

AOCB

1983-14

Revue de
Métaphysique
et de
Morale

1983

88^e - avis, n° 1, janv. mai 1983

EXTRAIT

Armand Colin

Les corrélations d'Einstein-Podolsky-Rosen et la causalité sans flèche passé-futur¹

Aux temps de la « révolution relativiste », lorsque le raz-de-marée de 1905 vint battre avec grand retard, dans les années 20, les rivages du monde culturel non spécialisé, Bergson, en des joutes restées fameuses, s'opposa aux physiciens Einstein, Becquerel, et Metz, sans qu'un véritable accord ait pu intervenir. Les récents articles signés par Barreau¹ [1] et par B. d'Espagnat [2], dans cette *Revue*, préludent-ils à des débats du même genre — mais où cette fois les physiciens, qui n'auront pas encore vidé entre eux leurs querelles, ne présenteront pas un front uni ? C'est ce que la suite nous apprendra.

Ce genre de débats illustre à merveille, par ses remous divers, la difficile gestation du « paradigme » exigé par la mise au jour d'un « paradoxe dur », sous les coups de pioche du labeur scientifique « normal ». Rappellerai-je que *Paradigmes et paradoxes* [3] est le titre significatif d'un ouvrage collectif précisément consacré à ces questions ? Que Duhem [4], en un livre célèbre, a devancé pour l'essentiel Kuhn dans son analyse des « révolutions scientifiques » [5] ?

Aucun des physiciens activement engagés dans l'analyse du « Paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen » de 1935 [6] — qui d'ailleurs, dans son essence, est déjà le paradoxe d'Einstein de 1927 [7] — ne doute qu'il soit vraiment un « paradoxe dur », exigeant la promulgation d'un nouveau paradigme. La discussion n'en a jamais cessé depuis ses énoncés, en 1927, puis en 1935. Elle a pris un tour beaucoup plus vif à la suite de l'énoncé du théorème de Bell, en 1965 [8], suivi de l'exécution de diverses expériences, de plus en plus précises [9], qui, dans leur grande majorité, confirment la « réalité » du paradoxe.

1. Selon l'usage des physiciens, l'auteur indique entre crochets le numéro qui renvoie à la bibliographie qui figure à la fin de son article.

Mais d'abord, en Physique, qu'est-ce qu'un paradoxe ? Et qu'est-ce qu'un paradigme ?

Du mot *paradoxe* la quasi totalité des dictionnaires donnent comme sens fondamental, ou étymologique, celui-ci : un énoncé surprenant, mais peut-être vrai. Comme exemple, plusieurs donnent l'héliocentrisme de Copernic. Quant au mot *paradigme*, Kuhn, tirant à lui Wittgenstein, en fait l'équivalent de vue d'ensemble, ou conception du monde, de « Weltanschauung ».

Comment la physique reconnaît-elle, et surmonte-t-elle, un « paradoxe dur » ? Et comment en vient-elle à promulguer un nouveau « paradigme » ? Duhem [4], et après lui Kuhn [5], l'ont fort bien expliqué — le second en soulignant davantage le rôle joué par l'inertie de l'opinion culturelle — une inertie qui dans un premier temps retarde, et dans un second temps précipite le mouvement. Il est cependant un point sur lequel je voudrais insister plus qu'eux, et c'est le rôle d'étincelle que joue la « recette mathématique ». J'en donnerai deux exemples.

Copernic, vers 1540, faisait de la cinématique céleste. Auteur d'observations très précises pour l'époque, il remarqua que tout se simplifie merveilleusement si, au lieu de prendre le solide terrestre comme référentiel pour décrire les mouvements, l'on prend des axes ayant leur origine au centre du Soleil et perçant dans des directions fixes la voûte des étoiles. Telle était donc la recette mathématique. Elle substituait aux épicycles des quasi-cercles, décrits à vitesse angulaire quasi-constante. Sans le préalable de cette « révolution copernicienne », les ellipses et la loi des aires de Kepler auraient difficilement vu le jour. Quant au nouveau paradigme — dissimulé par Oslander sous un prudent « tout se passe comme si » — il consistait en la « réalisation » de la recette mathématique. Il consistait à déclarer que le corps d'énoncés de beaucoup le plus simple est aussi de beaucoup le plus vrai. Mais mon intention n'est pas de suivre ici le cours de cette réflexion de type poincarien.

Mon second exemple sera celui de la relativité restreinte d'Einstein, en 1905, et de Minkowski, en 1908. Ici, la recette mathématique consistait en les formules du groupe de Lorentz-Poincaré — d'ailleurs déjà connues de Larmor en 1896 et, presque exactement, de Voigt en 1887 — et en leur interprétation par Poincaré, en 1906, comme une rotation des axes dans un espace-temps pseudo-euclidien à 4 dimensions. Cette recette mathématique fut adoptée sous sa première forme — assortie d'une élégante justification — par Einstein, et sous sa seconde forme, par Minkowski. Quant à la promulgation du nouveau paradigme, elle consista, pour Einstein, à dire que les variables x, y, z, ct de Lorentz et de Poincaré dénotent l'espace et le temps tels que nous les mesurons, les percevons et les vivons. Pour Minkowski, elle consista dans l'affirmation solennelle que « l'espace et le temps considérés en eux-mêmes doivent reculer dans l'ombre, leur union seule étant douée d'un sens objectif ».

