

## Einstein 1905-1955 : son approche de la physique

Thibault DAMOUR  
 Institut des Hautes Études Scientifiques  
 35, route de Chartres  
 91440 Bures-sur-Yvette

**Résumé.** On passe en revue les conceptions épistémologiques d'Einstein, en indiquant leurs racines philosophiques. L'importance particulière des idées de Hume, Kant, Mach et Poincaré est relevée. Les caractéristiques particulières de l'approche de la physique par Einstein sont soulignées. Enfin, on considère l'application concrète des principes méthodologiques einsteiniens aux deux théories de la relativité, et à la théorie quantique.

### 1 Sur l'épistémologie d'Einstein

Certains analystes de la pensée d'Einstein, notamment l'historien Gerald Holton mais aussi le physicien Max Born, ont suggéré qu'Einstein aurait radicalement changé son approche épistémologique, en partant d'un positivisme machien pur et dur dans sa jeunesse (et notamment en 1905) pour finir par un rationalisme platonisant. Je pense plutôt, en accord avec les fines analyses de Michel Paty [1], qu'Einstein a toujours eu une vision multiple et nuancée de la théorie de la connaissance, même si la découverte de la théorie de la Relativité Générale a eu l'effet d'infléchir partiellement son épistémologie du côté d'un rationalisme plus spéculatif. La meilleure formulation que je connaisse de la subtilité et de la complexité des idées d'Einstein sur l'épistémologie est contenue dans un passage de la "Réponse aux critiques" qu'il écrivit pour le livre *Albert Einstein : philosophe scientifique* [2]. Comme cette formulation est centrale pour cet exposé, citons-la extensivement (dans la traduction française de Michel Paty [1]) :

"Le rapport réciproque de l'épistémologie<sup>1</sup> et de la science est d'une nature assez remarquable. Elles dépendent l'une de l'autre. L'épistémologie, en l'absence de contact avec la science, devient un schème vide. La science sans épistémologie est – pour autant qu'elle soit alors seulement pensable – primitive et embrouillée. Cependant, à peine l'épistémologue<sup>2</sup>, qui recherche un système clair, s'est-il frayé un chemin vers un tel système, qu'il est tenté d'interpréter le contenu de la pensée de la science dans le sens de son système et de rejeter tout ce qui n'y entre pas. Le scientifique<sup>3</sup>, quant à lui, ne peut pas se permettre de pousser aussi loin son effort en direction d'une systématique épistémologique<sup>4</sup>. Il accepte avec reconnaissance l'analyse conceptuelle de l'épistémologie ; mais les conditions externes, qui interviennent pour lui au travers des faits de l'expérience, ne lui permettent pas de se laisser trop restreindre dans la construction de son monde conceptuel par l'adhésion à un système épistémologique quel qu'il soit. Il doit donc apparaître à l'épistémologue systématique comme une espèce d'opportuniste sans scrupule : il apparaît comme un *réaliste* dans la mesure où il cherche à décrire un monde indépendant des actes de la perception ; comme un *idéaliste* dès lors qu'il considère les concepts et les théories comme des libres inventions de l'esprit humain (elles ne peuvent être déduites logiquement du donné empirique) ; comme un *positiviste* s'il considère que ses concepts et ses théories ne sont justifiés *que* dans la mesure où ils fournissent une représentation logique des relations entre les expériences des sens. Il peut même apparaître comme un *platonicien* ou un *pythagoricien* s'il considère que le point de vue de la simplicité logique est un outil indispensable et effectif de la recherche."

<sup>1</sup> "Erkenntnistheorie".

<sup>2</sup> "Erkenntnistheoriker", littéralement, le théoricien de la connaissance.

<sup>3</sup> "... der Scientist".

<sup>4</sup> "... erkenntnistheoretischer Systematik".

Pour compléter cette citation, écoutons aussi ce qu'Einstein dit dans sa Herbert Spencer Lecture, prononcée à Oxford le 10 juin 1933 [3] :

“Si vous voulez apprendre quelque chose sur les méthodes de la physique théorique de la part de ceux qui l'utilisent, je vous suggère de vous en tenir au principe suivant : n'écoutez pas ce qu'ils disent et tenez-vous à ce qu'ils font !”

Moralité :

- Quel que soit le travail d'Einstein considéré, il ne faut pas essayer de l'interpréter à l'aune d'une seule approche épistémologique, mais au contraire essayer de mettre à jour ses diverses composantes : empiriste, réaliste, idéaliste, spéculative, . . . , et
- pour appréhender la richesse de l'approche de la physique d'Einstein, le mieux est de considérer des exemples précis, fondés sur ses travaux ou sur les textes où il s'est expliqué en détail.

Cependant, avant de considérer des exemples concrets où l'on voit Einstein mettre en action son épistémologie, il est important d'avoir une idée des sources de cette épistémologie.

## 2 Einstein et la philosophie

D'abord, notons qu'Einstein s'est toujours beaucoup intéressé à la philosophie en général, et plus particulièrement à la philosophie de la connaissance (ce qu'il appelle *Erkenntnistheorie*, théorie de la connaissance, que l'on appellera ici *épistémologie*).

En 1902, à Berne, Maurice Solovine, qui étudiait alors la philosophie et la physique, était venu voir Einstein à la suite d'une petite annonce que ce dernier avait fait paraître dans un journal de Berne, où il se proposait pour donner des leçons particulières en physique. Einstein lui confia à cette occasion qu'il avait eu “quand il était plus jeune, un goût très vif pour la philosophie, mais que le vague et l'arbitraire qui y règnent l'en ont détourné, et qu'il s'occupait maintenant uniquement de physique”. Cependant, assez rapidement les leçons de physique à Solovine se transformèrent en discussions sur les fondements de la physique. Ces discussions proprement épistémologiques furent élargies à un petit groupe de trois amis : Einstein (1879-1955), Maurice Solovine (1875-1958) et Konrad Habicht (1876-1958). Avec humour, ils donnaient à leur petit groupe de discussion le nom pompeux d'“Académie Olympia”. Ils se donnèrent d'ailleurs un programme ambitieux de lecture et de discussion d'œuvres philosophiques, épistémologiques, critiques ou historiques, notamment : *L'analyse des sensations* et *La mécanique, exposé historique et critique de son développement* d'Ernst Mach, la *Logique* de John Stuart Mill, le *Traité de la nature humaine* de David Hume, la *Grammaire de la science* de Karl Pearson, la *Critique de l'expérience pure* de Richard Avenarius, l'*Essai sur la philosophie des sciences* d'Ampère, *Science et hypothèse* de Poincaré, la thèse *sur les fondements de la géométrie* de Riemann, l'essai *Sur la nature des choses en elles-mêmes* de Clifford, *Que sont les nombres et à quoi servent-ils ?* de Dedekind. A ceci s'ajoutait un programme d'œuvres philosophiques ou littéraires de culture générale comprenant : des dialogues de Platon, des œuvres de Leibniz, l'*Antigone* de Sophocle, des tragédies de Racine et le *Don Quichotte* de Cervantes. Notons aussi qu'Einstein avait lu, dans sa jeunesse ou quand il était au Polytechnique de Zurich, d'autres philosophes ou des textes de scientifiques s'intéressant aux fondements de la science, notamment Kant (lu dès l'âge de seize ans et relu ensuite), Spinoza, Schopenhauer, Berkeley, Galilée, Boltzmann, Helmholtz et Hertz. Plus tard, il continua à lire des philosophes ou épistémologues (notamment Russell, Bergson, Emile Meyerson) et eut des échanges et discussions avec Russell, avec le néo-kantien Ernst Cassirer, et avec des épistémologues du Cercle de Vienne : Moritz Schlick, Rudolf Carnap, et Hans Reichenbach.

Cette longue énumération montre l'intérêt profond d'Einstein pour la philosophie, et son attirance plus particulière vers une réflexion méthodologique sur les fondements de la science. Il est certain que cette réflexion épistémologique a joué un rôle crucial dans ses travaux scientifiques, en lui permettant notamment de dépasser des blocages psychologiques qui limitaient l'horizon intellectuel de beaucoup de scientifiques au début du siècle. Il s'agit là d'une question subtile et complexe et nous nous contenterons de brèves indications.

### 3 Hume, Kant, Mach et Poincaré

Les penseurs qui ont, probablement, le plus influencé la réflexion méthodologique d'Einstein et qui, à un titre ou à un autre, l'ont aidé dans ses travaux scientifiques sont : David Hume, Emmanuel Kant, Ernst Mach et Henri Poincaré.

- David Hume (1711-1776) vient après Newton, Locke et Berkeley. Il se pose la question fondamentale : “Comment connaissons-nous?”. Il examine, de façon critique, l'origine et le contenu de notions générales comme espace, relation, substance, causalité. Sceptique, il met en doute le fondement logique de l'idée que la science abstrait, par une logique inductive, des lois générales à partir de l'expérience. Par exemple, il considère que la causalité est fondée non sur la nécessité logique mais sur l'habitude.
- Emmanuel Kant (1724-1804) réfléchit, entre autres, sur les idées de Newton, Leibniz et Hume. En approfondissant la nature des connaissances scientifiques, et des objets et structures de la science (espace, temps, matière, force, causalité), il introduit une profonde révolution conceptuelle. Avant lui on pensait que toute connaissance, pour être vraie, devait se régler sur les objets. Il inverse cette vision traditionnelle, en introduisant l'idée que ce sont plutôt les objets qui se règlent sur la connaissance humaine. Plus précisément, il conçoit l'objectivité et la certitude de la connaissance comme résultant de conditions que lui imposent les exigences du sujet qui connaît. Par exemple, l'espace et le temps ne sont plus pensés par lui comme des réalités physiques qui existent avant et à côté de la matière, mais comme des formes *a priori* de la sensibilité humaine qui servent de fondements idéaux pour penser et représenter la réalité.
- Ernst Mach (1838-1916) était un physicien qui s'est préoccupé de la critique historique des concepts fondamentaux de la physique, et s'est intéressé à la psychophysiologie des sensations. Il a développé une épistémologie empiriste, critique et positiviste, prônant une réduction phénoménaliste aux sensations et rejetant toute “métaphysique”. Il mena une critique décapante des *a priori* de la mécanique newtonienne (temps absolu, espace absolu, mouvement absolu) en insistant sur la nécessité de s'en rapporter à la possibilité d'observations expérimentales. Il insistait sur la seule réalité des mouvements relatifs.
- Henri Poincaré (1854-1912) mena une réflexion profonde sur les fondements des mathématiques, dont il publia les fruits dans des articles à teneur philosophique et dans ses livres de vulgarisation, notamment *La science et l'hypothèse* (1902), qui tint en haleine pendant plusieurs semaines Einstein et ses amis de l'Académie Olympia. L'élément central de la philosophie scientifique de Poincaré (que l'on appelle le *conventionalisme*) est le *libre choix* que peut faire le scientifique de ses principes fondamentaux. Poincaré avait été frappé, comme beaucoup, par la découverte de la cohérence logique des géométries non euclidiennes, et notamment des géométries admettant (à la Klein) des groupes de symétrie aussi grands que la géométrie euclidienne : comme la géométrie hyperbolique (Lobatchevski) ou sphérique (Riemann). Il en concluait que le choix d'une géométrie particulière était une *convention arbitraire*, liée au choix compensateur d'autres conventions dans la présentation des phénomènes physiques.

A propos de l'influence de Poincaré sur Einstein notons que certains auteurs ont suggéré qu'Einstein aurait lu, avant 1905, non seulement *La science et l'hypothèse*, mais d'autres publications de Poincaré (notamment un article écrit par lui en 1900 pour le Festschrift de Lorentz), y aurait trouvé des idées utiles à ses recherches en Relativité Restreinte, et aurait omis ensuite de citer pour cela. Vu le fait qu'Einstein cite chaleureusement l'influence de la lecture de *La science et l'hypothèse* du “profond et sagace” Poincaré sur son invention de la Relativité Générale, vu la difficulté qu'avait Einstein à consulter, quand il travaillait à Berne, la littérature scientifique<sup>5</sup>, et

<sup>5</sup>Notons à ce propos qu'alors que Poincaré avait, contrairement à Einstein, un accès facile à toute la littérature scientifique il semble qu'il ait ignoré l'existence des publications d'Einstein sur la Relativité jusqu'en 1909, bien qu'elles aient été publiées dans l'un des plus prestigieux journaux de physique de l'époque. Il ne faut donc pas surestimer la connaissance que les scientifiques avaient, à l'époque, de la littérature, surtout quand il s'agit d'articles publiés seulement dans un Festschrift. Il n'y avait pas de photocopieuses à l'époque et donc on pouvait seulement consulter les articles dans une bibliothèque. Rappelons en passant qu'Einstein précise dans une lettre à Stark

vu le fait que la seule citation par Einstein d'un article de Poincaré (Lorentz-Festschrift, 1900) date de 1906 et se contente de citer l'existence de cet article sans en reprendre aucun résultat, il me semble psychologiquement probable qu'Einstein n'avait, en 1905, lu que *La science et l'hypothèse*. En outre, il est probable que la lecture de ce livre de Poincaré n'a pas été aussi exhaustive que l'on pourrait penser. En effet, Solovine raconte que quand l'Académie Olympia se passionnait pour un livre : "on lisait une page, une demi-page, quelquefois une phrase seulement et la discussion, quand le problème était important, se prolongeait pendant plusieurs jours" (cité par [1] p. 373). Clairement la discussion, dans *La science et l'hypothèse*, de l'origine des structures géométriques a passionné les membres de l'Académie Olympia, et il est plausible qu'ils ont à peine pris note des brèves allusions de Poincaré aux problématiques du mouvement relatif ou de l'absence d'"intuition directe de la simultanéité de deux événements" (voir citations dans [4]).

