

Voyages dans le monde quantique

Bernard d'ESPAGNAT & Hervé ZWIRN

La science et la philosophie étaient autrefois indissociables. Aristote était à la fois physicien, logicien et philosophe. Plus près de nous, Descartes, Pascal et Leibniz sont aussi importants pour leur apport philosophique que pour leurs découvertes mathématiques. Plus récemment encore, Henri Poincaré a été mathématicien, physicien et philosophe. Mais les liens entre science et philosophie se sont largement distendus durant le XX^e siècle et la séparation entre scientifiques et philosophes s'est accentuée au point qu'on peut même dire qu'une certaine méfiance, sinon une hostilité, s'est instaurée entre les deux catégories de penseurs. Cela est regrettable pour deux raisons, symétriques en ce sens que l'une concerne la genèse des questions scientifiques et l'autre les réponses qui y sont apportées. D'un côté, les problèmes que le scientifique se pose sont bien souvent issus de questions philosophiques fondamentales sur l'Univers qu'il est important de ne pas oublier. De l'autre, la signification profonde des résultats obtenus par l'intermédiaire des théories scientifiques demande souvent un éclairage philosophique pour être clarifiée. Le dialogue entre scientifiques et philosophes doit donc être restauré pour le bénéfice de la connaissance au sens le plus large du terme. Une initiative pionnière de ce type avait été réalisée par l'Académie des sciences en 1984. Jean Hamburger avait en effet organisé une série de conférences de philosophie des sciences suivies chacune par une discussion entre scientifiques et philosophes¹. C'est dans le même esprit qu'ont été organisées par le Collège de physique et de philoso-

[1] *La Philosophie des sciences aujourd'hui*, sous la direction de Jean Hamburger, Gauthier-Villars, 1986.

phie des séances réunissant physiciens et philosophes sous l'égide de l'Académie des sciences morales et politiques et consacrées dans leur très grande majorité à des données récentes exclusivement publiées dans des revues scientifiques spécialisées. L'ouvrage que voici n'est autre que le compte rendu de ces dernières².

Il se trouve que la physique moderne, et particulièrement la physique quantique, peut aujourd'hui apporter un éclairage nouveau à des questions philosophiques profondes et qu'il n'est donc plus possible d'ignorer les apports de cette physique pour qui veut sérieusement réfléchir aux questions fondamentales portant sur le réalisme, le déterminisme, la causalité ou la localité. Non pas que la physique quantique apporte des réponses définitives à ces questions mais elle élimine certaines positions philosophiques aujourd'hui devenues intenable. À l'inverse, les formalismes utilisés par les physiciens soulèvent de difficiles questions d'interprétation que les physiciens eux-mêmes sont incapables de résoudre sans une réflexion philosophique approfondie. Le dialogue entre physiciens et philosophes profite donc aux deux parties. Les philosophes doivent tenir compte des enseignements de la physique pour ne pas soutenir des positions réfutées par les résultats contemporains et les physiciens peuvent s'appuyer sur les philosophes pour enrichir leur réflexion concernant les fondements mêmes de leur discipline.

Les thèmes qui ont été abordés durant nos conférences ont tous en arrière-plan la question de savoir s'il existe une réalité indépendante, existant «en soi». Déjà dans l'ouvrage cité précédemment, Jean Hamburger écrivait : «L'exploration scientifique du monde est sans limites, mais elle est aussi sans espoir d'atteindre une réalité indépendante de l'observateur, de ses méthodes et de son échelle d'observation.» Les thèmes traités sont également liés au problème de la causalité et à celui posé par la notion d'information. Les positions des physiciens et des philosophes sur ces questions sont loin d'être homogènes mais certaines d'entre elles sont aujourd'hui irrecevables quand on tient compte des résultats récents de la physique contemporaine. Quelles sont aujourd'hui les conceptions cohérentes ? Quelles nuances faut-il apporter au réalisme pour lui permettre de survivre ? Faut-il considérer un concept de causalité élargie pour tenir compte du fait

[2] Ces séances ont eu lieu entre le 22 novembre 2010 et le 25 mars 2013.

qu'une éventuelle réalité indépendante serait première par rapport à l'espace-temps? Doit-on considérer que la nature a choisi d'adopter un comportement indéterministe par essence?

Il va de soi que dans un tel domaine il n'était pas question d'attendre l'établissement de conclusions tranchées et définitives. La visée était avant tout de permettre à chaque participant d'élargir, grâce à ces échanges, l'assise de sa réflexion personnelle relativement à un domaine actuellement en rapide évolution. Et la présente publication a, bien entendu, pour objet de procurer cet avantage à ses lecteurs. Certes la mécanique quantique a, dès ses débuts, posé des questions d'ordre philosophique. Mais la redécouverte, dans le cours des années 1960, de la non-séparabilité quantique et, plus généralement, de l'intrication – *alias* enchevêtrement – à distance (notions déjà mises fortement en évidence par Erwin Schrödinger dès 1935 mais étrangement restées trente ans sous le boisseau) en a fait surgir de nouvelles, en même temps qu'elle a éclairé les anciennes d'un jour plus cru. C'est ainsi, par exemple, qu'elle suscite des recherches pures (et même appliquées: inviolabilité en cryptographie, perspectives en calcul quantique, etc.), dans le cadre desquelles les notions relationnelles, proches du connaître (*software*), l'emportent de plus en plus sur celle d'atomicité, classiquement liée à la notion d'être (*hardware*).

