on pouvait concevoir que, pour ainsi dire, « le dé est jeté » en C, à la traversée de l'écran. Mais voilà : des principes mêmes du « calcul ondulatoire des probabilités » il résulte que ce n'est pas en C, mais bien « en L et/ou en N » (comme s'expriment les Anglo-Saxons) que le dé est jeté...

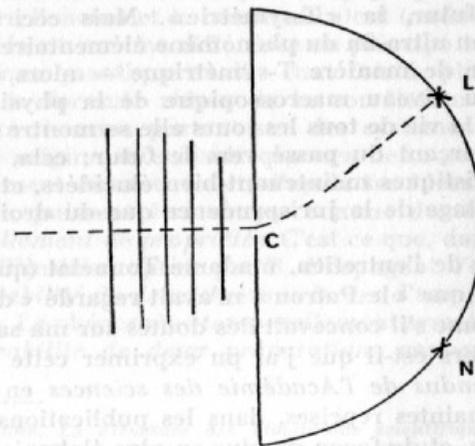


Fig 1

L'EXPÉRIENCE-PENSÉE DE 1927 D'EINSTEIN.

Que l'on me permette ici un souvenir personnel. Vers 1947, ce problème (avec d'autres, bien sûr) était passionnément discuté dans le groupe animé par Louis de Broglie, à qui je fis un jour la remarque que voici (que je ruminais depuis quelque temps) : entre L et N *il y a* un chemin porteur de l'information : le zigzag LCN connectant les deux détections (la positive et la négative) par leur commun passé C. De plus, on sait que le principe de la *symétrie passé futur-intrinsèque* (c'est-à-dire de l'invariance des formules par renversement de l'ordre de succession des phénomènes) est tout à fait général en physique. Loschmidt en 1876, et Zermelo en 1896, l'ont « monté en épingle » en mécanique statistique, dans des « paradoxes » qui portent leurs noms. Ce principe, présent en mécanique et en théorie des ondes classiques, est présent *aussi* dans le calcul des probabilités, où il n'est pas mathématiquement évident que la prédiction ne doive pas être symétrique de la rétro-diction : c'est ce qu'on appelle classiquement le « problème de la probabilité des causes ». Or, continuai-je, le phénomène ici discuté — l'événement aléatoire, ou « collapse du ψ », dans le jargon — est un phénomène « élémentaire » et qui, à ce titre, *doit* être doté de la symétrie passé-futur, la « T-symétrie ». Mais ceci implique qu'au niveau ultra-fin du phénomène élémentaire la causalité s'exerce de manière T-symétrique — alors que, bien entendu, au niveau macroscopique de la physique classique et de la vie de tous les jours elle se montre T-*asymétrique*, s'exerçant du passé vers le futur ; cela, pour des raisons statistiques maintenant bien élucidées, et qui relèvent davantage de la jurisprudence que du droit au sens strict.

Au sortir de l'entretien, madame Tonnelat (qui y assistait) me dit que « le Patron » m'avait regardé « d'un drôle d'air », comme s'il concevait des doutes sur ma santé mentale. Toujours est-il que j'ai pu exprimer cette idée aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* en 1953, et, depuis, à maintes reprises, dans les publications les plus respectables, et de façon de plus en plus élaborée. Aujourd'hui, où la discussion fait rage, *toutes* les solutions proposées à l'énigme sont « folles » d'une manière ou d'une autre. *Tous* les théoriciens concernés s'accordent sur ce qu'un important « changement de paradigme » (pour par-

ler comme Thomas Kuhn¹) est devenu inévitable, mais il n'y a pas deux théoriciens qui soient d'accord pour prôner le même paradigme... C'est la preuve certaine qu'une « révolution scientifique » est en cours.

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen ont de nouveau dénoncé le paradoxe, cette fois en le formalisant mathématiquement, mais en laissant de côté la question (par ailleurs essentielle) de l'accord ou du désaccord avec la relativité. Par la suite, jamais oublié, mais non encore énoncé en termes expérimentables, le problème alimentait une discussion académique qui s'éternisait, et comme un long « rêve éveillé » générateur de fantasmes virtuellement redoutables. En 1935, Schrödinger y voyait « de la magie » ; en 1949, dans son Introduction, et surtout dans sa Conclusion au volume réunissant les essais composés en son honneur², Einstein dénonçait « la télépathie » dans cette paradoxale corrélation à distance ; et à celui-ci, en 1957, L. de Broglie objectait son incompatibilité avec « nos idées classiques sur l'espace et sur le temps ».