#### 4 Philosophie scientifique et innovation conceptuelle chez Einstein

On peut considérer que la philosophie scientifique d'Einstein a été construite en grande partie, dès sa jeunesse (disons avant 1905), comme une synthèse personnelle de ses lectures philosophiques et épistémologiques rappelées ci-dessus. Parmi ces lectures, celles de Hume, Kant, Mach et Poincaré jouèrent un rôle tout particulier. Dans ses *Remarques sur la théorie de la connaissance de Bertrand Russell* [5], Einstein résume ce que Hume et Kant lui ont apporté :

"Hume a vu que des concepts que nous regardons comme essentiels, comme par exemple celui du lien de cause à effet, ne pouvaient pas être tirés du matériau fourni par les sens. [...] L'homme aspire à des connaissances sûres. C'est pourquoi le message si lumineux de Hume apparut comme une catastrophe : le matériau sensoriel brut, seule source de notre connaissance, peut mener par habitude à la croyance et à l'expectative, mais pas au savoir ni *a fortiori* à la compréhension de relations fondées sur des lois. Vint alors Kant, avec une idée qui était certes intenable sous la forme qu'il lui avait donné, mais qui représentait un pas en avant vers une solution du dilemme de Hume. Aucune connaissance d'origine empirique n'est jamais sûre (Hume). Donc, si nous possédons des connaissances sûres, il faut qu'elles soient fondées dans la raison elle-même. C'est ce que Kant affirme, par exemple, des principes de la géométrie et du principe de causalité, connaissances qui, avec quelques autres, font pour ainsi dire partie des instruments de la pensée, sans qu'il faille les tirer des données sensorielles (c'est-à-dire qu'elles sont des connaissances "*a priori*"). Naturellement, chacun sait aujourd'hui que lesdites connaissances ne sont pas aussi sûres et n'ont pas de nécessité interne aussi établie que Kant le croyait<sup>6</sup>. Mais ce qui me paraît juste dans sa position face au problème, c'est la constatation que, lorsque nous pensons, nous nous servons assez "légitimement" de ce genre de concepts auxquels, à observer la situation d'un point de vue logique, on n'accède pas à partir du matériau fourni par l'expérience des sens."

Ailleurs (dans *Physique et réalité*, 1936, voir [1]), Einstein reconnaît que le grand mérite de Kant est d'avoir affirmé l'intelligibilité du monde comme condition nécessaire à sa représentation scientifique : "C'est l'un des grands accomplissements de Kant d'avoir montré qu'il serait dénué de sens de poser l'existence d'un monde extérieur réel sans cette intelligibilité."

Il faut bien sûr se souvenir que ces textes ont été écrits après la construction, par Einstein, des deux théories de la Relativité et après leurs premières vérifications expérimentales. Ces théories confirmèrent à la fois : (1) la nécessité de poser *a priori* un cadre logique définissant l'intelligibilité du monde, et (2) la possibilité de changer ce cadre logique. Cependant, au vu des nombreuses lectures épistémologiques effectuées par Einstein avant 1905, il semble clair que l'épistémologie d'Einstein exprimée dans les textes ci-dessus n'est pas (tout au moins pour l'essentiel) une rationalisation *a posteriori*, mais a joué un rôle important en aidant le physicien Einstein à poser de nouveaux cadres logiques définissant une intelligibilité approfondie du monde.

Plus précisément, Einstein comprit que :

---

(septembre 1907) : "Je ne suis malheureusement pas en mesure de consulter tout ce qui est paru sur le sujet, car la bibliothèque est fermée à mes heures de liberté."

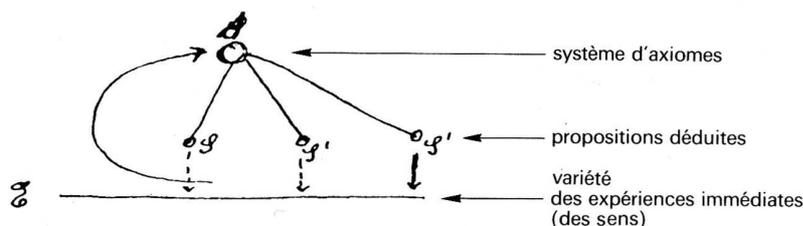
<sup>6</sup>Ici on voit arriver l'importance des considérations critiques de Mach, mettant en cause les *a prioris* newtoniens, et du conventionalisme de Poincaré, insistant sur le libre choix des *a prioris*.

- le scepticisme de Hume désacralisait les grands absolus conceptuels et invitait à chercher les “habitudes” sur lesquelles ils reposaient ;
- le rationalisme de Kant invitait à chercher l’origine des cadres scientifiques fondamentaux dans le pouvoir d’intelligibilité du sujet connaissant ;
- le positivisme de Mach invitait à mettre en question les absolus newtoniens et à exprimer la physique en termes de concepts reliés à des observations expérimentales ;
- le conventionalisme de Poincaré insistait sur le libre choix des concepts scientifiques fondamentaux, et, en même temps, sur l’origine physiologico-expérimentale de la géométrie.

Einstein sut ainsi “faire son marché” chez les grands penseurs de la science, et y trouver des éléments *libérateurs* pour ses recherches en physique. Ce faisant il évita d’épouser ce qui pouvait être les éléments bloquants de ses prédécesseurs : comme un scepticisme universel, un blocage sur le caractère *a priori* des concepts d’espace et de temps, une emphase exagérée sur la nécessité de fonder chaque concept sur des observations, ou une insistance sur le caractère *arbitraire* et *conventionnel* des principes scientifiques de base.

Plus précisément, on peut dire qu’Einstein ajouta aux enseignements positifs rappelés ci-dessus des épistémologies de Hume, Kant, Mach et Poincaré les éléments suivants qui sont des marques propres de son approche de la physique :

- Einstein insiste sur la recherche de *principes généraux* de la nature, et sur le caractère fructueux qu’il y a à contraindre les lois de la nature en imposant, comme hypothèse de départ, de tels principes.
- Einstein précise que “le chercheur doit extraire ces principes généraux de la nature en percevant dans des ensembles complexes de faits d’expérience certains caractères généraux qui permettent une formulation précise”.
- Il précise aussi que le choix de ces principes généraux, et plus généralement des concepts scientifiques fondamentaux, est une *libre invention* de la pensée qui ne peut pas être déduite logiquement de la masse des faits expérimentaux, mais qui est cependant fortement contrainte par celle-ci.



Mentionnons aussi la façon dont Einstein résuma, pour son vieil ami Maurice Solovine, sa vision épistémologique. Cette vision est résumée dans un schéma de sa main (voir figure ci-dessus, reprise de [1]), accompagné des explications suivantes [6] :

1. Les  $\mathcal{E}$  (expériences vécues) nous sont données.
2.  $\mathcal{A}$  sont les axiomes d’où nous tirons des déductions. Psychologiquement, les  $\mathcal{A}$  reposent sur les  $\mathcal{E}$ . Mais il n’y a pas de voie logique des  $\mathcal{E}$  aux  $\mathcal{A}$  mais seulement un rapport intuitif (psychologique) d’interdépendance toujours “révocable”.
3. A partir des  $\mathcal{A}$  sont déduites par voie logique des propositions individuelles  $\mathcal{S}$ , et ces déductions peuvent prétendre à l’exactitude.
4. Les  $\mathcal{S}$  sont mis en relation avec les  $\mathcal{E}$  (vérification par l’expérience). Cette procédure, à y regarder de près, appartient elle aussi à la sphère extra-logique (intuitive), parce que les relations des concepts intervenant dans les  $\mathcal{S}$  avec les expériences vécues  $\mathcal{E}$  ne sont pas de nature logique.

Mais cette relation des  $\mathcal{S}$  aux  $\mathcal{E}$  est (pragmatiquement) beaucoup moins incertaine que la relation des  $\mathcal{A}$  aux  $\mathcal{E}$  (exemple : le concept de chien et les expériences vécues qui y correspondent). Si on ne pouvait obtenir presque sûrement une telle correspondance, la machinerie logique serait sans aucune valeur pour la “compréhension de la réalité” (exemple : la théologie).

La quintessence, c’est le rapport d’interdépendance éternellement problématique de tout le pensé avec le vécu (expérience des sens).”

## 5 Einstein et les théories de la relativité

Commentons brièvement l’“application” des principes méthodologiques (i), (ii), (iii) indiqués ci-dessus au contexte de la découverte, par Einstein, des deux théories de la relativité.

Dans le cas du principe (i) et de la théorie de la Relativité Restreinte, rappelons que l’attitude d’Einstein était très différente de celle des ses “concurrents”, comme Lorentz ou Poincaré. Ces derniers pensaient l’existence d’“états correspondants” (Lorentz) ou le “principe de relativité” (Poincaré) comme des *conséquences* d’une *dynamique* sous-jacente à comprendre en détail, plutôt que comme un *axiome* de départ, définissant une nouvelle *cinématique*. Cela apparaît clairement dans la seule discussion sur la Relativité qu’eurent Einstein et Poincaré. Cette discussion eut lieu en 1911 au premier Conseil Solvay à Bruxelles. Elle est rapportée par Maurice de Broglie [7] :

“Je me rappelle qu’un jour à Bruxelles, comme Einstein exposait ses idées [sur la “mécanique nouvelle”, c’est-à-dire relativiste], Poincaré lui demanda : ‘Quelle mécanique adoptez-vous dans vos raisonnements?’ Einstein lui répondit : ‘Aucune mécanique’, ce qui parut surprendre son interlocuteur.”

Du coup, Lorentz (et sans doute aussi Poincaré) considèrent qu’Einstein “trichait” en “retournant le problème”, c’est-à-dire en supposant (cinématiquement) ce que, selon eux, il fallait prouver (dynamiquement).

La formulation ci-dessus, due à Einstein, du principe méthodologique (ii) éclaire un autre aspect des textes d’Einstein concernant l’invention de la théorie de la Relativité Restreinte. En effet, Einstein insiste sur l’abstraction de principes généraux d’“ensembles complexes de faits d’expérience”. Ceci explique le peu d’importance, pour la pensée d’Einstein, de l’expérience de Michelson-Morley considérée isolément. Contrairement aux manuels de Relativité qui insistent sur cette expérience particulière à cause de sa haute précision et de sa sensibilité aux termes d’ordre  $v^2/c^2$ , il est clair qu’Einstein était surtout sensible à l’existence de tout un “complexe” de faits expérimentaux (allant des expériences de la vie ordinaire – sur la Terre ou dans un train – à de nombreuses expériences d’électromagnétisme ou d’optique) suggérant l’impossibilité de détecter le mouvement absolu. L’expérience de Michelson-Morley n’était sans doute pour lui qu’un exemple particulier de ces faits expérimentaux qui ne prenaient sens que si on les pensait tous ensemble.

Enfin, à propos du principe méthodologique (iii), il est important de voir que la *libre invention* (du point de vue logique) d’Einstein s’oppose à la *convention arbitraire* de Poincaré. Alors que Poincaré déduisait de la liberté (logique) de choix des concepts scientifiques fondamentaux qu’il était plus sage de ne pas modifier les concepts hérités de la science du passé (notamment la géométrie euclidienne, et le temps absolu newtonien), Einstein était sensible aux suggestions tirées (intuitivement) de la masse des faits expérimentaux et pensait qu’à chaque stade de développement de la physique, un cadre logique particulier avait prééminence sur les autres. On voit clairement la différence d’attitude méthodologique entre Einstein et Poincaré en 1912. En mai 1912, deux mois avant sa mort, dans une conférence donnée à Londres sur “L’espace et le temps”, Poincaré écrit à propos de la conception (ou “convention”) de la théorie de l’espace-temps de la Relativité Restreinte à la Einstein-Minkowski [4] :

“Aujourd’hui certains physiciens veulent adopter une convention nouvelle [...] ceux qui ne sont pas de cet avis peuvent légitimement conserver l’ancienne pour ne pas troubler leurs vieilles habitudes. Je crois, entre nous, que c’est ce qu’ils feront encore longtemps.”

Au même moment, Einstein, qui avait convaincu en 1905 l'élite des physiciens de la nécessité de poser le nouveau cadre cinématique de l'espace-temps de la Relativité Restreinte, était en train<sup>7</sup> de faire éclater ce cadre et de le remplacer par un cadre cinématique profondément modifié : celui de l'espace-temps déformé de la Relativité Générale.