La fécondité du paradigme relativiste d'Einstein et de Minkowski n'est plus à démontrer. Non seulement il dissipe à merveille les précédentes ombres ou obscurités de l'optique et de l'électromagnétisme, mais, aussi, il a produit une prodigieuse moisson de découvertes, de la cosmologie à la microphysique.

Il ressort de ces deux exemples que la résolution d'un paradoxe dur consiste en sa formalisation mathématique, c'est-à-dire en l'expression des équations (nouvelles) qui rendent compte des faits (inattendus). Et que la promulgation du paradigme correspondant consiste à lire le plus textuellement possible le nouveau formalisme mathématique. C'est cela qui « dévoile le sens des écritures ». Et c'est de tailler l'habit conceptuel au plus près du corps mathématique qui non seulement met en évidence la « vérité scientifique », mais, aussi, qui munit l'explorateur de la tenue adéquate au franchissement du paradoxe, et à la poursuite de l'exploration.

La « résolution du paradoxe d'Einstein », ici discutée, est d'un calibre copernicien. La preuve en est que sa discussion reste plus vive que jamais en 1981 ; l'on peut s'en convaincre en lisant la collection des *Lettres épistémologiques de l'association Ferdinand Gonseth* [10], dont le « Symposium écrit » *Variables cachées et indéterminisme quantique* se poursuit depuis novembre 1973 sans que l'ombre d'un consensus se dessine entre les participants. Il n'y a, en 1981, pas deux des théoriciens concernés pour proposer exactement le même paradigme.

Si je me présente à la tribune de la *Revue de Métaphysique et de Morale*, c'est évidemment pour la « défense et illustration » du paradigme que je propose. Je m'efforcerai d'être le plus bref et le plus clair possible.

J'ai montré [11] qu'une recette mathématique rendant compte exactement de la corrélation d'Einstein directe : « non-séparabilité de deux mesures issues d'une préparation commune », et de la corrélation d'Einstein inverse : « non-séparabilité de deux préparations convergeant sur une mesure commune » existe, et qu'elle appartient à la mécanique quantique relativiste. Mes formules, dont la transparence est parfaite, n'ont pas été réfutées. Par contre leur interprétation rencontre de l'opposition, et, ce, à partir de bases métaphysiques générales.

* * *

Et d'abord pourquoi, même avant d'avoir démontré leur efficacité dans le problème en discussion, faire *a priori* confiance aux formules de la mécanique quantique relativiste ? Avant tout, parce que la nature s'étant montrée et relativiste et quantique, le physicien doit donc faire en sorte d'être lui aussi et relativiste et quantique (s'il le peut), dans tout problème qu'il aborde — et en particulier celui-ci. Le fil d'Ariane se présente de lui-même : Relativité et Mécanique quantique (la « première », celle de 1900-1905, comme la « seconde », celle des années 1924-1927) étant l'une

et l'autre filles de la physique des ondes, le formalisme à développer sera celui de la physique des ondes. Et c'est bien ainsi que Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson, de 1946 à 1949, ont « réconcilié la Relativité et les Quanta » au niveau de la « seconde quantification », et que, dans ces mêmes années, j'ai montré comment opérer cette « réconciliation » au niveau de la « première quantification » [12].

Il y a en outre une raison spécifique de vouloir traiter les corrélations E.P.R. d'une manière qui soit explicitement relativiste et quantique, et c'est que, définissant en 1927 l'essence du paradoxe, Einstein [7] y soupçonnait une contradiction avec sa théorie de la relativité. J'y reviendrai.

A ce point (délicat) de l'argumentation il devient nécessaire d'examiner de près le contenu du groupe des transformations de Lorentz-Poincaré, qui sont au cœur de la Relativité.

L'espace-temps de Poincaré-Minkowski est dit *pseudo-euclidien* parce que le carré de la distance d'un instant-point à l'origine y a l'expression

$$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2,$$

l'un des quatre termes carrés ayant un signe opposé aux trois autres ; c est la constante absolue d'Einstein, égale à la vitesse de la lumière dans le vide. L'on peut formellement rétablir quatre signes + en prenant une coordonnée de temps imaginaire pure.

Il suit de là que le groupe des rotations du tétrapode des axes n'est pas connexe : on ne peut pas retourner la direction de l'axe de temps par une rotation continue. Une question se pose alors d'elle-même : pour les besoins de la physique, peut-on se contenter du sous-groupe de Lorentz connexe, ou orthochrone, qui préserve la « flèche du temps » ? Ou bien faut-il recourir au groupe complet — incluant aussi le retournement d'un, ou des trois axes d'espace, qui inverse la « chiralité », en opérant un échange « droite et gauche » ?