En 1965, Bell publiait le fameux théorème qui allait mettre le feu aux poudres. Ce théorème projetait une lumière crue sur une conséquence spécifique de la différence entre l'ancien et le nouveau calcul (ondulatoire) des probabilités, et sur une différence en principe testable³. Si la mécanique quantique avait — une fois de plus — raison ici, alors la formule même de la corrélation à distance entre deux mesures portant sur des systèmes ayant une commune origine interdisait que ces deux sous-systèmes arbitrairement distants — et, d'après les idées classiques, séparés —, puissent être conçus comme des *objets* dotés *individuellement* de *propriétés*. C'est ce que, dans la terminologie d'Einstein reprise par B. d'Espagnat, l'on appelle : *non-séparabilité de deux mesures issues d'une préparation commune*. Le phénomène temporellement symétrique d'une *non-séparabilité de deux préparations convergeant vers*

1. T.S. KUHN, *La Structure des révolutions scientifiques* (trad. fr.), Flammarion, 1972. P. DUHEM, in *La Théorie physique, son objet, sa structure* (Rivière, 1906 et 1913), 2^e partie, ch. iv et vi, fut un précurseur de la théorie des paradigmes de Kuhn.

2. *Einstein Philosopher Scientist*, P.A. SCHILPP éd., The Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, p. 83 et 683.

3. Le mot *test* nous est revenu par l'anglais du vieux français, où il avait exactement le même sens.

une mesure commune doit d'ailleurs, lui aussi, exister (ainsi que je l'ai fait remarquer).

Or, ces deux sortes d'expériences ont maintenant été faites, la première en 1972 et en 1976, la seconde (sans qu'on l'ait d'abord ainsi interprétée) dès 1967-1968; leur verdict justifie entièrement⁴ la « nouvelle mécanique ». Il ne fait aucun doute que si ces expériences (fort délicates) avaient pu être effectuées avant 1924, au temps de « l'ancienne mécanique quantique » des Planck (1900), Einstein (1905) et Bohr (1913), elles auraient provoqué la même stupéfaction que l'expérience de Michelson, d'où est issue la Relativité⁵.

Devant la situation ainsi créée, et dans le contexte théorique où se formule le problème, quelles options s'ouvrent devant les physiciens concernés? Dans un récent article⁶ Eberhard présente sa conclusion sous la forme suivante, qui me semble excellente. Quatre, et seulement quatre issues existent, et qui sont les suivantes :

1° On calcule suivant les règles (jamais prises en défaut), mais on s'abstient de réfléchir sur leurs implications, afin d'éviter une migraine. C'est l'option de la majorité des praticiens de la physique, dont la compétence dans des calculs difficiles n'est plus à démontrer. Mais c'est aussi la politique de l'autruche...

2° Peut-être, dans des conditions suffisamment « sophistiquées », la mécanique quantique sera-t-elle prise en défaut dans ce problème, et le bon vieux réalisme, admettant le concept d'objets séparables, pourra-t-il être, malgré tout, restauré. En 1935, Schrödinger et Furry avaient indépendamment suggéré (sans grande conviction) que peut-être la corrélation d'Einstein s'amortissait avec la dis-

4. Les vérifications les plus précises de la corrélation « directe » entre « mesures futures », dues à Friedman et Clauser (1972), Clauser (1976), Fry et Thompson (1976), portent sur les polarisations linéaires de deux photons issus d'une « cascade ». Une vérification saisissante de la corrélation « inverse » entre « préparations passées », due à Pfligor et Mandel (1967-1968), porte sur l'impossibilité de « rétrodire » duquel de deux lasers est issu chaque photon détecté dans la zone d'interférence.