## 6 Einstein et le Kantique du Quantique

Et qu'en est-il de l'application des idées méthodologiques d'Einstein à la physique quantique ? Il est courant de penser qu'elles ont trouvé là leurs limites, et qu'Einstein manifesta un blocage conceptuel, fondé sur des notions *a priori* de "réalité", qui l'empêchèrent d'accepter les idées "révolutionnaires" de Heisenberg, Born, Jordan, Dirac, Schrödinger et Bohr. Je pense que cette vision n'est pas correcte, et ne fait justice ni à la subtilité de l'approche méthodologique d'Einstein, ni à ses contributions directes ou indirectes à ce qui constitue l'interprétation moderne (à la Everett) du formalisme quantique. Pour une discussion détaillée des importantes contributions méthodologiques d'Einstein à la compréhension actuelle de la Théorie Quantique je renvoie à un livre récent [8]. La suite et fin du texte présent est constituée d'extraits de ce livre. Ces extraits concernent plusieurs moments importants dans la compréhension du formalisme de la théorie quantique. Ces moments sont : (1) une conversation entre Heisenberg et Einstein où l'on voit que les suggestions épistémologiques d'Einstein jouèrent un rôle crucial dans l'invention (par Heisenberg) des "relations d'incertitude", (2) le rôle important de l'idée proposée par Einstein d'un "champ fantôme" ou "champ pilote" pour l'interprétation (par Born) de l'"amplitude de probabilité", (3) la collaboration avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, (4) les discussions entre Einstein et Schrödinger qui menèrent au fameux "chat de Schrödinger", (5) l'influence qu'Einstein eut sur Everett, lequel fut sans doute stimulé dans sa découverte de son interprétation de la théorie quantique par l'audition du dernier séminaire d'Einstein.

Le fil conducteur de ces différents moments est l'idée qu'Einstein, loin d'être bloqué dans des *a priori*s dépassés, avait une vision plus profonde et plus exigeante de ce que doit être une théorie physique que certains des physiciens quanticiens qui se satisfaisaient d'une vision purement positiviste de la physique. Cette vision peut être appelée, quand elle est appliquée à la théorie quantique, "Le Kantique du Quantique", car elle repose sur une idée qui remonte à Kant (mais qu'Einstein avait déduite de ses travaux en Relativité Générale) : *C'est la théorie elle-même qui définit "ce qui est réel"*.

## 7 Une conversation cruciale

*Berlin, Allemagne, début 1926*

Le jeune Werner Heisenberg était très ému et impressionné en pénétrant dans la salle du colloque de physique de l'université de Berlin, en cette journée du début de l'année 1926<sup>8</sup>. Il n'avait que vingt-cinq ans, et avait été invité à y faire un exposé sur la "nouvelle mécanique quantique", qui venait de naître. Pendant qu'il jetait, assez fiévreusement, un dernier coup d'œil sur ses notes, il voyait s'installer au premier rang la crème de la physique mondiale : Max Planck, Walther Nernst, Max von Laue, ... Les visages de ces physiciens, célèbres pour leurs découvertes fondamentales, gardaient tous le sérieux et la componction de rigueur dans la vie académique allemande. Puis, juste avant l'heure prévue pour le début de l'exposé, le physicien qui l'impressionnait le plus, celui dont il admirait l'œuvre depuis qu'adolescent il avait découvert sa théorie de la relativité générale dans un livre<sup>9</sup> intitulé *Espace-temps-matière*, celui dont son professeur et directeur de thèse à Munich, Arnold Sommerfeld, lisait parfois des lettres pour illustrer son cours, Albert Einstein entra dans

<sup>7</sup> Au risque de déstabiliser ses avocats les plus convaincus, notamment Planck qui critiqua publiquement Einstein pour oser toucher au principe de relativité (au sens restreint).

<sup>8</sup> Nous nous inspirons ici des souvenirs rédigés, bien plus tard, par Werner Heisenberg dans son remarquable livre *La partie et le tout (Le monde de la physique atomique, souvenirs 1920-1965)*, Editions Albin Michel, Paris (1972).

<sup>9</sup> Le livre, *Espace, temps, matière*, du mathématicien Hermann Weyl, fut l'un des premiers livres écrits sur la théorie de la relativité générale. Sa première édition date de 1918.

la salle et s’installa au premier rang, en lui adressant un petit sourire, en partie pour s’excuser d’arriver presque en retard, et surtout pour le mettre à l’aise.

Ainsi mis en confiance, Heisenberg commença à exposer les conceptions physiques, et le formalisme mathématique de la *nouvelle* théorie quantique. En effet, depuis quelques mois s’était développé, à une vitesse inouïe, un nouveau formalisme mathématique qui allait, espérait-on, supplanter la “vieille” *théorie des quanta*, c’est-à-dire cette collection disparate d’idées contradictoires développées entre 1900 et 1924 pour essayer de décrire les *discontinuités quantiques* dont l’existence s’était peu à peu imposée dans divers phénomènes physiques. La découverte qui avait initiée la théorie des quanta (la structure précise du rayonnement d’un corps noir) avait été faite ici-même à Berlin, grâce aux mesures très précises d’Otto Lummer, Ernst Pringsheim, Heinrich Rubens et Ferdinand Kurlbaum, et grâce à l’“acte de désespoir” théorique de Max Planck. Mais c’était surtout l’ensemble des travaux d’Einstein sur les quanta, entre 1905 et décembre 1924, qui avait montré la nécessité d’un bouleversement profond de la physique. A quoi s’ajoutaient, à partir de 1913, les conceptions novatrices de Niels Bohr qui avait montré comment appliquer les idées quantiques à la physique atomique.

Le nouveau formalisme quantique dont parlait Heisenberg était issu des idées de Bohr sur la structure des atomes, et des concepts introduits en 1916 par Einstein sur l’interaction entre un atome et le rayonnement électromagnétique. Einstein avait introduit, entre autres, des coefficients, notés  $A$ , qui mesuraient la probabilité (par unité de temps) avec laquelle un atome, se trouvant initialement dans une certain “état” (quantifié), pouvait effectuer une “transition quantique” vers un autre “état” quantifié, d’énergie plus basse, en émettant, à un instant aléatoire et dans une direction aléatoire, un quantum de lumière<sup>10</sup>. Heisenberg avait été initié à la physique de ces *transitions quantiques* par son professeur de thèse à Munich, Arnold Sommerfeld, et par Max Born, à Göttingen. Après avoir complété sa thèse à l’âge de vingt-deux ans, il devint l’assistant de Born à Göttingen en octobre 1923. En 1923/1924 Heisenberg travailla sous la direction de Born, et apprit de lui plusieurs idées et techniques cruciales, notamment l’idée d’introduire des nouveaux coefficients, notés  $a$ , associés, comme les coefficients  $A$  d’Einstein, à la transition quantique entre deux états de l’atome. Grosso modo, les nouveaux coefficients  $a$ , appelés “amplitudes de transition quantique”<sup>11</sup>, étaient tels que leurs carrés étaient égaux aux coefficients d’Einstein  $A$ .

L’idée essentielle, à la base de la nouvelle théorie quantique, était venue à Heisenberg au début du mois de juin 1925 alors qu’il se guérissait d’une crise de rhume des foies en séjournant sur l’île d’Heligoland, au nord de l’Allemagne. Cette idée consistait à remplacer la notion habituelle d’orbite continue décrivant les mouvements possibles d’un électron<sup>12</sup> dans un atome, par la collection des amplitudes  $a$ , associées aux transitions entre les états quantifiés possibles de l’atome. Chaque amplitude de transition est définie en précisant deux numéros : le numéro repérant l’état d’énergie initial dans la liste discontinue des états quantiques possibles de l’atome, et le numéro repérant l’état final. La collection totale des amplitudes est donc analogue à un *échiquier*, un *tableau*<sup>13</sup>, ou une *table de multiplication*, dont chaque case est repérée en précisant deux numéros : un numéro repérant la projection de la case considérée selon la “largeur”, et l’autre repérant la projection selon la “hauteur”.

<sup>10</sup>On rappelle que les énergies possibles, en théorie quantique, pour les “états” d’un atome ne prennent que des valeurs discontinues  $E_0, E_1, E_2, \dots$ . Le coefficient d’Einstein associé à la transition quantique entre l’état d’énergie  $E_m$  et l’état d’énergie (plus basse)  $E_n$  est noté  $A_{nm}$ . Ici  $m$  et  $n$  sont des indices qui prennent les valeurs  $0, 1, 2, \dots$ . Si  $f_{nm}$  désigne la fréquence de la lumière émise lors de la transition entre “l’état  $m$ ” et “l’état  $n$ ” (comme on dira pour être bref), l’énergie du quantum de lumière émis est  $E = hf_{nm} = E_m - E_n$ , et sa quantité de mouvement vaut  $p = hf_{nm}/c$ .

<sup>11</sup>L’amplitude  $a_{nm}$  associée à la transition entre l’état  $m$  et l’état  $n$  est un nombre complexe ( $a_{nm} = x_{nm} + iy_{nm}$  où  $i = \sqrt{-1}$ ), dont le module carré ( $|a_{nm}|^2 = |x_{nm}|^2 + |y_{nm}|^2$ ) est proportionnel au coefficient  $A_{nm}$  d’Einstein associé à la même transition.

<sup>12</sup>Comme Heisenberg dans son premier article, on considère ici pour simplifier un atome n’ayant qu’un seul électron.

<sup>13</sup>Born réalisa rapidement que le “tableau”  $a_{nm}$  des amplitudes (complexes) considéré par Heisenberg pouvait être identifié à ce que les mathématiciens appelaient une “matrice”, car les règles de calcul introduites, pour des raisons physiques, par Heisenberg se trouvèrent être les mêmes que les règles du calcul matriciel. Notons cependant que les tableaux  $a_{nm}$  d’amplitudes de transition sont, en général, infinis.

Pendant qu'Heisenberg expliquait les motivations qui l'avaient conduit à remplacer la description de l'orbite continue d'un électron dans un atome par de tels échiquiers d'amplitudes de transition, il regardait avec inquiétude du côté où était assis Einstein, pour voir comment il réagissait à l'introduction de telles "tables de multiplication de sorcière"<sup>14</sup>. À défaut de le convaincre, Heisenberg réussit à éveiller l'intérêt d'Einstein, particulièrement quand, à la fin de son exposé, il indiqua que les nouvelles "règles de multiplication" de deux tableaux d'amplitudes, introduites par lui et développées dans un travail récent fait en collaboration avec Max Born et Pascual Jordan, permettaient de démontrer, par un calcul détaillé, le résultat d'Einstein disant que les fluctuations de l'énergie du rayonnement contenu dans un sous-volume était la somme de deux termes séparés : un terme lié au caractère ondulatoire du rayonnement et un terme lié à son caractère corpusculaire<sup>15</sup>. Ce résultat, conclut Heisenberg, démontrait que le nouveau formalisme quantique était capable de décrire *à la fois* les aspects ondulatoires et corpusculaires d'un champ continu (comme le champ électromagnétique).

Après le colloque, Einstein vint féliciter Heisenberg pour ses résultats remarquables, et le pria de l'accompagner chez lui pour discuter plus en détail les idées nouvelles à la base du formalisme qu'il avait présenté. Une fois arrivé dans l'appartement d'Einstein, celui-ci lui demanda de préciser encore la motivation physique conduisant à remplacer la notion d'orbite continue par celle de tableau infini d'amplitudes de transition.

Écoutons une partie centrale de leur dialogue, tel qu'il fut reconstruit plus tard par Heisenberg lui-même<sup>16</sup> :

HEISENBERG – ... Puisqu'il est raisonnable de n'inclure dans une théorie que les grandeurs qui peuvent être observées, il m'a semblé naturel de n'introduire que ces fréquences et amplitudes<sup>17</sup>, pour ainsi dire en tant que représentants des orbites électroniques.

EINSTEIN – Mais vous ne croyez tout de même pas sérieusement que l'on ne peut inclure dans une théorie physique que des grandeurs observables.

HEISENBERG – Je pensais que c'est vous, précisément, qui avez fait de cette idée la base de votre théorie de la relativité. Vous avez souligné que l'on ne pouvait pas parler d'un temps absolu, car on ne peut pas observer ce temps absolu. Vous avez dit que seules les indications des horloges, que ce fût dans un système de référence en mouvement ou au repos, étaient déterminantes pour la mesure du temps.

EINSTEIN – Peut-être en effet ai-je utilisé cette sorte de philosophie, mais il n'en reste pas moins qu'elle est absurde. Ou peut-être dirai-je plus prudemment que, d'un point de vue heuristique, il peut être utile de se souvenir de ce que l'on observe vraiment. Mais, sur le plan des principes, il est tout à fait erroné de vouloir baser une théorie uniquement sur des grandeurs observables. Car, en réalité, les choses se passent exactement de façon opposée. *C'est seulement la théorie qui décide de ce qui peut être observé.*

Nous avons souligné la dernière phrase car elle résonna longtemps dans l'esprit du jeune Heisenberg, et joua un rôle crucial (et généralement méconnu) dans le développement ultérieur de la théorie quantique. Disons seulement ici que cette "leçon" (c'est la théorie qui décide de ce qui est observable), avait été inculquée à Einstein par les années de construction confuse de la relativité générale. Pendant des années le lien (si clair en relativité *restreinte*) entre les coordonnées d'espace et de temps et les mesures de distance et de durée était resté obscur en relativité *générale*. Einstein n'était sorti de la confusion que fin 1915 quand il comprit, après avoir construit la théorie, que c'était le formalisme mathématique même de la relativité générale qui permettait de définir *a posteriori* ce qui était observable quand l'espace-temps était déformé par la matière.

<sup>14</sup>Pour reprendre une expression utilisée par Einstein le 25 décembre 1925 dans une lettre à Besso.

<sup>15</sup>Voir Chapitre 5.

<sup>16</sup>Voir Chapitre V du livre de souvenirs d'Heisenberg cité ci-dessus.

<sup>17</sup>Il s'agit du tableau des  $f_{nm} = (E_m - E_n)/h$  et de celui des  $a_{nm}$  mentionnés dans les notes ci-dessus.