En physique macroscopique il existe, en fait sinon en droit, une forte asymétrie passé-futur, apparaissant notamment en théorie des ondes, en thermodynamique phénoménologique, en calcul des probabilités, en informatique. Entre autres auteurs j'ai discuté cette question en détail [13] ; je renvoie à ces textes pour la discussion des problèmes, et pour l'abondante bibliographie. L'on peut résumer et synthétiser le tout en disant que la physique macroscopique exclut la finalité au profit de la causalité, en ceci qu'elle permet d'intégrer l'équation des ondes, ou l'équation d'évolution statistique, à partir d'une donnée initiale, mais qu'elle interdit de le faire vers une donnée finale. Tel est le décret, et il rend bien compte des faits. Quant à l'attendu du décret, il est à peser soigneusement dans le contexte de la présente étude. Il faut se demander si la dissymétrie passé-futur de la causalité des physiciens ne serait *rien de plus* qu'un fait macroscopique, exprimé sous la forme *extrinsèque* d'une condition aux limites, et *aucunement* une loi existante au niveau fin des équations

d'évolution [13]. Il y a toutes les raisons de le penser, et aucune raison (sinon métaphysique) de penser le contraire...

Quoi qu'il en soit, comme on vient de l'expliquer, la physique relativiste macroscopique se contente parfaitement de la transformation de Lorentz orthochrone. Admettant qu'en fait la causalité s'exerce exclusivement du passé vers le futur, elle n'éprouve nul besoin de retourner l'axe du temps.

D'ailleurs, elle n'éprouve pas non plus le besoin de retourner la chiralité — ou la « parité », comme on dit aussi — des trois axes d'espace. Elle n'a jamais rencontré de situation où l'image dans un miroir d'une évolution physique ne représente pas une évolution de même espèce.

Il en va tout autrement de ces deux points en microphysique quantique. D'abord, au faisceau des précédentes asymétries passé-futur de fait (toutes interconnectées, comme on peut le montrer [13]) s'oppose — on le sait depuis longtemps — un faisceau correspondant de symétries passé-futur mathématiques de droit. Dire qu'elles sont de droit équivaut à dire qu'elles sont patentes sur la formule de phénomène élémentaire individuel. Soit par exemple le concept d'une probabilité de transition entre un état initial et un état final, ou entre une *préparation* et une *mesure* (comme on dit aussi en physique quantique). C'est aussi bien la *probabilité prédictive* des mesures possibles à partir d'une préparation donnée que la *probabilité rétrodictive* des préparations possibles conduisant à une mesure donnée.

J'illustrerai mon propos sur l'exemple de la célèbre « expérience pensée » du « microscope de Heisenberg » (1927), en rappelant d'abord que le « calcul ondulatoire des probabilités » selon Born associe biunivoquement les ondes divergentes, ou retardées, aux problèmes de prédiction et les ondes convergentes, ou avancées, aux problèmes de rétrodition, comme l'ont expliqué Fock (1948), Watanabe (1955), et l'auteur de ces lignes.

Soit donc à estimer au mieux la position d'un électron P dans le plan objet p d'un microscope au reçu, dans le plan image q , d'un photon unique diffusé par l'électron, et venant noircir l'un des grains, Q , d'une plaque photographique. C'est un problème de rétrodition statistique, que les classiques auraient pensé en termes de « retour optique inverse » : imaginant Q comme une source ponctuelle, son image dans le plan p est une figure de diffraction qui, en mécanique ondulatoire, n'est autre que la répartition statistique des positions possibles de l'électron P . C'est la réponse au problème posé — et c'est aussi un exemple de ce que nous appellerons plus loin le « rétrocollapse » de la fonction d'onde.

L'on ne peut passer de cette *microsymétrie de droit* à la *macroasymétrie de fait* qu'au prix de la discrimination extrinsèque précédemment dite. Mais précisément, c'est une question importante — et même une question grave — de savoir si cette discrimination est justifiée au niveau de la discussion *essentielle* du paradoxe d'Einstein. Il y a là une option métaphysique. Contre beaucoup de mes collègues je rejette la discrimination, en arguant de la symétrie mathématique des formules du problème.

La symétrie passé-futur, ou T-symétrie [14], n'est manifestement pas invariante au sens de la transformation de Lorentz orthochrone ; son concept ne peut donc être accepté tel quel dans une théorie explicitement relativiste. Mais le remède est manifeste : en associant le retournement T de l'axe de temps [14] au retournement P des 3 axes d'espace on définit l'opération P T, qui, elle, est invariante au sens de la transformation de Lorentz orthochrone. A première vue l'on penserait donc que le groupe complet de Lorentz-Poincaré, obtenu en combinant aux rotations continues du tétrapode les symétries P T, satisfera toutes les exigences de la microphysique, et, plus précisément de la mécanique quantique relativiste.

Hé bien, la Nature est plus subtile que cela. Cela provient de l'existence des antiparticules dans le formalisme de la mécanique quantique (relativiste, justement), et dans la réalité expérimentale. En théorie de Dirac, de 1927, le positron est l'antiparticule de l'électron, en droit mathématique son exact jumeau, en fait beaucoup plus rare — une situation qui rappelle celle existant à propos de la T-symétrie. Dans sa très élégante (et très efficace) théorie de 1949, Feynman interprète le positron comme le P T-symétrique [14] de l'électron — un « électron qui remonte le cours du temps », comme on dit souvent par abus de langage. Disons que Feynman convient de paramétrer les trajectoires spatio-temporelles des positrons vers les temps décroissants. Cette conceptualisation est générale : la paire électron-positron n'est qu'un exemple entre une centaine d'associations particule-antiparticule.

