IV.

LE PARADOXE D'EINSTEIN (1927) OU D'EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN (1935)

O. Costa de Beauregard

Depuis ses débuts dans les années 1924-1927, la «nouvelle mécanique quantique» est féconde en paradoxes admirablement bien vérifiés par l'expérience, et souvent à des précisions qui sont des précisions-records de la physique. La grande majorité d'entre eux procède de la règle édictée en 1926 par Born, d'additionner les amplitudes, et non les probabilités partielles. Born, dans son «interprétation statistique de la mécanique quantique», recourait à la probabilité comme au factotum attitré de la conciliation du continu (ici, l'onde) et du discontinu (la particule); mais, précisément, l'ascendance ondulatoire de la mécanique broglienne enfantait un «calcul ondulatoire des probabilités» aux propriétés absolument «inouïes». Born énonce (et mille et une expériences vérifient) que la probabilité est le carré du module de la somme des amplitudes, — une expression qui contient, bien entendu, des termes carrés et des termes rectangles. Les termes carrés, s'ils étaient seuls, redonneraient l'ancienne loi d'*addition des probabilités partielles.* Quant aux termes rectangles. ils représentent une «correction néo-quantique», et contiennent les différences des phases: ce sont formellement des termes d'interférence, ou de battement ondulatoire, observés dans mille et un phénomènes plus surprenants les uns que les autres, — le mille et unième étant celui qu'on va discuter ici.

Mais d'abord, qu'est-ce qu'un paradoxe ? Dans tous les dictionnaires le sens n° 1, ou étymologique, est celui-ci: *un énoncé surprenant, mais peut-être vrai.* Exemple: l'héliocentrisme de Copernic. Les «révolutions scientifiques» discutées par P.

(1) P. Duhem, La Théorie Physique, son Objet, sa Structure. Paris, Rivière, 1906 et 1913, 2ème Partie, Chap. IV et VI.

(2) T. Kuhn, La Structure des Révolutions Scientifiques (trad. fr.). Paris, Flammarion, 1972.

Duhem ([1]) et par T. Kuhn ([2]) procèdent de «vrais» paradoxes de cette sorte. De la résolution (et nullement de la réduction) d'un tel paradoxe procède un nouveau paradigme en lequel la fumée initiale devient lumière, — une lumière éventuellement difficile à regarder en face (exemple: l'interaction instantanée à distance de Newton), mais très éclairante, aussi bien rétrospectivement que prospectivement. La formulation, — la *formalisation,* — du paradigme consiste d'abord en la production d'un système d'équations «révolutionnaires» décrivant précisément les faits (exemple: les formules du groupe de Lorentz-Poincaré pour les changements de repère d'inertie); ensuite *et surtout* en l'énoncé d'un discours interprétatif qui habille au plus près les formules, comme le vêtement bien coupé par un maître-tailleur (exemple: la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, isomorphe aux précédentes formules). Du paradoxe au paradigme il y a la nécessité d'une conversion, — souvent, chez le découvreur, une tempête intérieure décrite par plusieurs d'entre eux, — et, dans le public, d'énormes remous (comme on l'a vu dans l'affaire Galilée ou, après 1918, quand la relativité a été présentée dans les journaux de vulgarisation).

Le paradoxe d'Einstein ([3]) de 1927, ou EPR ([4]) de 1935, tel que je le vois, est né de l'union du paradoxe de Born et du paradoxe de la symétrie temporelle intrinsèque de la quasi-totalité des équations de la physique ([5]), discuté par Loschmidt en 1876 et par Zermelo en 1896 dans le contexte de la mécanique statistique de Boltzmann, — laquelle est fort contraire à notre expérience macroscopique de la dissymétrie entre avenir et passé. Les paradoxes (parents) de Loschmidt et de Zermelo ont une commune racine dans le Calcul des Probabilités lui-même, et je vais la discuter brièvement parce qu'elle touche de très près à notre sujet.

Dans la grande majorité des cas, — et notamment ceux qui

([3]) A. Einstein *in* Rapports et Discussions du 5ème Conseil Solvay. Paris, Gauthier-Villars, 1928, p. 253-256.

([4]) A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen. Phys. Rev. 47, 777 (1935).