## 8 “Ondes par-ci, quanta par-là !”

Au début de l’année 1926, à peu près à l’époque où Heisenberg avait fait son exposé au colloque de Berlin, un autre formalisme mathématique avait été proposé, par le physicien théoricien autrichien Erwin Schrödinger, pour supplanter la “vieille” théorie des quanta de Planck-Einstein-Bohr. Ce formalisme, appelé “mécanique ondulatoire”, avait, selon Schrödinger lui-même, pris racine dans les idées de Louis de Broglie, et dans les “brèves mais infiniment clairvoyantes” remarques faites par Einstein (dans des lettres, et dans l’article de fin 1924 discuté dans le chapitre précédent). Cette *mécanique ondulatoire*, de Schrödinger, paraissait complètement différente de la *mécanique matricielle* de Born-Heisenberg-Jordan. Dans l’une l’état du système physique considéré (disons les électrons orbitant autour du noyau d’un atome) était décrit par une *amplitude ondulatoire*  $\mathcal{A}$  qui était une fonction<sup>18</sup> *continue* du temps et des coordonnées des électrons, alors que l’autre ne considérait que les *transitions discontinues* entre les divers états stationnaires possibles de l’atomes, et les décrivait par un *échiquier infini d’amplitudes de transition*  $a_{nm}$ . Ces deux descriptions semblaient être aux antipodes l’une de l’autre. La première donnait une image parfaitement continue (dans le temps, et dans l’espace des configurations du système), alors que la seconde ne s’intéressait qu’aux transitions *discontinues* subies par le système. Cependant, assez rapidement Schrödinger montra qu’il y avait une *équivalence mathématique* entre les deux formalismes, ou, plus précisément, il montra que la connaissance de l’“équation d’ondes” décrivant la propagation de l’amplitude continue  $\mathcal{A}$  permettait de calculer à la fois les états stationnaires possibles pour le système, leurs énergies quantifiées, et l’échiquier infini d’amplitudes de transition entre ces états stationnaires. En gros, les états stationnaires possibles étaient analogues à la série des états de vibration pure d’un objet élastique, comme ceux d’une corde à piano qui peut vibrer dans son mode fondamental, ou dans le mode correspondant au premier harmonique (une octave au-dessus du mode fondamental) ou bien dans le deuxième harmonique (une quinte au-dessus du premier harmonique), etc.

En fait, il sembla pendant quelque temps que la description *ondulatoire* de Schrödinger était plus complète que la description *discontinue* de Born-Heisenberg-Jordan. Surtout, la description de Schrödinger semblait suggérer que l’on pourrait peut-être même “mettre au rancart” l’idée de discontinuité quantique (malgré tout ce qu’elle avait permis de comprendre, y compris la théorie d’Einstein des transitions atomiques), et décrire la réalité uniquement en termes d’un phénomène ondulatoire continu.

Einstein avait initialement accueilli avec satisfaction, et un certain soulagement, le formalisme de Schrödinger, qui lui semblait plus proche de son intuition profonde de la réalité que les “tables de multiplication de sorcière” utilisées par Heisenberg et consorts. Mais il déchantait assez rapidement. D’abord parce que l’amplitude ondulatoire  $\mathcal{A}$  ne se propageait pas dans l’espace tridimensionnel habituel mais dans un espace à 6 dimensions pour un système de deux particules, 9 dimensions pour un système de trois particules, 12 dimensions pour quatre, etc. Et ensuite parce que la mécanique ondulatoire avait de grandes difficultés à rendre compte de tous les faits expérimentaux qui avaient conduit Einstein et d’autres, pendant une vingtaine d’années, à introduire les discontinuités quantiques. Dès le mois d’août 1926, Einstein résumait ainsi son sentiment dans une lettre à Paul Ehrenfest :

“Ondes par-ci, quanta par-là ! La réalité des unes et des autres a la solidité du roc. Mais le diable les fait rimer ensemble (et la rime est bel et bien réelle).”

Cette insatisfaction d’Einstein, face au paradoxe que la nature exhibe à la fois des aspects ondulatoires et des aspects corpusculaires, devait durer jusqu’à la fin de sa vie. Comme nous allons le voir, ce qui convainquit la plupart des autres scientifiques n’emporta pas l’adhésion d’Einstein.

---

<sup>18</sup>Précisons que  $\mathcal{A}$  est une fonction complexe ( $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 + i\mathcal{A}_2$ ) et qu’elle est généralement désignée par la lettre grecque *psi*.

## 9 “Champ fantôme” d’Einstein, “amplitude de probabilité” de Born et “relations d’incertitude” de Heisenberg

Nous ne chercherons pas à discuter de façon tant soit peu exhaustive le développement de l’interprétation physique du formalisme mathématique de la théorie quantique. Montrons seulement le rôle essentiel, s’il fut parfois souterrain, qu’ont joué certaines des idées d’Einstein.

La première avancée cruciale date de l’été 1926 et est due à Max Born. Comme celui-ci l’écrivit explicitement<sup>19</sup> : “Je pars d’une remarque d’Einstein sur la relation entre champ d’onde et quanta de lumière; il [Einstein] dit à peu près que les ondes servaient seulement à piloter les corpuscules lumineux, et il parla en ce sens d’un “champ fantôme” déterminant la probabilité qu’un quantum lumineux . . . prenne tel ou tel chemin . . .”. Ces remarques d’Einstein sur un “champ fantôme”, ou un “champ pilote”, furent communiquées verbalement par lui à plusieurs scientifiques (Max Born, Eugène Wigner, . . .) dans les années 1920, mais il ne les publia jamais. Quoiqu’il en soit, il semble qu’elles motivèrent Max Born à proposer d’interpréter l’amplitude ondulatoire  $\mathcal{A}(t, \mathbf{q})$  d’un certain système physique comme une “amplitude de probabilité” pour *trouver*, à l’instant  $t$ , le système dans la configuration décrite par les variables  $\mathbf{q}$ . [Comme on le disait ci-dessus, quand on considère une seule particule,  $\mathbf{q}$  désigne ses trois coordonnées dans l’espace; mais, quand on considère un système de *deux* particules,  $\mathbf{q}$  désigne les *six* coordonnées nécessaires pour préciser la position spatiale de deux particules; etc.] Born précisa (dans une note en bas de page ajoutée durant la relecture des épreuves) que la *probabilité* de trouver le système dans une configuration  $\mathbf{q}$  était proportionnelle au *carré*<sup>20</sup> de l’amplitude  $\mathcal{A}(\mathbf{q})$ . Max Born résuma alors l’essence de l’interprétation de la théorie quantique qu’il proposait :

“Le mouvement des particules suit des lois de probabilité, mais la probabilité elle-même se propage selon une loi de causalité.”

La deuxième partie de la phrase de Born fait allusion au fait que l’“équation d’onde de Schrödinger”, écrite par ce dernier au début 1926, est une équation de propagation *déterministe* qui détermine de façon unique l’évolution temporelle de l’amplitude  $\mathcal{A}$ , une fois que l’on connaît sa valeur pour n’importe quel instant initial.

L’“interprétation probabiliste” de Born était une avancée conceptuelle importante, mais elle posait plus de problèmes qu’elle n’en résolvait. En fait, elle était une simple hypothèse et il aurait fallu la *déduire* du formalisme mathématique de la théorie quantique. C’était ce que pensa Heisenberg pendant la fin de l’année 1926, et le début de l’année 1927. Werner Heisenberg travaillait alors dans le groupe de Niels Bohr à Copenhague. Il discuta intensément avec Bohr, dans des discussions qui se prolongeaient souvent bien au-delà de minuit, de l’interprétation physique à donner au formalisme mathématique de la théorie quantique. En février 1927, Heisenberg resté seul à Copenhague pendant que Bohr faisait du ski en Norvège, eut une idée nouvelle destinée à clarifier la compatibilité entre une description *ondulatoire* et une description *corpusculaire* pour une même particule quantique (disons un électron). Comme il le raconta lui-même<sup>21</sup>, le souvenir de la conversation qu’il avait eue avec Einstein un an auparavant joua un rôle crucial dans son processus de pensée :

“Ce soir-là, ce fut peut-être aux environs de minuit que je me rappelai brusquement ma discussion avec Einstein, et que je me souvins de sa phrase : “Seule la théorie décide de ce que l’on peut observer.” Je réalisai immédiatement que c’est dans cette remarque qu’il fallait chercher la clef de l’énigme qui nous [Bohr et lui] avait tant préoccupés. J’entrepris alors une promenade nocturne à travers le Fælledpark pour réfléchir à la portée de la phrase d’Einstein.”

<sup>19</sup>Pour les références historiques au “champ fantôme” (*Gespenssterfeld*) d’Einstein et à son influence sur l’interprétation probabiliste de l’amplitude ondulatoire  $\mathcal{A}$  (alias, la “fonction d’onde *psi*”) voir les biographies par Abraham Pais d’Einstein (Bibliographie) et de Bohr (*Niels Bohr’s Times*, Clarendon Press, Oxford, 1991).

<sup>20</sup> $\mathcal{A}$  étant un nombre complexe, disons  $\mathcal{A} = a + ib$ , le “carré” dont il s’agit ici est le carré du module de  $\mathcal{A}$  :  $|\mathcal{A}|^2 = a^2 + b^2$ .

<sup>21</sup>Voir le Chapitre VI de son livre : *La partie et le tout, op.cit.*

C'est au cours de cette promenade nocturne où il réfléchit à la portée de la phrase d'Einstein que Heisenberg découvrit ses très fameuses "relations d'incertitude"<sup>22</sup>, disant que le produit de l'"incertitude" sur la position d'une particule et de l'"incertitude" sur sa quantité de mouvement (ou impulsion<sup>23</sup>) devait nécessairement être plus grand que la "constante de Planck"  $h$ <sup>24</sup>.

Heisenberg comprit que ces relations d'incertitude permettaient de clarifier les conditions dans lesquelles on peut utiliser *simultanément* l'idée qu'une particule quantique est décrite par une onde *et* par un corpuscule. Par exemple, il semblait que l'observation de traces rectilignes, visibles au niveau macroscopique, laissées par des particules dans certains détecteurs impliquait qu'une particule dût nécessairement être décrite comme un corpuscule localisé. Les relations d'incertitude montraient que la largeur finie des traces était compatible avec un comportement ondulatoire sur des échelles de distance petites par rapport à cette largeur.

Quand Bohr revint de ses vacances en Norvège, Heisenberg lui expliqua avec enthousiasme ce qu'il avait trouvé en suivant la philosophie d'Einstein ("La théorie seule décide de ce qui est observable"). Dans l'intervalle, Bohr avait continué ses propres réflexions et s'était convaincu qu'il fallait baser l'interprétation de la mécanique quantique non pas sur une déduction logique dictée par la théorie elle-même (comme Einstein l'avait suggéré) mais sur une nouvelle conception épistémologique, introduite de façon *ad hoc* pour interpréter la théorie quantique, appelée "complémentarité". Comme le dit Heisenberg, dans l'esprit de Bohr "la complémentarité devait décrire une situation où nous pouvions saisir un seul et même phénomène par deux modes d'interprétation différents [par exemple, onde ou corpuscule]. Ces deux modes devaient à la fois s'exclure mutuellement et se compléter; et c'est seulement la juxtaposition de ces modes contradictoires qui devait permettre d'épuiser pleinement le contenu visuel du phénomène."

La discussion entre le jeune Heisenberg (qui avait alors vingt-six ans) et Bohr (dont le travail en 1913 avait joué un rôle crucial dans le développement de la théorie quantique) fut houleuse. Heisenberg admirait Bohr comme scientifique, et le vénérât aussi comme un père. Il s'attendait à ce que Bohr apprécia la nouveauté de l'avance conceptuelle représentée par la découverte des relations d'incertitude. Au lieu de cela, Bohr manifesta des réserves, et des critiques techniques de détail, et surtout, il considéra que seule son idée de *complémentarité* était assez générale pour servir de base à une interprétation cohérente de la théorie quantique. La tension entre les deux hommes fut vive, et laissa des traces dans leur relation. Heisenberg renonça, devant l'obstination de Bohr, à le convaincre du bien fondé de l'attitude épistémologique générale suggérée par Einstein, et accepta du bout des lèvres de cautionner la nécessité de l'emploi d'un langage interprétatif *ad hoc* basé sur la *complémentarité*. Heisenberg publia seul sa découverte des relations d'incertitude, et leurs conséquences pour l'interprétation de la réalité quantique, et il le laissa préparer un texte détaillé sur l'idée de complémentarité que Bohr présenta quelques mois plus tard lors du conseil Solvay de l'automne 1927.

## 10 La ligne de partage des eaux

Le cinquième congrès Solvay, tenu à Bruxelles à l'automne 1927, fut un événement très important. Il marqua une *ligne de partage des eaux* à la fois pour la communauté internationale des physiciens théoriciens<sup>25</sup>, et pour la carrière scientifique d'Einstein. C'est à ce congrès qu'Einstein fut confronté à l'"interprétation" de la nouvelle théorie quantique proposée par Bohr, à partir des idées de Born (interprétation probabiliste de l'amplitude  $\mathcal{A}$ ), de Heisenberg (relations d'incertitude), et du concept de complémentarité. Tous les physiciens théoriciens attendaient avec un intérêt passionné de voir la réaction d'Einstein. Pour tous, Einstein était non seulement le plus grand physicien vivant, mais celui dont les idées révolutionnaires avaient été cruciales pour la découverte et la

<sup>22</sup>Appelées aussi *relations d'indétermination*, ou *relations de dispersion*.