Définissons alors [15] l'opération C comme l'échange particule-antiparticule. Dans le schéma de Feynman elle se représente comme le retournement des flèches des trajectoires spatio-temporelles. Il est manifeste que les deux opérations T et P doivent être complétées par l'opération C (l'ordre d'application étant quelconque) pour revenir au « graphe » originel. C'est le corollaire strict de l'idée de Feynman, qui se vérifie sur la mathématique [15]. On l'énonce comme le principe de la C P T-invariance ; et c'est lui, au lieu de la P T-invariance, qu'il est nécessaire d'associer au groupe de Lorentz orthochrone. *La mécanique quantique relativiste est Lorentz et C P T-invariante*, comme l'ont successivement expliqué Lüders en 1954 et Pauli en 1955.

Or, ce cadre conceptuel offrait des possibilités dont on ne s'était pas d'abord avisé. En 1957, Lee et Yang provoquaient une sensation en expliquant [16] que l'interaction « faible » (impliquant les neutrinos) n'est ni C-, ni P-invariante, mais bien CP-invariante — ce que l'expérience confirma très vite. C'était un rude coup aux préjugés, parce que, si les T- et C-asymétries macroscopiques sautent aux yeux, la symétrie droite-gauche semblait aller de soi. Pourtant, bien vite on savoura l'idée (et le fait) de la C P-symétrie, selon laquelle, au Pays des Merveilles des interactions faibles, l'image d'un gant droit dans un miroir représente un « antigant » gauche. Mais « l'imagination se lassera de concevoir plus tôt

que la Nature de fournir » : en 1964 les expérimentateurs Christenson, Cronin, Fitch et Turlay découvraient, dans la physique des « mésons K », l'exemple d'une interaction qui n'est pas strictement CP invariante...

Jusqu'à preuve du contraire, le groupe cinématique fondamental de la mécanique quantique relativiste est donc le produit direct de la transformation de Lorentz orthochrone et de la CPT-symétrie. Par fidélité à mon programme, je suis donc amené à exiger les Lorentz et CPT-invariances non seulement de mes formules, mais aussi de tout mon discours interprétatif. J'exigerai en particulier invariances dans les définitions clés des concepts de la préparation et de la mesure — ainsi rendus CPT-associés, et même intrinsèquement CPT-invariants ; du collapse du Ψ — qui devient un « collapse et rétrocollapse » ; de la microcausalité — qui devient « causalité et rétrocausalité ».

Je m'expliquerai sur tout ceci à propos de la corrélation EPR. Une implication de ces idées est évidemment que tous les aspects de la T-asymétrie macroscopique — y compris dans les opérations de la préparation et de la mesure — sont « de fait et non de droit » [13].

* * *

Revoyons maintenant ce que disait Einstein en 1927, au V^e Conseil Solvay, devant Louis de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac et Born.

Soit une onde plane tombant normalement sur un écran percé d'une petite ouverture circulaire C, et reçue ensuite sur une plaque photographique hémisphérique de centre C. Supposons pour simplifier qu'elle porte un seul corpuscule (photon ou électron) et que celui-ci tombe dans l'ouverture. Il viendra noircir ensuite l'un des grains, L, de la plaque, la probabilité *a priori* de cet événement égalant, selon le principe formulé par Born en 1926, l'intensité classique de l'onde en ce point. Par quel mécanisme, demande Einstein, un autre grain, disons N, est-il informé qu'il n'a pas à être noirci ? Aucun n'est évident. De plus, note Einstein, la corrélation entre L et N semble se faire à vitesse supralumineuse, violant donc l'un des postulats majeurs de la relativité.

Tout est dit en peu de mots. Le « paradoxe » est clairement caractérisé. Le « signe de contradiction » entre théoriciens — toujours vivace en 1981 — est discerné au-dessus du berceau même de la « nouvelle mécanique quantique ».

D'abord, il n'y aurait aucun paradoxe si l'on pouvait penser que l'événement stochastique — disons le « coup de dés », pour faire image — se jouait en C, à la traversée de l'écran. Cette idée serait toute naturelle dans le contexte des théories statistiques du XIX^e siècle, et s'exprimerait en principe aisément en termes du calcul classique des probabilités. Mais voilà : Born, produisant en 1926 l'interprétation statistique de la mécanique ondulatoire de L. de Broglie et de Schrödinger, et y recourant à la proba-

bilité comme au factotum attitré de la conciliation du continu et du discontinu (ici, l'onde et le corpuscule), se trouve amené à substituer au vieux principe d'addition des probabilités partielles son nouveau principe d'addition des amplitudes partielles. L'on sait en effet, depuis Young et Fresnel, qu'en physique des ondes ce sont les amplitudes et non les intensités qui s'ajoutent, comme le manifestent les phénomènes d'interférence ou de battement. L'intensité — la probabilité — se calcule alors comme le carré de la somme (absolue) des amplitudes, et contient donc des termes carrés et des termes rectangles. Les premiers, s'ils étaient seuls, redonneraient la loi classique d'addition des probabilités partielles. Quant aux seconds, ils entraînent la collection des mille et un « paradoxes » de la mécanique quantique — que l'expérience vérifie parfaitement. Le mille et unième est celui qu'on discute ici.