([5]) Plus techniquement (pour raisons de covariance relativiste) PT-symétrie (symétrie d'espace-temps) voire, s'il y a lieu, CPT-symétrie (C, échange particule-antiparticule).

nous intéressent, — les probabilités de transition du Calcul des Probabilités sont symétriques en l'état initial et l'état final, et donc réversibles. Livrée à elle-même, la mathématique (en fait, dans les problèmes élémentaires, l'analyse combinatoire) donnerait donc des formules identiques pour la prédiction et pour la rétrodiction statistiques à partir d'un état donné. Or, en physique, le fait est que le calcul prédictif «aveugle» (pour parler comme Watanabe) donne d'excellents résultats, que l'expérience confirme, alors qu'un calcul rétrodictif «aveugle» donne un résultat aberrant. Soit, par exemple, un jeu de cartes «en ordre», l'ordre étant défini comme l'appartenance de la permutation des cartes à un sous-ensemble peu peuplé. Le calcul prédictif décrit fort bien comment des battages successifs détruisent l'ordre, alors que le calcul rétrodictif symétrique du précédent ferait émerger (pardon: ferait *avoir émergé*) le jeu en ordre d'une suite de battages, — ce que personne ne voudra croire.

Confrontée à ce problème de la rétrodiction (comme on dit aujourd'hui) ou de la «probabilité des causes» (comme on disait alors), les classiques décidaient de traiter de manières entièrement dissymétriques les problèmes prédictifs et les problèmes rétrodictifs. En prédiction, usage «aveugle» de l'analyse combinatoire. En rétrodiction, introduction d'un jeu de probabilités extrinsèques, estimées au mieux en fonction de l'insertion du système dans le contexte d'ensemble, et emploi de la formule des probabilités composées de Bayes. En somme, puisque la mathématique laissée à elle-même ne rendait pas compte de la dissymétrie temporelle observée (à l'échelle macroscopique), on définissait *ad hoc* un usage asymétrique de la mathématique. Or, puisque les probabilités extrinsèques de Bayes décrivaient en somme l'*interaction* du système partiel avec l'ambiance, la règle édictée équivalait à dire que cette interaction produit ses effets après qu'elle a cessé et pas avant qu'elle ait commencé, — ce qui est l'énoncé traditionnel de la causalité (par opposition à la finalité). Par où l'on voit que ce *principe de causalité* temporellement asymétrique pourrait bien n'être *que* de nature probabiliste et macroscopique, — alors qu'au niveau élémentaire tout indique qu'il règne un autre type de causalité, *essen-*

tiellement symétrique entre avenir et passé. L'on voit aussi à quel point le terme de *principe de probabilité des causes* était en harmonie avec la métaphysique des classiques, bien qu'il n'ait peut-être pas été choisi en pleine connaissance... de cause.

Quoiqu'il en soit Van Der Waals ([6]) en 1911 a clairement montré que la «déduction statistique» du théorème de la croissance de l'entropie («Second Principe» de la Thermodynamique) implique le recours qu'on a dit à la formule de Bayes.

C'était montrer que le «Second Principe» n'est pas un principe comme les autres, en ce sens qu'il relève beaucoup plus de la jurisprudence que du droit au sens strict. Comme l'écrit Mehlberg, il est «de fait et non de droit».

Ceci dit, n'oublions pas que le calcul des probabilités de notre problème est le calcul ondulatoire des probabilités de Born où, ainsi que l'ont expliqué Fock ([7]), Watanabe ([8]), et d'autres, la prédiction aveugle recourt aux ondes divergentes ou «retardées», et la rétrodiction aveugle aux ondes convergentes ou «avancées». La «nouvelle mécanique quantique» (où les deux concepts *d'onde* et de *probabilité* sont l'un et l'autre inhérents) lie donc univoquement et la (micro) symétrie intrinsèque, et la (macro) dissymétrie de fait, des probabilités prédictives et rétrodictives d'une part, des ondes divergentes et convergentes de l'autre. Mais, bien entendu, ce n'est pas tout, car il reste à discuter *ensemble* le paradoxe des termes de battement de Born et celui de la symétrie passé-futur intrinsèque, fondus ensemble par l'union de deux parents aux réputations paradoxales bien établies. Cette discussion est tout à fait lumineuse au moyen des formules, mais la règle du jeu est ici de s'expliquer sans formules.

J'userai donc d'un apologue. Soient deux dés qu'on agite dans un cornet C et qu'on lit en L et N lorsqu'ils s'arrêtent de rouler sur la table (fig. 1). Dans les corrélations d'Einstein (1927) ou EPR (1935) *le fait est* (selon le calcul «néo-quantique», et selon les expériences vérificatrices ([6])) que ces dés sont cor-

([6]) J. D. Van Der Waals, Phys. Zeits. 12, 547 (1911).