5. Un point d'histoire controversé est de savoir si, en 1905, Einstein connaissait ou non l'expérience de Michelson. Son argumentation mentionne en général les expériences de cinématique optique, dont la première en date est celle d'Arago, de 1818, qui a inspiré à Fresnel sa formule « d'entraînement de l'éther ». Hadamard, en 1930, a montré comment déduire de la formule de Fresnel, et d'un postulat de théorie des groupes, les formules de Lorentz-Poincaré.

6. P. EBERHARD, *Nuovo Cimento*, 46 B, 392 (1978).

tance; en 1978, Selleri et son groupe ont lancé un « ballon d'essai » d'un esprit analogue. Mais, d'une part les résultats d'expériences (qui s'accumulent) ne tendent nullement à confirmer ce genre de suppositions, et, d'autre part, on peut leur opposer de fortes objections *a priori*, reliées à ce qui est bien établi par ailleurs.

3° Peut-être alors est-ce la relativité qui se trompe — une idée qu'en 1927 Einstein jugeait peu attrayante. B. d'Espagnat fort explicitement, et C. Piron plus elliptiquement, s'en sont récemment faits les champions. Mais, quant à ses schèmes généraux, la relativité, tout comme la mécanique quantique, n'a jamais été prise en défaut. Plus spécifiquement, on peut montrer (et je l'ai fait) que le schème de la « mécanique quantique relativiste » décrit parfaitement bien toute la phénoménologie des corrélations d'Einstein (tant directes qu'inverses).

4° Alors, toujours d'après Eberhard, si l'on décide de garder les yeux ouverts et si (pour les plus solides raisons) l'on ne perd confiance ni en la mécanique quantique, ni en la relativité, alors, la seule issue restante est de changer la conception de la causalité que nous avait dictée l'expérience macroscopique, mais qui manque de subtilité au niveau microscopique. L'idée qui semblait folle en 1947 devient ainsi respectable en 1978...

A ce point de l'argumentation la discussion d'un point spécifique s'impose. Plusieurs des théoriciens impliqués dans l'affaire ont (comme Einstein en 1927) exprimé l'avis que l'existence (maintenant avérée) de ces paradoxales corrélations est incompatible avec un principe fondamental de la relativité, l'existence d'une vitesse limite des signaux — alors que très évidemment ni Eberhard, ni moi, ne le pensons. Il est important de cerner d'où vient le désaccord.

Le cœur de la relativité consiste en les formules de changement de repère spatio-temporel de Lorentz-Poincaré⁷, ayant structure de *groupe*. Il faut alors distinguer entre le groupe restreint, ou « orthochrone », où les retournements de l'axe de temps sont exclus, et le groupe « complet », où ces retournements (dits *T-symétries*⁸) sont acceptés au même titre que les retournements des

7. Ces formules étaient déjà connues de Larmor en 1898 et même (presque exactement) de Voigt en 1887.

8. Les spécialistes distinguent le *T-renversement* de Wigner de la *T-symétrie* de Racah. Nous n'entrerons pas dans ces subtilités.

trois axes d'espace (dits symétries-miroir, ou *P-symétries*). Le groupe de Lorentz complet est *PT-invariant* en ce sens que non seulement les changements de repère continus, mais, en plus, les *PT-symétries*, ont un sens *intrinsèque* dans la géométrie quadridimensionnelle (qui est le cadre de la relativité).

Tel étant le prologue, voici l'entrée en scène.

La relativité restreinte définie par Einstein en 1905 était invariante sous le groupe de Lorentz orthochrone; de plus, elle obéissait à « l'interdiction de télégraphier dans le passé » d'Einstein, c'est-à-dire au principe familier de la causalité « retardée », s'exerçant du passé vers le futur. Convenons d'appeler *macrorelativité* cette relativité-là.

D'autre part, le fait est que les équations de la mécanique quantique sont en général (la raison de cette restriction devant apparaître dans un instant) *T-invariantes*, comme les autres équations de la physique fondamentale. Il s'ensuit (comme on vient de le rappeler) que les équations de la mécanique quantique relativiste doivent être *PT-invariantes* — ce qu'elles sont en effet dans la majorité des cas. Mais ici la nature réservait une surprise de taille. En 1956, Lee et Yang tranchèrent un nœud gordien en physique des interactions faibles en montrant que celles-ci ne sont ni *P-*, ni *C-* invariantes, la *C-symétrie* étant définie comme l'échange des particules avec les antiparticules (par exemple, des électrons avec les positons). En 1955-1957, Pauli et Lüders montrèrent que, sous des hypothèses plausibles et très générales, la mécanique quantique relativiste est essentiellement *CPT-invariante* — une conclusion que rien ne contredit jusqu'à présent. Ainsi, *au niveau de la microphysique (relativiste et quantique) le principe qui généralise la T-symétrie classique est la CPT-invariance*. Convenons d'appeler *microrelativiste* toute théorie Lorentz et *CPT-invariante*.