Du « principe de Born » il suit nécessairement que, dans le précédent exemple, les « dés sont jetés » non pas en C, où l'expérience est *préparée*, mais bien en L et /ou N, où elle est *mesurée*. Les « dés » [17], pour ainsi dire, ne sont pas « jetés » lorsqu'agités ensemble « dans le cornet », mais lorsqu'ils « finissent de rouler sur la table ». Cependant ils sont corrélés. Si l'un montre le 6, l'autre montre le 6 aussi. Là est le paradoxe d'Einstein, ou E P R [6]. Le problème est d'élucider « le mécanisme de la corrélation ».

Ce problème était agité en 1947 dans le groupe animé par Louis de Broglie, à qui un jour, après mûres réflexions, je dis ceci : le vecteur d'espace-temps joignant directement le grain noirci L à tout grain non noirci N est physiquement inoccupé. De plus, comme le remarque Einstein, il est du genre espace, et donc disqualifié comme vecteur d'influences entre L et N. Par contre, il existe un chemin, et un seul, physiquement vecteur d'influences : le zigzag L C N prenant un relais dans le passé, en C, et formé de deux vecteurs du genre temps. Si l'on fait de la physique (et pas de la métaphysique) force est donc de recourir à lui. Le prix du passage est évidemment de déclarer qu'au niveau élémentaire — où justement l'on est — le lien causal (du genre temps) n'a pas de flèche passé-futur plutôt que futur-passé. Mais, précisément, toutes les analyses attentives du phénomène élémentaire, en théorie des ondes, en mécanique statistique, en calcul des probabilités, mettent en évidence une telle « symétrie de droit » [13]. Nous sommes donc parfaitement fondés à la postuler ici.

Bien que difficile à réfuter, ce raisonnement ne convainquit pas Louis de Broglie, dont l'objection resta métaphysique : la causalité devait s'exercer dans le sens passé-futur. En 1949 Feynman lança le concept et la théorie de ses zigzags spatiotemporels, manifestement apparentés à ma conception [18] de la corrélation E P R. Depuis j'ai montré en détail [11] que le formalisme (quantique et relativiste) de Feynman contient, en effet, la théorie complète des corrélations d'Einstein.

Deux ingrédients sont essentiels à cette formalisation de la corrélation E P R : le principe d'addition des amplitudes partielles de Born, de 1926,

et le principe de symétrie passé-futur, discuté sur des exemples, en 1876 et en 1896, par Loschmidt et par Zermelo, devenu CPT-invariance en mécanique quantique relativiste. Ces deux principes sont l'un et l'autre inhérents à la théorie de Feynman. Non moins inhérente à ce formalisme (on eût dû le remarquer plus tôt) est l'existence de la « non-séparabilité E P R » tant des mesures issues d'une préparation commune (corrélations E P R directe) que des préparations convergant sur une mesure commune (corrélations E P R inverse) — l'une et l'autre vérifiées expérimentalement [19].

La toute récente expérience d'Aspect, Grangier et Roger [9] illustre en 1981 le « nec plus ultra » d'une famille d'expériences de cascades atomiques qui (à une exception près) ont confirmé la réalité de la corrélation E P R. Omettant volontairement certaines précisions qu'exigeraient les physiciens, j'esquisserai maintenant le schéma de ces expériences de cascades, parce que cela me permettra de bien mettre en évidence certains aspects essentiels de la corrélation E P R.

Dans cette famille d'expériences, la « préparation » en C est une « cascade atomique », au cours de laquelle une paire de photons « corrélés » est émise. De ceux-ci l'on sélectionne ceux qui parcourent en sens opposés un même axe dans le laboratoire, et qui traversent deux polariseurs linéaires L et N, « appareils de mesure » faisant entre eux un angle ajustable A.

Rappelons que si un photon tombe sur un polariseur linéaire, de deux choses l'une : il passe, répondant ainsi « oui, ma polarisation est trouvée parallèle au polariseur », ou il ne passe pas, répondant « non, ma polarisation est trouvée perpendiculaire au polariseur ».

Pour les deux photons de notre paire il y a donc 4 réponses possibles, dont je noterai les probabilités (1,1), (0,0), (1,0), (0,1).

La mécanique quantique dit — et l'expérience vérifie à une précision très élevée — qu'il y a deux, et seulement deux, types de cascades possibles : dans l'un, les probabilités en question ont les expressions

$$(1,1) = (0,0) = \frac{1}{2} \cos^2 A, \quad (1,0) = (0,1) = \frac{1}{2} \sin^2 A;$$

dans l'autre, ces valeurs sont échangées.

Une première remarque est que ces probabilités s'expriment sans référence aucune à des paramètres de la source C, mais avec référence aux paramètres des détecteurs L et N. Ceci prouve bien que « les dés ne sont pas jetés » en C, mais bien en L et N [20].