([7]) V. Fock, Dokl. Akad. Nauk. SSSR 60, 1157 (1948).

([8]) S. Watanabe, Rev. Mod. Phys. 84, 1008 (1951).

([9]) S. J. Freedman et J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett. 28, 938 (1972); J. F.

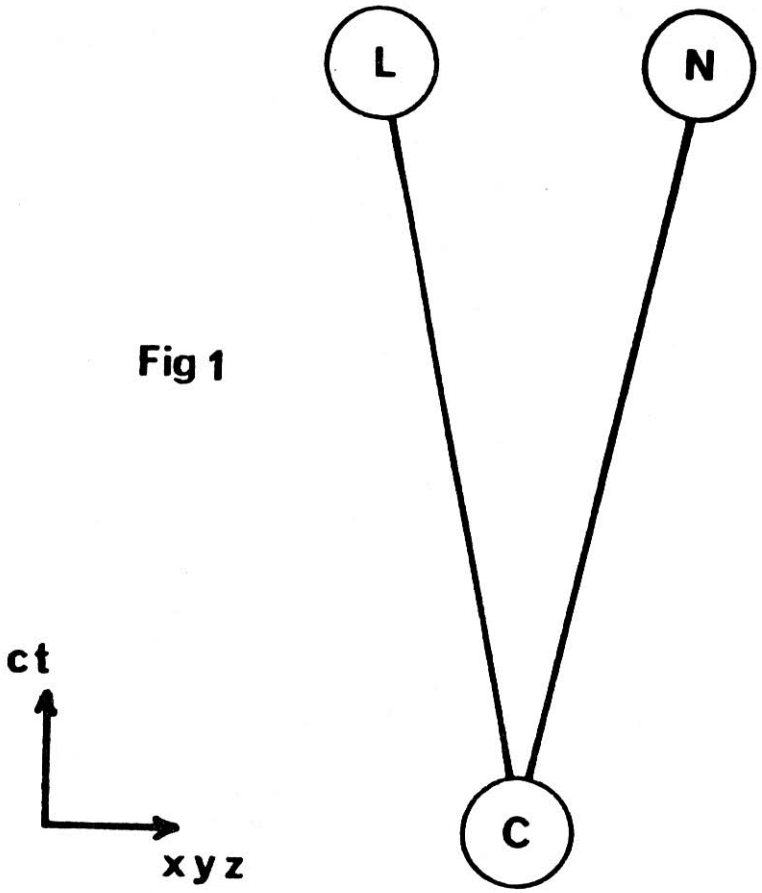

Fig 1

rélés: si l'un montre le 6, l'autre montre le 6 aussi (par exemple).

A première vue cela ne semble pas si paradoxal, mais, à seconde vue, il en va autrement: *le formalisme même du calcul ondulatoire des probabilités implique que ce n'est certainement pas en* C «*dans le cornet*» que «*les dés sont jetés*», *mais en* L *et* N «*lorsqu'ils finissent de rouler sur la table*». Cela *seul* ne serait pas paradoxal, *n'était le fait que ces dés sont corrélés.*

Jetés en L et N, *et* corrélés ? Quelle connexion physique peut-

CLAUSER, Phys. Rev. Lett. 36, 1223 (1976); E. S. FRY et R. C. THOMPSON, Phys. Rev. Lett. 37, 466 (1976).

il y avoir entre eux, sinon celle liant L à N par leur passé commun C ? Non seulement c'est *là* le chemin qui est physiquement occupé, mais aussi (on le montre) c'est le chemin suivi par l'inférence logique et celui suivi par le calcul. Logique, mathématique, physique, vont ainsi la main dans la main, — comme il se doit. C'est formellement clair, et c'est conforme aux expériences, — mais c'est paradoxal, parce que cela implique manifestement un concept temporellement symétrique de la causalité, allant indifféremment du passé vers le futur ou du futur vers le passé. Telle est la conclusion obtenue indépendamment par moi-même ([10]), par Stapp ([11]) et par Davidon ([12]), conclusion qui semble bien difficilement réfutable, mais aussi, pour certains, bien difficile à accepter !