<sup>23</sup>Rappelons que la *quantité de mouvement*, ou *impulsion*, d'une particule est donnée par  $p = mv/\sqrt{1-v^2/c^2}$ , où  $m$  est sa masse (au repos) et  $v$  sa vitesse.

<sup>24</sup>Selon la définition exacte des "incertitudes" le minimum de leur produit peut différer de  $h$  par un facteur numérique.

<sup>25</sup>En ce sens que certains physiciens suivirent Einstein dans ses doutes sur le caractère définitif et/ou complet de la théorie quantique, pendant que la majorité ralliait l'"interprétation de Copenhague".

compréhension de la réalité quantique. Les physiciens de la jeune génération (Heisenberg, Jordan, Pauli, ...) vénéraient Einstein, et se considéraient tous comme ses modestes successeurs. Le pape de la physique théorique allait-il bénir, sur les fonds baptismaux de la complémentarité, le nouvel enfant quantique, que tous considéreraient comme son "petit fils" intellectuel? Eh bien non! Einstein ne fut pas convaincu par l'interprétation de la théorie quantique défendue par Bohr.

La déception fut grande pour beaucoup. Et certains (comme Paul Ehrenfest) allèrent jusqu'à comparer l'attitude d'Einstein vis à vis de la nouvelle mécanique quantique à celle des opposants à la théorie de la relativité, qui avaient été déconcertés par la nouveauté des idées d'Einstein et avaient refusé de changer "leurs vieilles habitudes". Je pense que l'image traditionnelle d'un Einstein, révolutionnaire vieilli, refusant les nouvelles idées quantiques car elles allaient à l'encontre de ses préjugés sur ce que doit être *a priori* la réalité, est *inexacte*. Cela ne veut pas dire que je pense que l'attitude de Bohr, et de la majorité des physiciens qui le suivirent en adoptant ce qu'on appelle l'"interprétation de Copenhague" de la théorie quantique, ait été une erreur. Loin de là! D'un point de vue *pratique*, le consensus qui s'est cristallisé au conseil Solvay 1927, autour de l'"interprétation de Copenhague" a favorisé le développement des nouvelles idées quantiques, et a permis leur application dans un domaine toujours plus vaste de la physique. Une grande partie de la physique et de la technologie du vingtième siècle est basée sur l'application de la théorie quantique (à la physique du solide, la physique atomique, la physique des hautes énergies, etc.<sup>26</sup>). Le schéma interprétatif proposé par Bohr au conseil Solvay 1927 a aidé à "mettre de côté" les aspects épistémologiquement obscurs de la théorie quantique, et à explorer le monde nouveau ouvert par son formalisme mathématique. Mais, cela dit, je pense qu'il est temps (surtout à l'occasion du centenaire des idées révolutionnaires proposées par Einstein en 1905) de décrire de façon non caricaturale l'attitude d'Einstein vis à vis de la théorie quantique, et de reconnaître à la fois le bien fondé de ses objections épistémologiques, et le caractère visionnaire des travaux qu'il entreprit après 1927.

Fondamentalement, je pense qu'Einstein n'a pas été convaincu par Bohr parce que l'idée de *complémentarité* était seulement un cache-misère conceptuellement obscur et techniquement mal défini. Dès mai 1928, dans une lettre à Schrödinger (qui partageait ses doutes), Einstein comparait l'"interprétation de Copenhague" à un "oreiller douillet", sur lequel on peut s'endormir sans se poser de questions sur la réalité quantique :

"La philosophie tranquillisante (ou, devrais-je dire la religion?) de Heisenberg-Bohr est si délicatement combinée que, pour le moment, elle fournit au vrai croyant un oreiller douillet qu'il a du mal à quitter."

Plus tard (en 1939), quand Bohr se figura dans une posture d'apôtre de la complémentarité, vue comme panacée à tous les problèmes d'interprétation signalés par Einstein, Schrödinger et d'autres, Einstein décrira Bohr (dans une lettre à Schrödinger) comme un "mystique interdisant tout questionnement sur quoi que ce soit qui existerait indépendamment de l'observateur ..."

De façon plus précise, je pense que l'insatisfaction d'Einstein venait du fait que l'"interprétation de Copenhague" n'était pas en accord avec l'idée qu'Einstein avait exprimée devant Heisenberg, et qui avait conduit ce dernier à la découverte des relations d'incertitude : "C'est la théorie qui décide de ce qui est observable". Bohr rajoutait au formalisme mathématique de la théorie quantique tout une superstructure interprétative basée sur l'utilisation d'un langage particulier, et le recours à une autre théorie scientifique (la physique newtonienne "classique") supposée s'appliquer aux objets macroscopiques (comme les instruments de mesure). C'est parce qu'Einstein avait une très haute exigence de clarté conceptuelle qu'il ne pouvait se satisfaire de la "philosophie tranquillisante (ou religion?) de Heisenberg-Bohr". La formulation la plus claire qu'Einstein ait donnée de son insatisfaction conceptuelle est probablement celle qu'il exprima en 1932 dans une lettre à Wolfgang Pauli. Citons la telle qu'elle est, même si le latin qu'elle utilise est fautif :

"Au demeurant je ne dis pas *probabilitatem esse delendam*, mais *probabilitatem esse deducendam*, ce qui n'est pas la même chose."

<sup>26</sup> Voir l'excellent livre : Alain Aspect et al., *Demain la physique*, Editions Odile Jacob, Paris (2004).

Autrement dit, Einstein ne dit pas qu'il faut *se débarrasser* des probabilités [qui apparaissent, selon Max Born, en théorie quantique], mais qu'il faut *déduire* l'apparition de ces probabilités [du formalisme mathématique qui définit la théorie quantique]. Rappelons en effet qu'Einstein était un expert dans l'utilisation des probabilités en physique classique (thermodynamique, mouvement brownien), et que c'est lui qui introduisit les probabilités en physique quantique (en 1916, dans son travail sur l'absorption et l'émission de lumière par des atomes). Pendant la vingtaine d'années où il avait été (presque) seul à croire aux quanta de lumière, il avait passé d'innombrables heures à essayer de rendre compatible les descriptions ondulatoire (déterministe) et corpusculaire (aléatoire) de la lumière. Il n'était pas homme à se résigner à abandonner le caractère logico-déductif de la science au profit de ce que le physicien américain Bryce DeWitt a récemment appelé une "métaphysique floue".

.....  
 .....

## 11 Les aventuriers de la réalité enchevêtrée

.....  
 .....

Nous nous concentrerons ici sur un autre travail de la partie princetonienne de la carrière d'Einstein, celui qu'il effectua en 1935, en collaboration avec Boris Podolsky et Nathan Rosen. Ce travail illustre bien la profondeur visionnaire de l'approche d'Einstein vers la physique. Nous avons évoqué ci-dessus le refus d'Einstein, en 1927, à accepter l'"oreiller douillet" de l'interprétation de Copenhague de la théorie quantique. Pendant quelques années Einstein espéra trouver une faille technique dans cette interprétation, par exemple sous la forme d'une violation subtile des relations d'incertitudes. Assez rapidement il se convainquit de l'inexistence de telles failles. Ensuite il chercha à caractériser de plus en plus finement son insatisfaction vis à vis de l'interprétation de Copenhague, et son sentiment que soit cette interprétation, soit la théorie quantique elle-même, était *incomplète*. L'article d'Einstein-Podolsky-Rosen (en abrégé EPR) marque une étape très importante dans la compréhension de la structure profonde de la théorie quantique. Cet article attira en effet l'attention sur un aspect paradoxal du formalisme de la théorie quantique : l'"enchevêtrement" (ou, comme on dit souvent, l'"intrication") de deux systèmes physiques qui ont interagi (quantiquement) dans le passé avant de se séparer.

Donnons un exemple d'une telle "situation EPR". Considérons un système de deux particules. Pour simplifier on suppose que les masses des particules sont égales entre elles. Les relations d'incertitudes de Heisenberg disent que l'on ne peut pas mesurer, avec une précision infinie, à la fois la position et la vitesse de la première particule. De même, elles interdisent une mesure précise simultanée de la position et de la vitesse de la deuxième particule. Cependant on démontre que rien n'interdit de spécifier (ou de mesurer) avec une précision infinie à la fois la position du *milieu* (centre de masse) des deux particules et leur *vitesse relative*. Du coup on peut préparer initialement le système des deux particules dans un état quantique où le milieu des deux particules est un point bien localisé, que l'on prendra comme origine des coordonnées, et où, en outre, la vitesse relative est nulle. Laissons le système évoluer librement à partir de cet état initial. Puis, à un certain moment, effectuons des observations (très loin de l'origine des coordonnées) sur une seule des deux particules, disons la première.

Les relations de Heisenberg interdisent de mesurer *simultanément* la position et la vitesse de la première particule, mais rien, en mécanique quantique, n'interdit de mesurer, avec une précision

infinie, soit l'une soit l'autre. Imaginons d'abord que nous mesurons la position de la première particule et que nous la trouvons égale à une certaine valeur  $x_1$ . Comme on sait que le milieu des deux particules est fixé à l'origine des coordonnées, on déduit de cette mesure que la position de la deuxième particule est bien déterminée, et vaut  $x_2 = -x_1$ . Mais, imaginons alors que nous ayons décidé de mesurer non pas la position de la première particule, mais sa vitesse, et que nous ayons trouvé une certaine valeur  $v_1$  pour cette vitesse. Comme on sait que la vitesse relative ( $v_1 - v_2$ ) entre les deux particules est nulle, on déduit de cette mesure que la vitesse de la deuxième particule est bien déterminée, et vaut  $v_2 = v_1$ .

Donc, selon le choix arbitraire que l'on fait sur la façon d'observer la première particule, on peut déterminer, avec certitude, la position ou la vitesse de la deuxième particule *sans l'observer directement* et donc sans la perturber d'aucune façon. Einstein, Podolsky et Rosen considéraient que toute prédiction certaine que l'on peut faire sur un système, sans le perturber en aucune façon, devait correspondre à quelque chose de "réel". Ils déduisaient donc de l'expérience de pensée que l'on vient de décrire que *à la fois* la position et la vitesse de la deuxième particule étaient des quantités "réelles", car on pouvait les déterminer toutes deux avec précision de façon indirecte, sans perturber la deuxième particule. Cette conclusion semblait être en conflit avec les relations d'incertitude concernant la position et la vitesse de la deuxième particule, à moins qu'il n'y ait quelque chose de "magique" en théorie quantique, c'est-à-dire qu'il existe un "lien" intime entre des systèmes séparés par de très grandes distances faisant que toute observation sur un système se répercute instantanément sur l'autre système et puisse ainsi changer "son état réel". Einstein, Podolsky et Rosen pensaient que l'existence de *liens* à distance entre systèmes spatialement séparés n'était pas physiquement acceptable, et déduisaient de leur raisonnement qu'il y avait quelque chose d'*incomplet* dans la description quantique d'un système par une amplitude de probabilité  $\mathcal{A}(x_1, x_2)$  [qui était la base de leur raisonnement].

L'article EPR n'eut pas, quand il parut, de grande résonance dans la communauté des physiciens. La plupart reposaient leur esprit sur l'"oreiller douillet" de Copenhague et ne prirent pas la peine de réfléchir aux perspectives nouvelles qu'ouvraient l'article EPR. Seuls Niels Bohr et Erwin Schrödinger s'intéressèrent vivement à cet article. Niels Bohr répondit au "paradoxe EPR" en publiant un article consistant essentiellement à réaffirmer le "dogme" de la complémentarité<sup>27</sup>. Il justifiait ainsi ce qu'Einstein écrivait sur lui, juste après la publication de l'article EPR et avant la réponse de Bohr, dans une lettre à Schrödinger :

"Quant au philosophe talmudiste, il se fiche pas mal de la "réalité", cet épouvantail tout juste bon à effrayer les âmes naïves. Il explique que les deux conceptions ne diffèrent que par leur mode d'expression."

Ici l'expression "philosophe talmudiste" vise Bohr et le compare à un commentateur de la révélation divine (sous-entendu, la complémentarité).

Schrödinger comprit, quant à lui, qu'Einstein avait mis le doigt sur une structure importante du formalisme quantique. Dans les mois qui suivirent la publication de l'article EPR, Einstein et Schrödinger discutèrent par lettres. Dans cet échange, Einstein suggéra de considérer un système instable, comme un *baril de poudre* qui a une chance sur deux de s'enflammer au bout d'un certain intervalle de temps. Einstein dit qu'après cet intervalle de temps la représentation, en théorie quantique, du baril de poudre par une amplitude de probabilité "décrit alors plutôt une sorte de mélange contenant le système qui n'a pas encore explosé et le système qui a déjà explosé." Cette suggestion d'Einstein (considérer un système macroscopique dont l'état dépend cruciallement d'un phénomène aléatoire) fut bientôt reprise et améliorée par Schrödinger dans son célèbre exemple du *chat de Schrödinger*. Il s'agit d'un chat vivant installé dans une boîte avec un mécanisme diabolique qui tuera ou ne tuera pas le chat au bout d'une heure selon qu'un seul atome radioactif s'est désintégré ou pas. Au bout d'une heure, la théorie quantique décrit le chat par une "amplitude

<sup>27</sup> Précisons qu'il n'y a rien de "faux" dans la réponse de Bohr, et qu'il ne serait pas non plus "faux" de dire que les expériences récentes sur les situations EPR sont "donné raison" à Bohr. L'auteur pense cependant que l'attitude d'Einstein d'un questionnement conceptuel se traduisant en expériences de pensées (qui furent ensuite réalisées) était de la meilleure physique que celle d'une rejection a priori de tout besoin de vérification expérimentale à cause d'une croyance quasi-religieuse dans le concept, métaphysiquement flou, de complémentarité.

de probabilité”  $\mathcal{A}$  qui correspond à une *superposition*, à poids égal, entre l’amplitude pour un chat vivant, et l’amplitude pour un chat mort. Comment réconcilier cette description quantique avec le fait que nous n’observons jamais de telles superpositions de chats à demi-vivant et à demi-mort, mais seulement, et ce de façon exclusive, soit un chat vivant soit un chat mort ?