Que le lecteur veuille bien excuser cette digression un peu technique, mais nécessaire.

On voit sans peine que, *si l'existence des corrélations d'Einstein est en effet incompatible avec la macrorelativité, elle est au contraire entièrement compatible avec la microrelativité*. Comment pourrait-il en être autrement, s'agissant d'un phénomène relevant de la mécanique quantique relativiste? Mais la question que je pose est alors :

comment d'éminents physiciens des particules élémentaires, qui invoquent la *CPT-invariance* dans leurs calculs, la récuse-t-ils au niveau de l'interprétation philosophique? Comment ne voient-ils pas que la *phénoménologie impose la CPT-invariance au niveau de la conceptualisation* (du « collapse du ψ », de la causalité, etc.)? Le choc est terrible, j'en conviens; il est *vrai* que les corrélations d'Einstein sont un tremblement de terre, et qu'elles ouvrent un abîme sous les pieds du bon sens. Mais, si abîme il y a, je préfère le secours d'un hélicoptère à celui de quelques échelles et de quelques cordes...

Je pense donc que la conduite à tenir ici consiste à *lire à la lettre le formalisme*, sans en retrancher ni y ajouter un iota, et que *c'est cela* qui « dévoilera le sens des Ecritures ».

En ceci l'on ne fera qu'imiter d'illustres exemples. Copernic a remarqué qu'en déclarant « fixe » le Soleil plutôt que la Terre on simplifie tellement la cinématique céleste qu'elle doit être beaucoup plus « vraie » ainsi. Et, en 1905, Einstein a remarqué qu'en déclarant « vécus » ou « vrais » (mais « relatifs ») le lieu et le temps notés x et t dans les formules de Lorentz-Poincaré, l'on simplifie à ce point l'interprétation des faits (quoiqu'on la dissocie des préjugés antérieurs) que la « vue du monde » ainsi définie doit être plus « vraie » que la précédente. Mon présent pari est analogue : qu'en taillant l'habit de l'interprétation « très près du corps » du formalisme mathématique (opérationnel), l'on équipera l'explorateur de la physique de la tenue adéquate à ses randonnées.

Donc ce sphinx, le paradoxe d'Einstein, ou d'Einstein-Podolsky-Rosen, tel que je le vois, est né de l'union de deux paradoxes antérieurs : le principe de la symétrie passé-futur, ou *T-symétrie*, des équations fondamentales de la physique, devenu ensuite principe de la *PT-*, puis de la *CPT-symétrie*; et le principe de l'addition des amplitudes plutôt que des probabilités partielles, de Born. Or, chacun des progéniteurs ayant une réputation paradoxale bien établie, *quid* de leur progéniture!

CPT-symétrie et addition des amplitudes partielles s'affichent sur le mode d'emploi des règles de calcul de Feynman, dont le fil conducteur est le schème des zigzags spatio-temporels qui ont enchanté les vulgarisateurs, les antiparticules y étant interprétées comme des particules

« remontant le cours du temps » (comme ils l'écrivent, en simplifiant abusivement le discours). Toujours est-il que, une fois établies en quelques pages — une fois pour toutes —, ces règles mettent en évidence la parenté mathématique de transitions appréhendées comme étrangères, et en fournissent la formule d'un seul coup, là où il fallait autrefois des pages de calcul. C'est vraiment un merveilleux algorithme.