La «nouvelle mécanique quantique» est principalement occupée à calculer des «probabilités de transition» entre des «préparations» (initiales) et des «mesures» (finales), — probabilités qui sont temporellement symétriques, et peuvent indifféremment se lire en prédiction ou en rétrodiction. Un schème remarquablement élégant et efficace pour cela est dû à Feynman ([13]); il a enchanté les vulgarisateurs parce qu'il se visualise en graphes d'espace-temps avec des zigzags (fig. 1 et 2) qui, conceptuellement, se parcourent indifféremment du passé vers le futur ou du futur vers le passé, avec des allers-retours temporels. Ce schème de zigzags de Feynman, où les exigences du formalisme quantique et celles du formalisme relativiste sont admirablement synthétisées, semble ainsi prédestiné à formaliser les corrélations paradoxales d'Einstein, et j'ai montré ([14]) qu'il en va bien ainsi. Plus précisément, l'on met de la sorte en évidence *le paradoxe* d'Einstein *proprement dit,* comme une «*nonséparabilité*» (pour parler comme B. D'Espagnat ([15]), *entre*

([10]) O. Costa de Beauregard, C. R. Acad. Sci. 236, 1632 (1953); Rev. Intern. Philos. 61-62, 1 (1962), Dialectica 19, 280 (1955); *in* Proc. Intern. Conf. Thermodynamics, P. T. Landsberg editor, Londres, Butterworths, 1970, p. 530.

([11]) H. P. Stapp, Nuovo Cim. 29B, 270 (1975).

([12]) W. C. Davidon, Nuovo Cim. 36B, 24 (1976).

([13]) R. P. Feynman, Phys. Rev. 76, 749 et 769 (1949).

([14]) O. Costa de Beauregard, Nuovo Cim. 42B, 41 (1977) et 51B, 267 (1979).

([15]) B. D'Espagnat, Conceptual Foundations of Quantum Mechanics, 2e éd. New York, Benjamin, 1976.

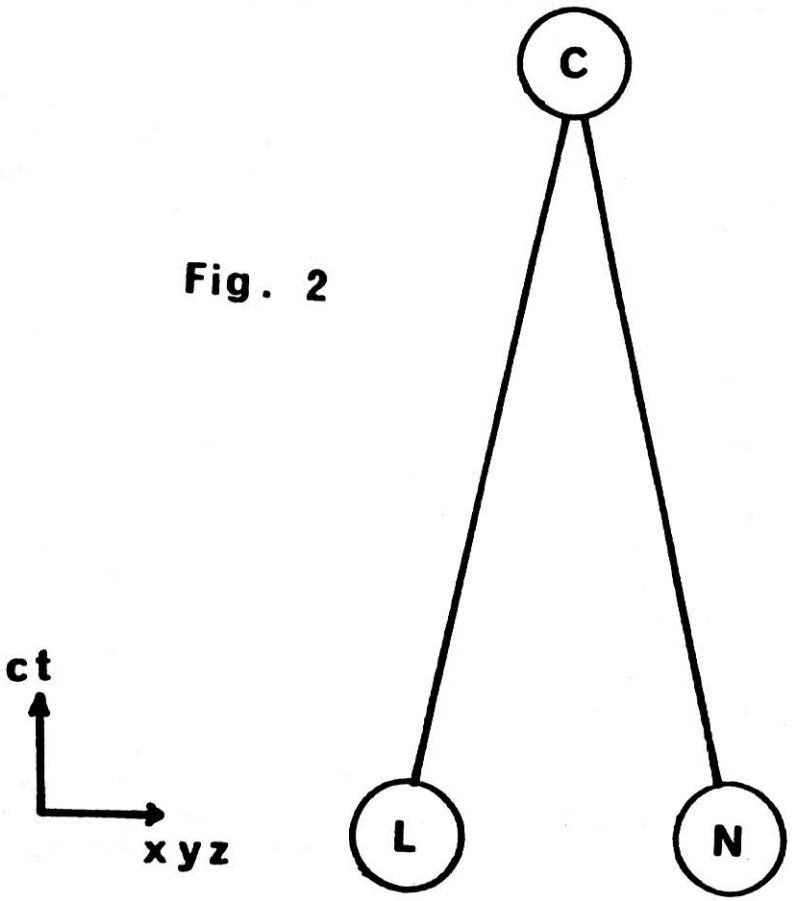

Fig. 2

mesures distantes L *et* N *connectées par leur commun passé* C (*fig. 1*), *et aussi le paradoxe* d'Einstein *inverse* comme une «*non-séparabilité*» *entre préparations distantes* L *et* N *connectées par leur commun futur* C (*fig. 2*). Ce phénomène a, également, été observé expérimentalement ([16]) et il est, également, des plus paradoxal. En bref, la séparation spatiale, même très grande, n'est pas une garantie de non-séparabilité au niveau

([16]) R. L. Pflegor et L. Mandel, Phys. Rev. 159, 1084 (1967); Journ., Opt. Soc. Amer. 58, 946 (1969).