En second lieu, fort agréables mathématiquement, ces formules sont une « insulte copernicienne » au bon sens. Que disent-elles en effet, si l'on y fait $A = 90^\circ$ (polariseurs croisés) ? Que toutes les paires de photons mesurées exhibent des polarisations linéaires parallèles entre elles (fort bien), mais de plus parallèles soit à l'un, soit à l'autre, des deux polariseurs croisés — dont les orientations sont (à cette condition près) arbi-

traires. Elles pourraient, par exemple, être choisies après le départ des photons de la source. C'est même là l'objet d'une future expérience d'Aspect [21].

A mes yeux aucun doute n'est permis : la future expérience d'Aspect confirmera la mécanique quantique. Cela, pour la raison obvie que le seul lien physique entre la cascade C et les mesures de polarisations L et N est formé par les trajets des deux photons, et que, par conséquent, la seule chose qui compte est la paire d'orientations des deux polariseurs lorsque les photons les traversent. Mais, naturellement, énoncer cela, c'est affirmer l'opération de la causalité rétrograde — un concept à mon avis parfaitement clair (sinon à celui de B. d'Espagnat [2]) : les initiatives macroscopiques sont prises en L et N (orientation des polariseurs) ; et les réponses observées sont corrélées grâce à un relais C passé.

Rivons le clou. Pour bien faire voir que, sous l'un de ses aspects essentiels, le « paradoxe E P R » est bien le paradoxe de la T-symétrie (plus précisément, de la C P T-invariance) au niveau élémentaire, examinons le cas de la corrélation E P R inverse, où la cascade C est remplacée par une « anticascade ». L et N seront maintenant deux « préparations », comportant chacune un laser de la fréquence idoine, suivi d'un polariseur linéaire, les deux rayons convergeant en C pour produire une « anticascade » ; où deux photons « corrélés » seront absorbés. Ce genre d'expérience est aujourd'hui routine ; et rien n'empêcherait de faire précisément celle-ci.

Les formules du problème sont exactement les mêmes que celles précédemment indiquées.

Dans l'expérience directe, précédemment résumée, le bon sens juge « paradoxal » qu'on puisse tourner les polariseurs après que les photons sont partis de la source. Il juge tout aussi paradoxal que la corrélation existe, si grandes que soient (dans l'espace ou le temps ordinaires) les distances (égales ou inégales) entre la source C et les détections L et N — un point qui a été vérifié expérimentalement [22]. Or, ces deux traits si paradoxaux de la corrélation directe semblent triviaux dans la corrélation inverse : le bon sens juge « évident » qu'un photon issu d'un polariseur « conservera » la polarisation qu'il y a prise, jusqu'à sa future absorption dans une anticascade ; il n'objecte rien à l'idée de tourner le polariseur après le passage du photon, ni à celle de rendre arbitrairement grande la distance entre ce polariseur et l'anticascade.

Il est donc clair que les caractères expérimentaux des corrélations d'Einstein (directes ou inverses), conjoints au formalisme mathématique qui les justifie, réfutent, au niveau élémentaire, la conception « macroscopique » d'une causalité agissant exclusivement dans la direction passé-futur. Ils imposent à la place le concept d'une microcausalité (du genre temps) sans flèche passé-futur. Par là, ils permettent l'existence de corrélations du genre espace établies au moyen de zigzags de Feynman.

**

En conclusion de cette analyse quelques mots sur la métaphysique de ma démarche seront appropriés. Je les formulerai par comparaison avec la démarche métaphysique d'un autre théoricien concerné par ces mêmes problèmes, Bernard d'Espagnat [23].

Bernard d'Espagnat incline à penser [2] que la « réalité indépendante » (qu'il se plaît à postuler) serait située hors du cadre de l'espace-temps. Pour cette raison, « sans les exclure toutes absolument », il envisage peu favorablement les explications « du type » que je propose.

Quant à moi, du simple fait qu'il existe un formalisme, parfaitement clair et opérationnel, rendant exactement compte des résultats expérimentaux en termes d'espace-temps relativiste, je ne vois aucune raison de chercher autre chose. Au contraire, l'histoire et la philosophie des sciences s'accordent à montrer que l'innovation conceptuelle passe régulièrement par le canal de la recette mathématique efficace.

Est-ce à dire que je tire de l'existence de mon formalisme l'affirmation qu'il y a *dans* l'espace-temps un quelque chose d'énigmatique, qu'on cerne tant bien que mal en mécanique quantique, et particulièrement à propos des corrélations d'Einstein ? Hé bien non, justement. Ayant fait remarquer que l'amplitude de transition $\langle \Psi | \Phi \rangle$ de Tomonaga-Schwinger entre une préparation $|\Phi_1\rangle$ et une mesure $|\Psi_2\rangle$ est symétrique (en ce sens que $\langle \Psi | \Phi \rangle = \langle \Phi | \Psi \rangle^*$) et que, U notant l'opérateur unitaire d'évolution agissant entre $|\Phi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$, ce « produit scalaire » se lit aussi bien prédictivement comme $\langle \Psi_2 | U \Phi_1 \rangle$ — en « collapsant » $|\Phi_1\rangle$ sur $|\Psi_2\rangle$ — que rétrodictivement comme $\langle \Psi_2 U | \Phi_1 \rangle$ — en « rétrocollapsant » $|\Psi_2\rangle$ sur $|\Phi_1\rangle$ — j'en conclus logiquement que, entre la préparation et la mesure, le « système » n'est *ni* dans « l'état $|\Phi\rangle$ », *ni* dans « l'état $|\Psi\rangle$ », mais qu'il est *en train de transiter* de $|\Phi_1\rangle$ à $|\Psi_2\rangle$. Il est, si l'on peut dire, « entre deux chaises » — l'onde retardée et l'onde avancée — et « dans les coulisses de l'espace-temps ».