Comment réalisent-elles ce mariage de l'eau et du feu, de l'eau du « tout est écrit » relativiste (l'avenir ne pourra être autre que ce qu'il aura été) et du feu du calcul des probabilités (où des « transitions » ont lieu)? Eh bien, pour le croire, il faut d'abord le voir : il faut jouer, la plume à la main, la règle du jeu de ces calculs de prédiction — ou rétrodiction — statistiques. Il n'entre pas dans mon propos de détailler le « comment » de ce succès; on peut le disséquer en termes de l'interprétation fréquentielle de la probabilité, basée sur l'idée de répétitions d'une préparation ou d'une mesure données, identiques à elles-mêmes en des domaines distincts de l'espace-temps; ou bien en termes de l'interprétation informatique, ou bayésienne, où la symétrie passé-futur intrinsèque se retrouve comme symétrie entre l'information-connaissance et l'information-organisation (celle « reçue » lors d'une mesure, et celle « émise » lors d'une préparation, connectées l'une à l'autre par ce « message » qu'est l'évolution du phénomène quantique).

CPT-symétrique, l'amplitude de transition de Feynman est donc intrinsèquement aussi « neutre » entre prédiction et rétrodiction qu'elle l'est entre particules et antiparticules. Et, de même que la prépondérance des particules sur les antiparticules (ces sœurs jumelles) relève de la jurisprudence plus que du droit, de même la prépondérance de la prédiction sur la rétrodiction « statistique aveugle » (un jeu de cartes étant donné « en ordre », une suite de batailles le mettra « en désordre », mais nul ne croira qu'il ait été mis en ordre à point nommé par une suite de batailles — du moins, pas en macrophysique). Cependant, le droit à l'existence des antiparticules ayant été reconnu par la théorie (en fait, la théorie quantique et relativiste de l'électron de Dirac, en 1927), on a cherché, et trouvé, les antiparticules. Semblablement, le droit à l'existence des phénomènes de « rétrodiction statistique

aveugle » (c'est-à-dire des phénomènes à probabilité décroissante discutés par Loschmidt et par Zermelo; ou des phénomènes d'ondes convergeant vers des « puits » plutôt que divergeant à partir de « sources », phénomènes équivalents aux précédents dans le « calcul ondulatoire des probabilités ») est affirmé par la mathématique; et ceci incite à rechercher si certains contextes ne permettraient pas de les observer.

Ce que seraient de tels contextes a été suggéré discrètement, quoique fort clairement, par l'illustre E.P. Wigner, dans son livre *Symmetries and Reflections*⁹. Posant en principe que toute action implique une réaction, Wigner pense qu'à l'action de la matière sur le psychisme (l'acquisition d'information-connaissance) doit logiquement correspondre une action du psychisme sur la matière (manifestée comme information-organisation). Cette remarque est particulièrement significative en mécanique quantique, où les traités répètent à l'envi l'affirmation de Heisenberg et de Bohr que « tout acte de mesure implique une réaction de l'appareil de mesure sur ce qui est mesuré ». Et comme (un von Neumann y a insisté) la frontière entre appareil de mesure et observateur est arbitraire, l'implication inévitable (mais jamais mentionnée à ma connaissance — sauf par Wigner) est qu'il y a une réaction de l'observateur sur ce qui est mesuré. Voilà le grand mot lâché. C'est ce qu'on appelle « psychocinèse » en « para-psychologie »...

Wigner (très « pince-sans-rire » dans ce passage) ajoute : « Tout phénomène est inattendu et des plus invraisemblables avant sa découverte; et certains phénomènes demeurent tels longtemps après leur découverte. » Il ajoute qu'à sa connaissance aucun philosophe n'avait avant lui fait la remarque en question. Il en existe un pourtant : Descartes¹⁰.

A ce point de l'argumentation, il faut ficeler la gerbe. Donc, les zigzags de Feynman connectent, à grandes distances spatiales et temporelles, des « préparations » et des « mesures »; cela, d'une manière rigoureusement symétrique en passé et futur (CPT-symétrique), ainsi que l'affi-

9. E.P. WIGNER, *Symmetries and Reflections*, M.I.T. Press, 1967, p. 171-184.

10. R. DESCARTES, *Lettres*, Adam-Tannery éd., I, lettre 525, p. 222 et III, lettre 302, p. 663.

chent avec désinvolture ces fameux zigzags spatio-temporels, et que le vérifient avec impertinence les paradoxales corrélations d'Einstein (sur lesquelles la distance, spatiale ou temporelle, n'a aucune prise).