Mais la postérité de l’argument EPR ne s’est pas arrêtée là. Presque trente ans après la publication de l’article d’Einstein, Podolsky et Rosen, en 1964, le physicien théoricien irlandais John S. Bell prit au sérieux le dilemme EPR entre une structure de la réalité dite “séparable” où des systèmes séparés spatialement ne s’influencent pas à distance, et une structure “non séparable” où des systèmes séparés spatialement restent *liés* entre eux, ou, comme on dit aussi, *enchevêtrés* ou *intriqués*, s’ils ont eu l’occasion d’interagir dans le passé. Surtout, Bell comprit que ces deux possibilités pouvaient être départagées par certains types de mesures sur des systèmes quantiques ayant interagi dans le passé. Plus précisément, il démontra que l’enchevêtrement quantique, à la EPR, des “quantités de rotation interne”, aussi appelés *spins* ou *polarisations*, de deux particules issues d’un système initial à spin nul, devait conduire à des *corrélations* entre les mesures des polarisations des deux particules qui étaient strictement plus grandes dans le cas d’une réalité quantique non séparable, que dans le cas d’une réalité “classique” séparable.

Cette découverte théorique de Bell déclencha un grand intérêt pour les situations enchevêtrées à la Einstein-Podolsky-Rosen et stimula plusieurs équipes d’expérimentateurs à tester les *inégalités* que Bell avait déduites pour les corrélations entre polarisations de particules séparées, issues d’un système initialement corrélé. Les résultats expérimentaux les plus convaincants ont été réalisés en 1982, à Orsay, par l’équipe d’Alain Aspect. Ces résultats étaient en plein accord avec les prédictions de la théorie quantique, c’est-à-dire avec une structure non séparable de la réalité où deux systèmes ayant interagi dans le passé restent *enchevêtrés* dans le futur, même s’ils sont spatialement séparés. Les expériences d’Orsay vérifièrent la réalité de cet enchevêtrement EPR (ou intrication EPR) pour la polarisation de photons séparés d’une douzaine de mètres. Des expériences plus récentes, effectuées près de Genève en Suisse par le groupe de Nicolas Gisin, ont vérifié la réalité de l’enchevêtrement EPR pour la polarisation de deux photons séparés de plus de dix kilomètres !

Les expériences sur les situations du type Einstein-Podolsky-Rosen-Bell ont donc montré que deux systèmes ayant interagi dans le passé continuent à se comporter comme un tout inséparable en dépit de l’éloignement spatial entre eux. Ceci montre que le “réel quantique” est très différent du “réel classique”. Au delà de ce progrès dans notre compréhension de la théorie quantique, les états enchevêtrés EPR sont actuellement l’objet de nombreuses études car on pense qu’ils pourraient avoir des applications très importantes dans les domaines de la cryptographie quantique et de l’informatique quantique<sup>28</sup>.

## 12 La souris et l’univers

*Université de Princeton, États-Unis, 14 avril 1954*

Quand le vieil homme entra, le silence se fit soudainement parmi la soixantaine d’étudiants rassemblés dans la salle 307 du Palmer Physical Laboratory, en ce 14 avril 1954. Les étudiants étaient émus et excités. Tous savaient que c’était un événement exceptionnel. Sans doute la seule fois de leur vie qu’ils verraient en chair et en os, et entendraient parler, le plus grand physicien de tous les temps, la légende vivante de la science du vingtième siècle : Albert Einstein. Ils allaient assister à la dernière conférence du grand homme.

Quelques uns d’entre eux avaient eu le privilège, l’année précédente, d’avoir été invités à prendre le thé dans la maison d’Einstein, au 112 Mercer Street, et de pouvoir interroger directement le maître sur toutes les questions qu’ils se posaient : depuis la nature de l’électricité et le fondement de la théorie du champ unifié, jusqu’à l’expansion de l’univers et la position d’Einstein sur la théorie quantique. Einstein s’était prêté au jeu avec grâce et bonne humeur et avait répondu en détail à toutes les questions. Il ne s’était même pas offusqué quand un étudiant plus hardi que les autres

<sup>28</sup> Voir le Chapitre 5 de Alain Aspect et al., *Demain la physique*, Editions Odile Jacob, Paris, 2004.

osa lui demander : “Professeur Einstein, que deviendra cette maison après votre disparition ?” Un large sourire éclaira alors le visage du vieil homme qui répondit, sans se déconcerter, dans un bel anglais teinté d’accent germanique : “Cette maison ne deviendra jamais un lieu de pèlerinage où les pèlerins viennent voir les os d’un saint.”

Le physicien théoricien américain John Archibald Wheeler avait commencé à enseigner la Relativité (restreinte et générale) au département de physique de l’Université de Princeton à partir de l’automne 1952. C’est lui qui avait eu l’idée de faire inviter les étudiants de son cours de Relativité à prendre le thé chez Einstein, en mai 1953, pour les motiver à étudier en profondeur cette théorie. C’est lui encore qui avait convaincu Einstein, en ce printemps 1954, de venir donner un séminaire devant un groupe restreint d’étudiants du département de physique. Bien sûr, le bouche à oreille avait fonctionné, et pas mal d’étudiants de disciplines voisines, notamment les mathématiques, étaient venus pour l’entendre. Quelques professeurs s’étaient aussi glissés au milieu du groupe d’étudiants qui remplissait la petite salle de séminaire.

Le thème central de cet exposé – qui fut effectivement le dernier séminaire d’Einstein, donné un an, presque jour pour jour, avant sa mort – concernait la théorie quantique<sup>29</sup>. Einstein expliqua pourquoi il pensait que cette théorie n’était pas le dernier mot sur la question. Il évoqua le phénomène de transition d’un atome à un état d’énergie plus élevée sous l’influence d’un rayonnement électromagnétique. En diminuant de plus en plus l’intensité du rayonnement, ce phénomène de transition devient de plus en plus rare. Cela a conduit à introduire une description probabiliste du phénomène de transition. Ainsi s’introduisit la probabilité en théorie quantique<sup>30</sup>. “Je suis un hérétique. Si le rayonnement cause des sauts [entre états atomiques], il doit avoir un caractère granulaire, comme la matière.”, s’exclama Einstein. Puis, il en vint à son point crucial : quel est réellement le sens de l’amplitude de probabilité  $\mathcal{A}$  ? Donne-t-elle une description complète de la situation physique ? “Je savais en construisant la théorie de la relativité restreinte qu’elle n’était pas complète. Il en est ainsi pour tout ce que nous faisons de nos jours : d’un côté nous croyons, de l’autre nous doutons.” Puis Einstein donna l’exemple de la description quantique d’un objet macroscopique (une petite bille d’un millimètre de diamètre qui se déplace dans une boîte). La description du mouvement, pour une énergie fixée, de la bille au moyen de l’amplitude de probabilité semble paradoxale pour un objet que l’on peut voir à l’œil nu. L’amplitude de probabilité donne une description floue de la position de la bille, alors que l’expérience journalière montre que l’on voit toujours la bille en un endroit bien précis.

“Il est difficile de croire que cette description est complète. Elle semble rendre le monde nébuleux à moins que quelqu’un, comme une souris, le regarde. Est-il croyable que le regard d’une souris puisse changer considérablement l’univers ?”

Cette phrase imagée d’Einstein frappa les esprits de beaucoup des assistants. Ensuite, Einstein mentionna qu’il pensait que la simplicité logique pouvait être, parfois, un bon guide, car c’est ainsi qu’il avait construit la théorie de la relativité générale. Il expliqua comment il avait trouvé cette théorie, et pourquoi il pensait qu’elle était incomplète : la description de la matière au moyen de la distribution d’énergie et de tensions lui semblait être quelque chose de provisoire, “un nez de bois sur un bonhomme de neige”. Il regretta que la plupart des physiciens prennent comme base la théorie quantique et la théorie de la relativité restreinte, en négligeant la gravitation comme étant sans importance. Il pensait au contraire que la gravitation, c’est-à-dire la structure de l’espace-temps, doit être prise en considération dès le début. Il finit en indiquant que : “Il y a beaucoup de raisons pour être attiré vers une théorie qui ne contient ni espace, ni temps. Mais personne ne sait comment construire une telle théorie.”

Parmi les auditeurs d’Einstein, en ce 14 avril 1954, se trouvait un jeune homme émacié,

<sup>29</sup>Le contenu de ce séminaire nous est connu par les notes prises par John A. Wheeler pendant l’exposé, et par les souvenirs rapportés par certains des assistants. Voir pp. 201-211 du livre édité par Peter C. Aichelburg et Roman U. Sexl, *Albert Einstein, His Influence on Physics, Philosophy and Politics*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1979.

<sup>30</sup>Rappelons que c’est Einstein lui-même qui introduisit la probabilité en théorie quantique dans l’article de 1916 où il décrivait, précisément, les processus de transitions entre niveaux atomiques sous l’influence d’un rayonnement électromagnétique.

nerveux, au profil d'aigle et au regard intense : Hugh Everett III<sup>31</sup>. Il n'avait que vingt-trois ans, et était venu avec son ami Charles Misner qui suivait le cours de Relativité de Wheeler. Hugh Everett n'aurait raté pour rien au monde cette occasion d'entendre son idole. A l'âge de douze ans, il avait écrit à Einstein pour lui demander si l'univers était basé sur une structure aléatoire ou unifiante. Et il avait eu la bonne surprise de recevoir une gentille réponse d'Einstein lui-même. Après avoir étudié l'ingénierie chimique pendant ses deux premières années d'université à Washington, il était arrivé depuis six mois (septembre 1953) à l'université de Princeton où il était rattaché au département de mathématiques. Mais, en fait, il s'intéressait surtout à la physique théorique. Depuis la rentrée de septembre 1953 il suivait en particulier le cours d'introduction à la mécanique quantique donné par Robert Dicke.

Hugh Everett fut frappé par les remarques d'Einstein sur le caractère apparemment incomplet de la théorie quantique qui n'offre qu'une description "nébuleuse" de l'univers, et qui semble nécessiter la présence d'êtres vivants, ne serait-ce qu'une souris, pour déclencher ce que les partisans du dogme de Copenhague appellent la "réduction du paquet d'ondes", c'est-à-dire le passage d'un monde flou, au monde précis que l'on voit autour de nous. Il commença à réfléchir sérieusement au sens physique du formalisme de la théorie quantique.

Quelques mois plus tard, lors d'une soirée copieusement arrosée au sherry, une discussion animée s'engagea au Graduate College entre Hugh Everett, Charlie Misner et Aage Peterson, qui était un assistant de Niels Bohr, et qui s'intéressait passionnément aux problèmes posés par l'interprétation de la théorie quantique. Dans le feu de la conversation, Hugh esquissa un nouveau schéma conceptuel pour interpréter la théorie quantique de façon à éviter à la fois les paradoxes soulevés par Einstein (et Schrödinger), et la nécessité d'admettre un mystérieux processus aléatoire de réduction du paquet d'ondes. Cette idée géniale, obtenue alors qu'il avait environ vingt-quatre ans, fut le germe de la thèse de doctorat d'Hugh Everett, dans laquelle il développait une interprétation révolutionnaire de la théorie quantique.

Everett alla voir John Wheeler (qui avait été le disciple et le collaborateur de Niels Bohr, et qui s'intéressait beaucoup au sens de la théorie quantique) et lui demanda de superviser sa thèse de doctorat. Wheeler accepta. Cela créa quelques problèmes à Everett. D'un côté, Wheeler était très ouvert aux nouvelles idées et il encourageait ses étudiants à penser par eux-mêmes. D'un autre côté, Wheeler avait une admiration inconditionnelle pour Bohr et son principe de complémentarité. Du coup, tout en reconnaissant le caractère novateur des idées d'Everett, Wheeler présenta de maintes objections à la façon dont celui-ci les exprimait. Par exemple, dans une note à Everett de septembre 1955, Wheeler écrivait qu'il serait "très gêné à la pensée de montrer ce texte, dans son état actuel, à Bohr" car il pouvait suggérer des "interprétations erronées mystiques" à trop de lecteurs non experts. Finalement, sur les conseils pressants de Wheeler, Everett résuma le long texte où il développait en détail ses idées, en un texte beaucoup plus court qu'il soutint, comme thèse doctorale en 1957, et qui fut publié la même année, accompagné d'un texte de présentation de Wheeler.