élémentaire, car une connexion peut être établie soit par le passé, soit par le futur.

J'ai laissé entendre que les propositions, apparentées, de Stapp, Davidon et moi-même, ne font pas l'unanimité, loin de là; mais le fait est qu'il n'y a pas deux des physiciens activement concernés pour proposer le même paradigme, bien que *tous* s'accordent à juger inévitable l'avènement d'un nouveau paradigme. C'est là, selon Duhem ([1]) et Kuhn ([2]), le critère même d'une «révolution scientifique».

Eberhard est l'un de ces physiciens, et il ([17]) résume ainsi la situation présente. Il y a, dit-il, quatre, et seulement quatre issues possibles:

1°) On calcule, par ce qu'on sait que cela marche très bien, mais l'on ne réfléchit pas, de peur d'attraper la migraine. C'est l'option de la majorité, — et la politique de l'autruche.
2°) Peut-être la mécanique quantique sera-t-elle trouvée en défaut dans des cas particulièrement sophistiqués, et sera-t-on ainsi délivré du cauchemar de la «non-séparabilité». Diverses propositions ont été faites en ce sens, mais les expériences (qui s'accumulent) ne cessent de réduire le champ où elles peuvent s'exercer...
3°) Peut-être est-ce la relativité qui cesse de s'appliquer au niveau fin, et une forme de télégraphie directe du genre espace (à l'extérieur du cône de Minkowski) a-t-elle lieu. Einstein n'eut pas souscrit à ce genre de propositions en 1927, mais le fait qu'il y en a eu de produites...
4°) Si l'on veut garder les yeux ouverts, et garder sa confiance et à la mécanique quantique, et à la relativité, alors, dit Eberhard, la seule issue restante est de réformer le concept de la causalité hérité de l'expérience macroscopique.

C'est la solution ici défendue et (pour paradoxale qu'elle soit) celle compatible avec l'affirmation du 1°, ainsi qu'avec le fait qu'il existe un schème mathématique *parfaitement* opérationnel

([17]) P. Eberhard, Nuovo Cim. 46B, 392 (1978).

en ce problème, *un schème appartenant à la mécanique quantique relativiste telle qu'elle existe.*

L'originalité de ma position (si ç'en est une) est qu'elle consiste en une *lecture littérale* du schème de la mécanique quantique relativiste, proposé en «seconde quantification» par Tomonaga, Schwinger et Feynman ou, en «première quantification», par moi-même ([18]). Oserais-je remarquer qu'en 1905 Einstein avait proposé une *lecture littérale* des formules de Lorentz-Poincaré ? Cet illustre parrainage me rassure, s'il faut réformer le concept de la causalité...

Je ne m'étendrai pas ici sur l'implication qu'une symétrie «passé-futur» intrinsèque entraîne, en physique macroscopique, quelque chose *d'analogue* à ce que la symétrie «particule-antiparticule» a entraîné en physique des particules: que des contextes pourraient être cherchés où se manifesteraient des phénomènes d'ondes convergentes et de probabilités décroissantes. J'ai un peu discuté cete éventualité ailleurs ([19]).

Sur un point en tout cas (je l'ai dit) *tous* les théoriciens concernés sont d'accord: la *réalité* «copernicienne» du paradoxe d'Einstein, établie par de multiples expériences ([8])([16]), rend inévitable la promulgation d'un paradigme nouveau, et qui sera «révolutionnaire» ([20])...

Institut Henri Poincaré O. Costa de Beauregard

([18]) O. Costa de Beauregard, Précis de Mécanique Quantique Relativiste, Dunod, Paris, 1967.

([19]) O. Costa de Beauregard, Found. Phys. 6, 539 (1976); Synthèse 35, 129 (1977).

([20]) Voir à ce sujet, J. F. Clauser et A. Shimony, Reports on Progress in Physics, 41, 1881 (1978).