La causalité CPT-symétrique du niveau fin, indifférente à l'échange passé-futur, est donc *finalité tout autant que causalité* — et, encore une fois, *elle se rit de la distance*.

Les actes de préparation et de mesure ne sont qu'apparemment différents l'un de l'autre — ce que révèle aisément un regard attentif sur le formalisme. Ils sont *préparation-et-mesure* ou *mesure-et-préparation*, et impliquent *l'information-connaissance-et-organisation*. Et c'est là que le formalisme situe l'interaction entre psychisme et matière — cette interaction postulée dès lors que la probabilité est regardée comme essentielle plutôt que comme facultative, ainsi que c'est le cas en mécanique quantique. Une telle probabilité ne saurait être *ni objective, ni subjective*, parce qu'elle est nécessairement *les deux à la fois*.

Finalement, le « collapse du ψ », généralement conçu comme un filtrage d'ondes divergentes (tel que celui réalisé au niveau macroscopique par un réseau) doit être défini et conçu de manière CPT-invariante : c'est un « collapse-et-rétrocollapse ». C'est, techniquement, la sélection d'un canal $\langle \Phi_i | \Psi_j \rangle$ du sein du réseau de canaux $\langle \Phi | \Psi \rangle$, décrits par l'amplitude de Feynman, pour la transition entre une préparation $|\Phi\rangle$ et une mesure $|\Psi\rangle$.

Bon, dira-t-on, et la psychokinèse? Comment se fait-il qu'on ne la voie jamais au laboratoire, en *observant* les transitions quantiques telles que les décrit si parfaitement le calcul des probabilités appliqué « aveuglément » en prédiction? Parce que, à mon avis, c'est l'attitude même de l'observation impartiale qui fait qu'on est, par définition — et par décision — en « macrophysique » obéissant au principe de la probabilité croissante. Pour mettre en place un contexte d'« antiphysique », il faut savoir se mettre dans un état d'expectative arbitraire — ce qui semble effectivement possible, comme les expériences, réussies, de psychokinèse de Helmut Schmidt¹¹ le montrent. De telles expériences mettent en défaut le classique « principe de

11. H. SCHMIDT, physicien à l'origine, n'est pas le Chancelier fédéral! Voir *Found. Phys.* 8, 464 (1978); *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 24, 38 (1978); *Proc. Intern. Conf. Cybernetics and Society*, I.E.E.E. (1977), p. 535.

probabilité des causes », et fournissent des exemples où la formule des probabilités conditionnelles de Bayes doit être appliquée *en prédiction*. Il est erroné de dire que de telles expériences ne sont « pas répétables »; mais il est vrai de dire qu'elles sont « neutralisées », ou « empoisonnées », par une majorité d'observateurs imposant l'attitude (glaciale) de l'« observation impartiale ». Le formalisme mathématique rend la chose évidente : si, selon l'interprétation « officielle » de la mécanique quantique, c'est bien l'acte d'observation qui « collapse le ψ », alors, deux ou plusieurs observateurs d'une même transition sont en collaboration ou en compétition pour *observer-et-produire* le résultat...

Quant au paradoxe de la non-séparabilité de deux mesures ou de deux préparations distantes dans l'espace et sans connexion « présente », le schème des zigzags de Feynman le formalise, en effet, respectivement, comme une connexion relayée soit dans le passé commun (fig. 2a), soit dans le futur commun (fig. 2b), si grandes que soient