L'interprétation d'Everett de la théorie quantique est l'une des grandes avancées conceptuelles de la physique du vingtième siècle. L'auteur de ce livre pense qu'elle aurait plu à Einstein (qui est mort en avril 1955, quand Everett commençait juste à développer son idée). En effet, non seulement elle apportait une réponse nouvelle au paradoxe de la souris regardant l'univers, mentionné par Einstein dans sa dernière conférence, mais surtout elle s'inscrivait parfaitement dans la philosophie scientifique d'Einstein, telle que nous l'avons déjà rencontrée. Rappelons-nous la phrase d'Einstein à Heisenberg, "La théorie seule décide de ce qui est observable", qui mit Heisenberg sur le chemin d'une des premières avancées conceptuelles sur l'interprétation de la théorie quantique : les "relations d'incertitude". Comme on va le voir, l'interprétation d'Everett est la première qui prit vraiment au sérieux cette phrase d'Einstein<sup>32</sup>.

<sup>31</sup>Je remercie Charles W. Misner pour m'avoir confirmé la présence de Hugh Everett à ce séminaire. Pour une biographie détaillée de Hugh Everett III voir le texte d'Eugene Shikhovtsev (édité par Kenneth Ford) sur le site internet de Max Tegmark : <http://www.hep.upenn.edu/~max/everett>. C'est de cette biographie que sont tirés la plupart des faits cités dans le texte concernant Everett.

<sup>32</sup>Je ne sais pas si Everett connaissait explicitement cette phrase. Il aurait pu apprendre son existence de Wheeler

Cependant, malgré – ou, sans doute, à cause de – sa nouveauté, l’interprétation d’Everett ne suscita aucun intérêt. Avant qu’elle ne ressuscite, grâce aux efforts du physicien théoricien Bryce DeWitt, dans les années 1970, elle était totalement ignorée, même par les experts reconnus de l’histoire de la mécanique quantique (comme Max Jammer). Ce rejet est sans doute en partie dû au manque total d’intérêt de Niels Bohr lui-même pour les idées d’Everett. Bohr lu la version longue de la thèse d’Everett, et souleva des objections. Au printemps 1959, sur l’insistance de Wheeler, Everett visita Copenhague pendant six semaines pour rencontrer Bohr et discuter de son interprétation avec lui. Everett garda un très mauvais souvenir de cette rencontre. Bohr n’était pas intéressé, et il ne laissa jamais à Everett la possibilité d’expliquer en détail ses idées<sup>33</sup>. Aujourd’hui, d’après un sondage par courrier électronique récent, la majorité des physiciens théoriciens intéressés à comprendre la cosmologie dans un cadre quantique, adoptent l’interprétation d’Everett. En fait, ils n’ont pas le choix. Comme l’écrivait récemment celui par qui l’interprétation d’Everett est sortie de son obscurité, Bryce DeWitt :

“L’interprétation d’Everett a été adoptée par l’auteur [Bryce DeWitt] par simple nécessité pratique : il n’en connaît aucune autre. Tout au moins, c’est la seule qu’il connaisse qui n’impose ni limitations artificielles ni métaphysique floue tout en restant capable de servir aux besoins variés de la cosmologie quantique, de la physique quantique mésoscopique, et de la discipline en chantier qu’est le calcul quantique.”<sup>34</sup>.

### 13 Le monde multiple

Quelle est l’idée essentielle de l’interprétation d’Everett ? Pour l’exposer, rappelons le paradoxe central de la théorie quantique, tel qu’il fut souligné par l’argument du *baril de poudre* (mi-explosé, mi-intact) d’Einstein et du *chat* (mi-vif, mi-mort) de Schrödinger. La théorie quantique décrit le système constitué du chat et de son environnement (la boîte où il est, l’air qu’il respire, le mécanisme léthal déclenché par un atome radioactif, ...) par une fonction de la *configuration* de ce système. A chaque configuration  $q$  du système est associé un nombre (complexe)  $\mathcal{A}(q)$  que l’on appellera simplement l’*amplitude* de la configuration  $q$ . Qu’est ce que c’est qu’une configuration  $q$ , considérée à un instant fixé  $t$ , et comment la décrit-on ? Par exemple, on peut décrire chaque *configuration* instantanée possible du chat et de son environnement en spécifiant la position dans l’espace de chacun des atomes<sup>35</sup> du système (les atomes constituant le chat, ceux dans l’air, ceux dans le mécanisme léthal, ...). La position de chaque atome est spécifiée en se donnant ses trois coordonnées dans l’espace (longueur, largeur, hauteur). Appelons  $N$  le nombre total d’atomes dans le système. Ce nombre  $N$  est gigantesque. On rappelle, en effet, qu’un gramme de matière contient environ six cent mille milliards de milliards ( $6 \times 10^{23}$ ) d’atomes. Une configuration du système total est donc spécifiée en se donnant une liste (gigantesque) de  $3N$  nombres. La notation  $q$  désigne une telle liste<sup>36</sup>.

Chère lectrice, cher lecteur, je sens que vous vous effrayez à la pensée de considérer une quantité  $\mathcal{A}$  qui dépend d’un nombre si gigantesque de variables. De plus, comme on l’a indiqué brièvement, l’amplitude  $\mathcal{A}$  n’est pas un nombre “réel” habituel (comme 2,5 ou 3,1416) mais un nombre complexe, c’est-à-dire essentiellement une flèche dans un plan, qui nécessite deux nombres “réels” pour sa description (par exemple la longueur de la flèche, et l’angle qu’elle fait avec la direction de l’est). Pour visualiser ce que veut dire une telle amplitude  $\mathcal{A}$  dépendant d’autant de variables, nous pouvons reprendre une représentation introduite par l’auteur dans un livre

---

qui devait la connaître. Cette phrase figure en effet en bonne place dans le livre de John Archibald Wheeler et Wojciech Hubert Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.

<sup>33</sup>Voir la biographie d’Everett par Eugene Shikhovtsev (éditée par Kenneth Ford), *op.cit.*

<sup>34</sup>Bryce DeWitt, *The Global Approach to Quantum Field Theory*, Clarendon Press, Oxford, 2003 ; volume 1, page 144.

<sup>35</sup>Pour être plus précis il faudrait considérer toutes les particules élémentaires stables du système (électrons, quarks) et inclure aussi une description des divers champs d’interaction (électromagnétique, faible, forte, gravitationnelle).

<sup>36</sup>Autrement dit  $q = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_N, y_N, z_N)$ . L’amplitude  $\mathcal{A}$  est une fonction complexe du temps  $t$  (où l’on considère la configuration) et des  $3N$  variables réelles  $q$ .

précédent<sup>37</sup>. Elle consiste à faire appel (mentalement) à des techniques cinématographiques.

D’abord chaque configuration  $q$  du système est représentée par une *image photographique* (holographique<sup>38</sup>) du système à l’instant considéré. A chaque  $q$ , c’est-à-dire à chaque image photographique du système, nous voulons associer une certaine amplitude  $\mathcal{A}$ , repérée par une flèche dans un plan, ayant une certaine longueur, et pointant dans une certaine direction. A chaque direction de la flèche on peut associer une *nuance de couleur* sur le “cercle des couleurs” : par exemple on associe à la direction de l’est (sur une carte géographique) la couleur orange, puis, à mesure que l’on fait tourner la direction dans le sens des aiguilles d’une montre, on fait évoluer la couleur correspondante en passant successivement de l’orange (est) au rouge (sud-est), au pourpre (sud), au violet (sud-ouest), au bleu (ouest), au bleu-vert (nord-ouest), au vert (nord), et finalement au jaune (nord-est). Quand on continue à tourner du nord-est à l’est, la nuance de couleur évolue continûment du jaune à l’orange, de sorte qu’on retombe bien sur ses pieds et qu’on a étalé les nuances les plus courantes sur un cercle. On a dit que chaque amplitude  $\mathcal{A}$  correspondait à *une longueur et une direction*. A la *longueur* nous pouvons faire correspondre une *intensité lumineuse* (qui est faible si la longueur est courte et forte si la longueur est longue), et à la *direction* une *nuance de couleur* (par exemple orange). Donc on peut repérer chaque amplitude complexe  $\mathcal{A}$  par une *couleur*, ayant à la fois une certaine intensité, et une certaine nuance de couleur : par exemple un orange d’une luminosité intense, ou un rouge d’une luminosité moyenne, ou un vert de faible luminosité, etc.

Combinons alors ces deux représentations : celle de la configuration spatiale du système par une *image photographique* (initialement en noir et blanc), et celle de l’amplitude associée à cette configuration par une *couleur* (intensité et nuance). Cela nous donne une *image photographique ayant une certaine intensité lumineuse et une certaine nuance de couleur*. Par exemple, à un instant donné, le chat vif avec tout son environnement est représenté par une image bleue intense, et le chat mort avec son environnement par une image rouge de même intensité. Nous pouvons maintenant *superposer* ces deux images, par la technique cinématographique de *surimpression*. C’est-à-dire, on imprime sur le même cliché les deux images précédentes. Cette surimpression d’images, colorées plus ou moins intensément, du système donne une représentation à peu près fidèle de la notion mathématique d’amplitude complexe  $\mathcal{A}$  dépendant d’une configuration spatiale  $q$ . Pour compléter cette représentation, il suffit de faire varier l’instant  $t$ , auquel on avait considéré le système. A chaque instant  $t$  correspond donc une surimpression, sur un même cliché, de plusieurs images colorées plus ou moins intensément. En considérant tous les instants successifs, on obtient donc une suite (continue) d’images (colorées et surimpressionnées) c’est-à-dire un *film en couleur, surimpressionné*. Enfin, il faut imaginer que la nuance de couleur de chaque configuration change extrêmement vite, en tournant sur le cercle des couleurs, dès que cette configuration se modifie, même de façon infinitésimale (par exemple dès qu’un seul atome de la configuration bouge). De plus, même pour un “plan fixe”, où la configuration ne bouge pas du tout, il faut imaginer que sa nuance de couleur change très rapidement au cours du temps, en tournant à toute vitesse sur le cercle des couleurs (pendant que l’intensité lumineuse reste constante)<sup>39</sup>.

Exposons maintenant l’idée d’Everett. Elle consiste essentiellement à prendre au sérieux la phrase d’Einstein : “La théorie elle-même définit ce qui est observable”. Prenons d’abord au sérieux la théorie quantique et demandons-lui de définir “ce qui est réel”. Chaque configuration  $q$  va avoir “plus ou moins de réalité” selon la valeur de l’amplitude  $\mathcal{A}(q)$ . Autrement dit nous interprétons  $\mathcal{A}$

<sup>37</sup>Thibault Damour et Jean-Claude Carrière, *Entretiens sur la multitude du monde*, Editions Odile Jacob, Paris, 2002.

<sup>38</sup>Une image photographique habituelle est une représentation imparfaite car elle projette une configuration tridimensionnelle sur un film plat, bidimensionnel. Le lecteur doit imaginer soit que l’on parle de photographies tridimensionnelles, soit qu’il s’agit d’hologrammes bidimensionnels contenant toute l’information spatiale sur la configuration.

<sup>39</sup>Plus précisément, la fréquence  $f$  avec laquelle la nuance de couleur d’un système physique tourne sur le cercle des couleurs est donnée par la relation de Planck-Einstein ( $E = hf$ ). C’est-à-dire quelle vaut  $f = E/h$  où  $E$  est l’énergie totale du système et  $h$  la constante de Planck. Ce lien entre l’énergie du système et la fréquence de rotation sur le cercle de l’amplitude complexe  $\mathcal{A}$  constitue essentiellement la fameuse “équation de Schrödinger”. A cause de la très petite valeur numérique de la constante de Planck  $h$ , la fréquence  $f$  est extrêmement grande pour toute énergie macroscopique  $E$ .

comme une *amplitude d'existence*, et non pas (comme dans l'interprétation de Born-Heisenberg-Bohr) comme une *amplitude de probabilité*. En effet, la notion d'amplitude de probabilité pour une certaine configuration  $q$  suggère, dès l'abord, un processus aléatoire par lequel seule une configuration, parmi un ensemble de configurations possibles, est réalisée, c'est-à-dire passe du possible à l'actuel. En revanche, la notion d'amplitude d'existence suggère l'existence simultanée (dans un cliché multiplesurimpressionné) de toutes les configurations possibles, chacune "existant" de façon actuelle, mais avec plus ou moins d'intensité (la couleur codant "l'orientation" de l'amplitude  $\mathcal{A}$ , c'est-à-dire ce qu'on appelle en physique sa "phase").

En utilisant l'analogie cinématographique expliquée ci-dessus, l'interprétation d'Everett contient deux éléments. Le premier consiste à dire que la "réalité quantique" est un film en couleur, multiplesurimpressionné. A chaque instant, toutes les images individuelles surimpressionnées les unes sur les autres "existent" avec une intensité donnée par la longueur de l'amplitude complexe  $\mathcal{A}$ . Seules "n'existent pas" les configurations  $q$  dont l'amplitude correspondante  $\mathcal{A}(q)$  est nulle. Arrivé à ce stade-là, le lecteur se dit que le film obtenu en projetant successivement toutes ces images surimpressionnées sera proprement invisible. Il n'offrira qu'un brouillamini infini d'images. On semble retrouver ainsi la description "nébuleuse" ou floue dont se plaignait Einstein et Schrödinger, alors que l'on voit toujours, autour de soi, la réalité "exister" dans une configuration bien précise, comme dans un film unique aux images nettes, sans aucune surimpression.