Hors espace-temps (sur ce point je suis donc d'accord avec d'Espagnat), mais ancré, cependant, sur fond d'espace-temps par la préparation $|\Phi_1\rangle$ et la mesure $|\Psi_2\rangle$, mon « système » doit-il être dit « réel mais lointain », ou « réel mais voilé » ? Hé bien non, parce qu'il n'est certainement pas indépendant des observateurs. Il en dépend par la préparation et par la mesure.

Ici, les concepts de l'informatique deviennent très éclairants. Entre autres schèmes, l'informatique discute, par exemple, de l'émission, de la transmission, et de la réception d'un message (ce qu'elle fait dans le formalisme du calcul classique des probabilités). Son message est doté d'une néguentropie N . Il a été conçu, formulé ou « codé », et émis, à partir d'une information-organisation $I_1 : I_1 \rightarrow N$, avec $I_1 \geq N$: l'égalité exprime le droit, l'inégalité le fait, l'irréversibilité macroscopique. A sa réception, le

signal est « décodé » et lu, engendrant une information-connaissance I_2 , avec encore $N \geq I_2$. Plusieurs physiciens [24] ont interprété suivant ce langage une expérience de physique comme un message parcourant l'espace-temps, sa préparation étant le codage et sa mesure le décodage.

Rien n'empêche de transposer ce schème en mécanique quantique relativiste — à condition, bien sûr, de substituer le « calcul ondulatoire des probabilités » au calcul classique. C'est ce qu'on fait sans le dire en utilisant le formalisme de Tomonaga-Schwinger-Feynman-Dyson.

Le « paradoxe » est qu'au niveau des phénomènes « élémentaires » ce télégraphe spatiotemporel jouit de propriétés « surprenantes mais vraies » mais masquées au niveau macroscopique. Essentiellement, la causalité s'y montre symétrique en passé et futur — C P T-invariante.

Ce concept ésotérique de la causalité est-il condamné à rester confiné dans le ghetto microscopique, ou bien le « droit mathématique » peut-il éventuellement s'exprimer au niveau macroscopique ? Je pense qu'il le peut, parce que le phénomène neuro-physiologique élémentaire se situe au niveau quantique : notre œil est sensible à quelques photons, et notre oreille à quelques phonons. Je pense donc que la phénoménologie existante au niveau microphysique justifie amplement toute enquête neuro-physiologique destinée à rechercher — contre le « second principe » — des phénomènes exceptionnels d'ondes avancées et de conversion d'information en néguentropie, ainsi que, *via* des zigzags de Feynman relayés dans le passé ou le futur, des phénomènes de télégraphie supralumineuse [25] — ce qu'on appelle en « parapsychologie » précognition, psychokinèse, télépathie. Un Bergson [26], un Jung [27], un Freud [28] ne m'eussent pas contredit.

Finalement, au-delà de la « paradoxale » phénoménologie du télégraphe spatiotemporel, qu'y a-t-il, peut-être, de « lointain » ou de « voilé » ? Un « réel » obéissant à des lois ? Je ne le pense pas : les lois sont propres au télégraphe. Y a-t-il plus que les abonnés du réseau échangeant leurs informations ? Un « inconscient collectif » à la Jung ? Une « supraconscience » à la Bergson ? Un « endroit » de « l'envers » phénoménal à la Ruyer ? D'Espagnat, quant à lui, invoquerait plutôt Spinoza. Mais, à mon sens, le terme de « réel » fait beaucoup trop « matériel » pour convenir à cette essence cachée des « choses de la microphysique, qui ne sont d'ailleurs pas « des choses »...

Olivier COSTA de BEAUREGARD,
Institut Henri Poincaré.

Références

- [1] H. BARREAU, in *Rev. Métaph. Mor.*, 86, 364 (1981).
- [2] B. d'ESPAGNAT, in *Rev. Métaph. Mor.*, 86, 379 (1981).
- [3] *Paradigms and paradoxes*, R. G. COLODNY ed., Univ. of Pittsburgh Press, 1973.

[4] P. DUHEM, *La Théorie physique, Son Objet, Sa Structure*, Paris, Rivière, 1906 et 1913 ; 2^e partie, ch. IV et VI (réédition Vrin, Paris, 1981).

[5] T. S. KUHN, *La Structure des révolutions scientifiques*, tr. fr., Paris, Flammarion, 1972.

[6] A. EINSTEIN, B. PODOLSKY et N. ROSEN, in *Phys. Rev.*, 47, 777 (1935).

[7] A. EINSTEIN, in *Rapports et discussions du 5^e conseil Solvay*, Paris, Gauthier Villars, 1928, p. 253-256.