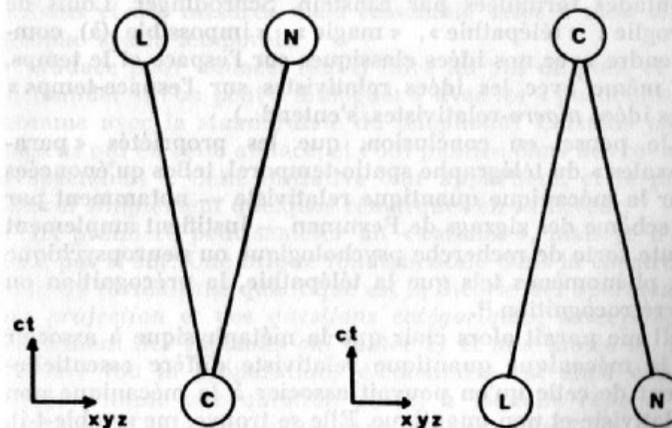


Fig. 2a

Fig. 2b

IMAGE SPATIO-TEMPORELLE DE LA CORRÉLATION D'EINSTEIN DIRECTE (2 a) OU INVERSE (2 b); LCN EST UN ZIGZAG DE FEYNMAN

les distances (spatiale et temporelle), sans affaiblissement aucun. Cette non-séparabilité CPT-invariante s'harmonise parfaitement avec la « non-séparabilité relativiste », provenant de ce que la géométrie spatio-temporelle substitue à l'ancienne dichotomie passé-futur la trichotomie *passé, futur et ailleurs* par le « cône de lumière » (largement popularisée, elle aussi, par les vulgarisateurs). Pour reprendre les termes de Bergson¹², là où la mécanique de Newton autorisait une vue du monde selon laquelle « l'univers meurt et renaît à chaque instant » — à chaque instant *t* du « temps universel » — la géométrie spatio-temporelle de Poincaré et de Minkowski impose une vue du monde où le passé et le futur « existent ». Le passé existe non pas « encore » (ce qui serait autocontradictoire), mais *là en bas*, comme la vallée pour l'alpiniste. Et le futur existe non pas « déjà », mais *là en haut*, comme le sommet pour l'alpiniste. Et cette conception est à associer non plus à la macrorelativité « orthochrone » de 1905, mais à la microrelativité « CPT-invariante » de 1955-1957.

Il va sans dire que ceci ramène très exactement aux boutades formulées par Einstein, Schrödinger, Louis de Broglie : « télépathie », « magie », « impossible (à) comprendre avec nos idées classiques sur l'espace et le temps, et même avec les idées relativistes sur l'espace-temps » (les idées *macro*-relativistes, s'entend...).

Je pense, en conclusion, que les propriétés « paradoxales » du télégraphe spatio-temporel, telles qu'énoncées par la mécanique quantique relativiste — notamment par le schème des zigzags de Feynman — justifient amplement toute sorte de recherche psychologique ou neuropsychique de phénomènes tels que la télépathie, la précognition ou la rétrocognition¹³.

Il me paraît alors clair que la métaphysique à associer à la mécanique quantique relativiste diffère essentiellement de celle qu'on pouvait associer à la mécanique non relativiste et non quantique. Elle se trouve, me semble-t-il,

12. H. BERGSON, *L'Evolution créatrice*, chap. 1.

13. Honni soit qui mal y pense! Dehors les charlatans et les cervelles molles qui ne raisonnent que par à-peu-près « vaseux »! Personnellement, c'est en méditant sur les implications des *symétries internes* de la relativité, du calcul des probabilités, de la mécanique quantique, que la conviction m'est venue qu'il y a du vrai dans ce qu'on appelle la « parapsychologie ». C'est *ensuite seulement* que j'ai enquêté, et me suis persuadé du sérieux de plusieurs recherches...

assez bien anticipée chez un Bergson, ou dans les Vedanta, notamment.

Pour Bergson, l'*homo sapiens* s'illusionne sur son propre compte, car il est un *homo faber*, qui « mutile » la totalité du réel en y « découpant » *arbitrairement* des parties *essentiellement non séparables*. Que, s'il savait s'élever à l'Intuition, il aurait une vue plus adéquate et, notamment, la clé de l'Evolution Créatrice.

Dans les Vedanta l'on peut lire que la *séparabilité* est une *illusion*, qui est *relative* à une approche *pragmatique*. Certaines techniques psychologiques conduiraient à une « conscience cosmique », et à la possession des « pouvoirs paranormaux ».

Le rapprochement entre relativité et quanta d'une part, métaphysique orientale de l'autre, fait l'objet d'un livre du physicien des particules Capra¹⁴, qui propose par ailleurs l'idée suivante : les « particules élémentaires », aux propriétés si bizarres qu'elles ne sont pas toujours des « objets séparables », devraient plutôt être interprétées comme des *canaux informatiques* connectant des préparations et des mesures. Cela ressemble assez à mon télégraphe spatio-temporel...