C'est là qu'intervient le deuxième élément de l'interprétation d'Everett. Pour exposer complètement ce deuxième élément, il faudrait avoir recours à certaines caractérisations mathématiques mesurant le fait que certaines images (ou certaines successions d'images, c'est-à-dire certains films) sont si différentes les unes des autres que, quand on les surimpressionne, elles "n'interfèrent pas" entre elles, de sorte qu'on peut "mettre au point" sur l'une ou sur l'autre. On fait allusion ici à un phénomène mathématique semblable à ce qu'on a appelé<sup>40</sup> l'"effet cocktail", c'est-à-dire la possibilité pour deux personnes d'avoir une conversation entre elles, au milieu du brouhaha des conversations entrecroisées de beaucoup d'autres personnes. Une autre analogie serait celle consistant, pour le propriétaire d'une radio, à changer la fréquence de réception pour pouvoir écouter, sans "interférences" avec les autres chaînes de radio, une chaîne particulière.

Autrement dit, pour revenir à notre analogie cinématographique, Everett nous dit que parmi le brouillamini du film total multiplesurimpressionné, il existe des sous-films aux images (à peu près) nettes, qui évoluent dans le temps selon des scénarios (à peu près) logiques. Le point important étant que les personnages qui évoluent dans un tel sous-film agissent, à tout instant, en tenant compte (à peu près) uniquement de ce qu'ils ont vu ou senti dans les images antérieures de ce même sous-film.

Donnons un exemple cinématographique de cette idée. Au milieu du très beau film de Frank Capra *It's a Wonderful Life* (en français, *La vie est belle*), le héros George Bailey, joué par James Stewart, veut se suicider la veille de Noël, car il estime avoir raté sa vie et avoir été inutile. Alors, l'ange Clarence fait se redérouler sous ses (et nos) yeux, depuis le début, le film de ce qui se serait passé si le héros n'avait jamais existé. Ce deuxième film se développe aussi de manière cohérente, et devient progressivement très différent du premier, c'est-à-dire de la première moitié du film de Capra. L'idée d'Everett c'est essentiellement que, dans la réalité quantique totale, les deux moitiés (avec et sans George Bailey) du film sont surimpressionnées l'une sur l'autre, et se déroulent donc simultanément. Cependant, dans chaque sous-film, chaque personnage n'a connaissance que de ce qui s'est passé et se passe dans sa propre couche d'impression, et n'a donc aucune "conscience" de l'"existence" de l'autre sous-film, se déroulant sur la couche d'impression voisine.

Indiquons enfin qu'Everett n'établit pas complètement la nécessité de ce qu'il proposait. En faisant l'hypothèse de l'existence de sous-films, qui n'interfèrent pas entre eux, il réalisa un desideratum essentiel d'Einstein ("Probabilitatem esse deducendam") celui de justifier le lien entre l'amplitude d'existence  $\mathcal{A}(q)$  et la *probabilité* pour un observateur de voir la configuration  $q$  correspondante<sup>41</sup>. Ensuite, d'autres physiciens justifiaient l'existence (apparente) de sous-films n'in-

<sup>40</sup>Pour l'"effet cocktail", et plus généralement pour une explication plus détaillée de la notion d'amplitude d'existence et de l'interprétation d'Everett, voir T. Damour et J.C. Carrière, *op.cit.*

<sup>41</sup>Plus tard, d'autres physiciens, notamment Bryce DeWitt améliorèrent la preuve indiquée par Everett.

terférant pas entre eux en étudiant ce qu'on appelle maintenant la *décohérence* entre deux sous-films possibles<sup>42</sup>.

Indiquons que l'interprétation d'Everett fut appelée, par celui qui la sortit de l'obscurité, Bryce DeWitt, "l'interprétation des mondes multiples" (*The Many-Worlds Interpretation*). Cette appellation se réfère à l'existence de nombreux sous-films n'interférant pas entre eux au sein du film total multiples surimpressionné. On dit alors que le monde se "scinde" à tout moment en de multiples exemplaires légèrement différents qui, à leur tour, se scindent à l'instant suivant, etc. Cela conduit à l'image d'un monde qui se "ramifie" continuellement en une multiplicité de mondes séparés. Cette image a été utilisée par d'excellents physiciens comprenant très bien l'interprétation d'Everett : notamment Bryce DeWitt et David Deutsch<sup>43</sup>. Je trouve cependant que cette image a l'inconvénient de suggérer une scission complète entre des mondes classiques séparés, semblable à la scission d'une cellule en deux, puis à sa multiplication irréversible. Je préfère rester plus proche du formalisme même de la théorie et parler d'*un monde multiple*, c'est-à-dire d'*un* film multiples surimpressionné.

Mentionnons enfin qu'en qualifiant la réalité de *monde multiple* on peut (et en fait on doit) entendre le mot "monde" dans le sens que lui donnait Minkowski, c'est-à-dire *un espace-temps*. La réalité relativiste *classique* (au sens de pré-quantique) est identifiée à un espace-temps unique, c'est-à-dire un monde quadridimensionnel. Dans notre analogie cinématographique, un tel monde correspond à *un film*, c'est-à-dire une suite ("un empilement") d'images tridimensionnelles. La réalité *quantique* correspond à un film multiples surimpressionné, c'est-à-dire à un empilement d'images surimpressionnées. Notez que, en partant de cet empilement, on peut *a priori* y distinguer un très grand nombre de sous-films, beaucoup plus que le nombre de couches de surimpression sur une image instantanée. En effet si on considère par exemple un mini-film de trois images successives, dont chacune a deux couches de surimpression, on peut en tirer  $2 \times 2 \times 2 = 2^3$  sous-films de trois images successives, dont chacune est prise au hasard parmi les deux images possibles à chacun des trois instants du film total. Everett nous dit cependant que la plupart de ces sous-films n'"existent" qu'avec une amplitude trop faible pour être perçus. Seuls certains sous-films "quasi-classiques" particuliers, dont l'amplitude est renforcée par un phénomène d'*interférence positive*, vont "exister" avec une amplitude suffisante pour être perçus<sup>44</sup>.

## 14 Le Kantique du Quantique

Le lecteur se dit peut-être qu'Everett, et ceux qui adoptent son point de vue, ont vraiment dépassé les bornes du "raisonnable", et que cette idée d'un monde fantasmagoriquement multiple est trop "absurde" pour être prise au sérieux. C'est bien à cause du caractère génialement "absurde" de l'idée d'Everett qu'elle fut ignorée (notamment par Bohr), rejetée ou considérée comme tabou pendant presque trente ans. Même aujourd'hui des experts dans l'interprétation de la mécanique quantique rejettent avec une moue incrédule et désapprobatrice l'interprétation d'Everett en arguant qu'elle viole d'une façon éhontée le principe d'économie logique posé par Guillaume d'Ockham : "Il ne faut pas multiplier les entités sans nécessité."

Tout au contraire, nous tenons à préciser que l'interprétation d'Everett se définit par son économie logique. C'est la seule interprétation de la théorie quantique qui ne rajoute pas d'éléments étrangers (physiques ou métaphysiques) à la théorie. Nous considérons quant à nous que c'est la seule interprétation possible (voir aussi la citation ci-dessus de Bryce DeWitt) et qu'elle trouve sa justification dans l'épistémologie la plus rigoureuse et la plus rationnelle, notamment celle du philosophe allemand Emmanuel Kant.

<sup>42</sup>Le premier résultat rigoureux sur la décohérence, et sur son rôle pour justifier la "théorie quantique de la mesure", est dû au physicien théoricien suisse Klaus Hepp (1972). La décohérence fait actuellement l'objet de nombreuses études expérimentales (notamment par le groupe du physicien français Serge Haroche). Il est en effet essentiel de la comprendre et de la maîtriser pour envisager d'utiliser toutes les possibilités offertes par la théorie quantique en cryptographie et en informatique.

<sup>43</sup>Voir le livre stimulant de David Deutsch, *L'étoffe de la réalité*, Cassini, Paris, 2003.

<sup>44</sup>Pour une discussion plus détaillée voir T. Damour et J.C. Carrière, *op.cit.*

Un des buts de Kant était de clarifier la “nature” des objets (espace, temps, force, matière) dont parle la science, et de comprendre en quelle mesure la science fait des affirmations “vraies” sur ces objets. Par exemple, l’“espace” absolu évoqué par Newton est-il quelque chose de “réel” qui “existe” par lui-même indépendamment des choses ? La géométrie euclidienne que l’on attribue à l’espace est-elle “vraie” de façon *a priori*, c’est-à-dire avant de faire des mesures pour la vérifier ? Ce n’est pas le lieu de discuter en détail les réponses apportées par Kant à ces questions<sup>45</sup>. Disons simplement que si Kant reconnaît bien sûr le rôle essentiel de l’*expérimentation* dans les progrès de la physique, il insiste fortement sur le fait que l’expérimentation n’est vraiment fructueuse que si la *raison* “prend les devants” en posant un cadre logico-mathématique permettant d’interpréter les résultats expérimentaux, de leur donner un sens. Cette conception révolutionne la notion même de “réalité”, c’est-à-dire de savoir ce qu’est “un objet” ou “une chose”, pour l’investigateur rationnel. Comme l’écrit Kant :

“On a admis jusqu’ici que toutes nos connaissances devaient se régler sur les objets ; ... Que l’on cherche donc une fois si nous ne serions pas plus heureux dans les problèmes de la métaphysique, en supposant que les objets se règlent sur notre connaissance ...”

Appliquons cette philosophie à l’interprétation de la théorie quantique. Cela va nous conduire à ce que j’aime appeler “le Kantique du Quantique”, où le mot *Kantique* fait référence à une approche parfaitement rationnelle (alors que le mot *Cantique* tendrait à suggérer une incantation magique). Le Kantique du Quantique nous dit donc que nous devons régler “les objets”, c’est-à-dire la notion même de réalité (res = chose), sur “notre connaissance”, c’est-à-dire sur la théorie quantique elle-même.

En effet, la théorie quantique a été vérifiée par de très nombreuses expériences qui ont, en particulier, confirmé la validité de ses conséquences les plus “bizarres”, comme l’enchèvement prévu par Einstein-Podolsky-Rosen entre systèmes séparés, et la superposition d’états macroscopiques différents, du type du baril de poudre d’Einstein ou du chat de Schrödinger<sup>46</sup>. On peut, et doit donc jusqu’à nouvel ordre, considérer la théorie quantique comme une *connaissance* fermement établie. Alors, si l’on part de cette connaissance, c’est-à-dire du formalisme mathématique de la théorie quantique, et si on lui demande de définir la nature des “objets quantiques”, c’est-à-dire de la “réalité quantique”, on retombe nécessairement sur le point de vue d’Everett, car c’est la seule “interprétation” qui se fonde uniquement sur le formalisme de la théorie, sans lui rajouter ni “métaphysique floue”, ni incantation verbale, ni hypothèses nouvelles non vérifiées.

J’ai dit plusieurs fois qu’Einstein lui-même avait affirmé son adhésion à un point de vue voisin de celui de Kant (“Seule la théorie décide de ce qui est observable.”). Il est intéressant de remarquer qu’il s’exprima dans une lettre à Schrödinger (écrite juste après la parution de l’article EPR) d’une façon très proche des vues kantienne, et ce justement à propos du caractère mystérieux de la réalité quantique :

“La véritable difficulté tient à ce que la physique est une sorte de métaphysique : la physique décrit la “réalité”. Or, nous ne savons pas ce qu’est la “réalité”, nous ne la connaissons qu’à travers la description qu’en donne la physique !”

.....  
 .....

---

<sup>45</sup>Voir Emmanuel Kant, *Critique de la Raison Pure*, GF Flammarion, Paris, 1976. Voir aussi le livre déjà cité de Martin Heidegger, *Qu’est-ce qu’une chose*.

<sup>46</sup>Des expériences récentes, dues notamment au groupe du physicien Serge Haroche, ont permis d’observer en détail des situations de type “chat de Schrödinger” contenant des systèmes *mésoscopiques* (c’est-à-dire intermédiaires entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique).

## Références

- [1] MICHEL PATY, *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, 1993.
- [2] PAUL ARTHUR SCHILPP, Albert Einstein : philosopher-scientist, The library of living philosophers, Lassalle (Ill.), open Court, 1949.
- [3] ALBERT EINSTEIN, *Sur la méthodologie de la physique théorique* (Herbert Spencer Lecture, 1933) dans Œuvres choisies, sous la direction de Françoise Balibar, Editions du Seuil et Editions du CNRS, tome 5, p. 102.
- [4] Pour une mise au point récente des contributions de Poincaré à la Relativité, voir T. Damour, *Poincaré, Relativity, Billiards and Symmetry* (conférence donnée au Symposium Solvay sur Henri Poincaré, Bruxelles, 8-9 octobre 2004), hep-th/0501168.
- [5] ALBERT EINSTEIN, *Remarques sur la théorie de la connaissance de Bertrand Russell* (in The Philosophy of Bertrand Russell, P.A. Schilpp éd., 1944) dans Œuvres choisies, *op.cit.*, tome 5, p. 107.
- [6] ALBERT EINSTEIN, lettre du 7 mai 1952 à Maurice Solovine, dans Œuvres choisies, tome 4, pp. 310-311; voir aussi pp. 410-411 de [1].
- [7] MAURICE DE BROGLIE, “Poincaré et la philosophie”, *in* Le livre du centenaire de la naissance de Henri Poincaré, 1854-1954, *in* Œuvres de Poincaré, XI (deuxième partie du tome XI) pp. 71-77 (Gauthier-Villars, Paris, 1956); cité dans [1].
- [8] THIBAUT DAMOUR, *Si Einstein m’était conté*, Le cherche-midi, 2005.