[8] J. S. BELL, *Physics I*, 195 (1965).

[9] J. F. CLAUSER et A. SHIMONY, in *Rev. Prog. Phys.*, 41, 1881 (1978), passent en revue les expériences les plus significatives, de 1970 à 1976, en discutant soigneusement leurs présupposés — qui existent toujours, comme l'a expliqué Duhem [4].

La récente expérience de A. ASPECT, P. GRANGIER, R. ROGER, in *Phys. Rev. Lett.*, 47, 460 (1981) surpasse de loin les précédentes en précision, et confirme l'existence de la corrélation E P R.

[10] *Lettres épistémologiques*, Association Ferdinand Gonseth, Bienne, Suisse.

[11] O. COSTA DE BEAUREGARD, in *Physica*, 80, 211 (1980) et *Found. Phys.*, 10, 513 (1980) ; ces articles font la synthèse de publications antérieures. Voir aussi *Lett. Nuovo Cim.*, 31, 43 (1981).

[12] O. COSTA DE BEAUREGARD, *Théorie synthétique de la relativité restreinte et des quanta*, Paris, Gauthier Villars, 1957, et *Précis de mécanique quantique relativiste*, Paris, Dunod, 1967 ; ces deux livres synthétisent mes articles et donnent leurs références.

[13] O. COSTA DE BEAUREGARD, in *Rev. Synthèse*, 5-6, 7 (1957) ; *Rev. Métaph. Mor.*, 2, 214 (1962) ; « Récents progrès dans l'analyse de l'irréversibilité physique » in *Sadi Carnot et l'essor de la thermodynamique*, Paris, CNRS (1974).

[14] En mécanique quantique on distingue le T-renversement à la Wigner et la T-symétrie à la Racah. C'est le second de ces concepts qui exprime le retournement géométrique de l'axe du temps, et c'est à lui que je me réfère ici.

[15] La définition de l'opération C diffère suivant qu'on l'associe au T-renversement de Wigner ou à la T-symétrie de Racah.

Dans un article sous presse in *Found. Phys.*, et dans ma contribution au récent Colloque *Le dualisme onde-corpuscule* (en l'honneur du 90^e anniversaire de Louis de Broglie), je discute en détail toute cette question.

[16] Dans le schème du T-renversement de Wigner.

[17] Naturellement il ne s'agit pas de dés. Les dés sont des objets obéissant au calcul classique des probabilités ; les corrélations dont nous parlons obéissent au « calcul ondulatoire des probabilités » selon Born, et ne portent pas sur des « objets ».

[18] O. COSTA DE BEAUREGARD, in *C. R. Acad. Sci.*, 236, 1632 (1953) ; c'est le premier énoncé écrit de ma conception de la corrélation d'Einstein.

[19] Un type d'expérience de « non séparabilité de deux préparations convergent sur une mesure commune » est l'interférence de deux lasers indépendants de Pfleger et Mandel (1967-8).

[20] Pour une discussion technique de ce point voir les références [11].

[21] A. ASPECT, in *Phys. Rev.*, D 14, 1944 (1976).

O. Costa de Beauregard

[22] Expériences de corrélations E P R de photons γ issus de la désintégration du positronium [9]. Une toute récente expérience de cette catégorie est celle de BERTOLINI, DIANA et SCOTTI, in *Nuovo Cim.*, 63 B, 651 (1981). Aspect, dans sa toute récente expérience de cascade [9], a lui aussi vérifié ce point.

[23] B. d'ESPAGNAT, *A la Recherche du réel. Le Regard d'un Physicien*, Paris, Gauthier Villars, 1979 et 1981.

[24] L. BRILLOUIN, *La Science et la théorie de l'information*, Paris, Masson, 1959; J. ROTHSTEIN, *Communication, Organisation and Science*, The Falcon Wing's Press, U.S.A., 1958.

[25] La « télégraphie dans l'ailleurs relativiste » d'un véritable signal implique le plein emploi de la C P T-invariance, incluant la psychocinèse.

[26] H. BERGSON, *L'Energie spirituelle*, ch. III.

[27] C. G. JUNG, *Psychologie und Alchimie (passim)*.

[28] S. FREUD, *Nouvelles Conférences en psychanalyse*, ch. II., Paris, Gallimard, 1936.

POST-SCRIPTUM (Mai 1982).

Dans son nouveau livre B. d'Espagnat [29] dénomme souvent *Etre son Réel volé* ; serait-ce peut-être un effet de ma recension [30] du précédent livre ? La question est de peu d'importance.

Autre chose. Relisant des textes de Davidon [31], Rayski [32], Rietdijk [33], je m'avise de convergences très fortes entre certains aspects des vues de ces auteurs avec les miennes.

[29] B. d'ESPAGNAT, *Un Atome de sagesse*, Éditions du Seuil, 1982.

[30] O. COSTA DE BEAUREGARD, in *Revue de Synthèse*, III^e S, n^os 95-96, 525 (1979).

[31] W.C. DAVIDON, in *Nuovo Cim.* 36 B, 34 (1976).

[32] J. RAYSKI, in *Found. Phys.* 9, 217 (1979)

[33] C.W. RIETDIJK, in *Found. Phys.* 11, 783 (1981).