Audace pour audace, faut-il faire un pas de plus, et se demander si l'on peut « dialoguer » avec les « particules », comme avec la standardiste du téléphone? Certains physiciens ont eu cette audace, et l'ont publiée dans des revues respectables¹⁵. Cette initiative leur appartient, et je produirai simplement quelques remarques en sa faveur.

La première peut sembler un « canular », mais je n'en suis pas si sûr. Une brique fondamentale dans la construction du formalisme quantique est la théorie des *opérateurs de projection* et des *questions catégoriques*, susceptibles seulement des réponses *oui* (notée 1) et *non* (notée 0). La mesure (ou la préparation) élémentaire est ainsi considérée comme une *question posée*, à laquelle *répond* la particule. Dialoguons-nous avec les particules? La question est peut-être moins saugrenue qu'il ne le semble. Si cela était, la *psychokinèse* s'apparenterait à une *suggestion*...

14. F. CAPRA, *The Tao of Physics*, Shambala, Berkeley, 1957.

15. E.E. WITMER, *Amer. Journ. Phys.* 35, 40, 1967; A. COCHRAN, *Found. Phys.* 1, 235, 1971.

Ce qui est sûr est que la frontière entre le vivant et le non-vivant est bien difficile à fixer. Par exemple, est-elle au-dessus, ou au-dessous du virus cristallisable? Le réductionnisme matérialiste repousse la frontière vers une extrémité, mais les tenants du « tout est sensible », les « animistes », selon B. d'Espagnat¹⁶, la repoussent vers l'autre. A chacun son choix...

Finalement, il faut conclure, ce que je ferai en deux temps : en énonçant impersonnellement une thèse, puis en me faisant mon propre avocat.

Le mot paradoxe, qui figure dans le titre et à chaque détour de ces pages, n'a pas été défini. Qu'est-ce donc qu'un paradoxe?

Dans à peu près chaque dictionnaire, le sens N° 1 du mot paradoxe est : « Un énoncé surprenant, mais peut-être vrai. » C'est le sens étymologique. Par exemple, l'héliocentrisme de Copernic a été un tel paradoxe.

Quant au mot paradigme, Kuhn, tirant à lui Wittgenstein, lui confère le sens de *Weltanschauung*, une « vue du monde ».

L'élucidation d'un paradoxe dur, irréductible, est la promulgation d'un (nouveau) paradigme adéquat — par exemple, la relativité d'Einstein et de Minkowski, comme interprétation des formules de Lorentz-Poincaré.

Copernic et Einstein ont l'un et l'autre transformé une *recette mathématique* en *conceptualisation explicative*.

Lord Kelvin¹⁷, dans une conférence prononcée en 1900, déclarait discerner deux nuages dans le ciel par ailleurs serein de la physique théorique : les anomalies des chaleurs spécifiques, et l'expérience inexplicée de Michelson. Il caractérisait ainsi très exactement les sources de deux orages imminents : celui des quanta de Planck, de 1900, et celui de la relativité d'Einstein, de 1905. Je pense que, malgré déjà beaucoup de roulements de tonnerre, le vrai coup d'éclat de la mécanique quantique relativiste s'amasse *maintenant* sur nos têtes, et que c'est celui des corrélations d'Einstein...

16. B. d'ESPAGNAT, *A la recherche du réel*, Gauthier Villars, 1979. Voir p. 114-120.

17. Lord KELVIN, *Phil. Mag.* 2, 1, 1901.

Sur ce point, je suis d'accord avec les autres physiciens impliqués, comme des citations le prouveraient.

Mais la solution que je propose, et qui consiste à tout simplement lire les formules de la mécanique quantique relativiste, avec leur CPT-invariance, fait peur, tant elle contredit les habitudes de pensée existantes...

J'ai ici cherché à exposer le problème en m'élevant assez haut pour avoir une vue d'ensemble, mais il reste que l'exposé fait est celui du problème tel que je le vois. Il ne pouvait guère en être autrement, la contre-épreuve se trouvant dans les écrits des autres physiciens impliqués...

Olivier COSTA DE BEAUREGARD.
(Institut Henri Poincaré, Paris.)