Un tel état de choses justifiait assurément un examen collectif et renouvelé – tenant compte très exactement de notre savoir d'aujourd'hui – des diverses conceptions de la notion même de réel, ainsi que de celle de connaissance et des rapports de l'une à l'autre, tant celles déjà envisagées par les philosophes (aussi bien classiques que contemporains) que d'autres, susceptibles maintenant d'être considérées. Certes, dans cet esprit, il nous a fallu accorder à la technicité la part inévitable qui lui revient mais heureusement, vu la présence simultanée parmi nous de philosophes et de physiciens, nous avons été tout naturellement amenés à éviter la technicité pour elle-même tout comme l'érudition pour l'érudition, qui eussent été, pour nous, deux écueils.

Une des données remarquables dans ce domaine est l'actuelle diversité des attentes des physiciens à l'égard de l'information à escompter de leur discipline. Il n'en a pas toujours été ainsi. Il semble qu'au temps de la physique dite «classique» tous attendaient d'elle une levée des apparences, autrement dit une connaissance toujours meilleure

de la réalité physique «telle qu'elle est vraiment en elle-même». Un fait qui se dégage clairement de nos débats est qu'aujourd'hui il n'y a plus qu'une petite minorité de physiciens confirmés pour croire que, prise au pied de la lettre, cette visée soit réalisable. Au vu du rôle éminent que ses succès dans le domaine de la prévision d'observations confèrent à la physique quantique et des difficultés qu'il y a à l'interpréter comme une description d'une réalité radicalement indépendante de l'humain, certains se positionnent à l'autre extrême. À leur discipline ils ne demandent rien d'autre que de nous aider à prévoir ce que nous constaterons à la suite de telles ou telles opérations. D'autres ne renoncent pas à y trouver du descriptif mais jugent que celui-ci porte exclusivement sur l'expérience humaine communicable. D'autres encore attendent seulement d'une théorie qu'elle leur donne du «grain à moudre», des idées d'expériences nouvelles, et mesurent à cette aune sa validité. Mais il en est aussi qui, tout en déniaient la réalité-en-soi des objets, persistent à tenir la notion de réel pour essentielle, certains ne l'attachant qu'aux structures, c'est-à-dire aux rapports et non à ce qu'ils relient, d'autres voyant en elle une hypothèse non expérimentalement vérifiable mais nécessaire à la levée d'une contradiction : celle inhérente à l'idée d'un réel «universellement relatif».

Dans les pages qui suivent, on ne verra quasiment jamais telle ou telle de ces conceptions affichée au départ par le conférencier. Car ceux-ci, physiciens quasiment tous, ne les nourrissent en général qu'implicitement et parfois même avec réticence, avec le sentiment que trop réfléchir à ces choses les obligerait à transgresser les frontières de leur discipline. Ce qu'ils exposent ce sont, par conséquent, des théories purement scientifiques, avec les données expérimentales les corroborant. Mais aussi – car comment faire autrement ? – avec les surprises qu'elles apportent, qui obligent à réfléchir. Les débats qui suivent ces exposés mettent tout naturellement en lumière les diverses manières que chacun a de surmonter, en quelque sorte, ces surprises. Et c'est peut-être la caractéristique principale du présent ouvrage que de permettre de prendre sur le vif la façon dont certains problèmes conceptuels fondamentaux sourdent, pour ainsi dire, d'une physique nullement développée dans ce but par ses artisans. Ainsi, on l'aura compris, ce recueil d'exposés et d'échanges de vues ne vise aucunement à présenter et justifier telle ou telle manière philoso-

phiquement préconçue d'interpréter la connaissance fournie par la physique contemporaine.

On ne s'étonnera, par conséquent, ni de la diversité des opinions émises implicitement ou explicitement à ce sujet ni, plus généralement, du fait qu'aucune classification des sujets traités dans les divers chapitres n'ait été tentée sur cette base. De fait, cette diversité a été considérée comme une richesse à exploiter. De ce fait, l'ouvrage se présente essentiellement comme un compte rendu des séances au cours desquelles telle ou telle théorie ou telle ou telle expérience a été étudiée et discutée. Édouard Brézin, membre et ancien président de l'Académie des sciences, y est l'auteur de l'exposé de la séance inaugurale. Intitulé «L'étrangeté incontournable du monde quantique», celui-ci rappelle que non, décidément, ce n'est pas à l'aide de nos seules idées «claires et distinctes» (Descartes) que nous pouvons interpréter nos expériences en ce domaine. Et que, même, nous devons à cet effet renoncer à considérer nombre d'entre elles comme jouissant d'une validité universelle. La séance suivante (séance II) est le compte rendu du débat extensif entre physiciens et philosophes, concernant en particulier la notion de réalité, que ce rappel a suscité. On y trouvera déjà, discutés très franchement, sans périphrases ni esquives, par Michel Bitbol, Carlo Rovelli et d'autres, quelques-uns des problèmes cruciaux évoqués ci-dessus. Les séances III et IV furent consacrés à l'importante notion de décohérence, apparue au début des années 1970 et qui rend compte du fait que les objets macroscopiques ne peuvent jamais nous apparaître comme quantiquement superposés (qu'un chat ne sera jamais vu en même temps mort et vivant, pour reprendre la boutade célèbre de Schrödinger). La première (III) consiste principalement en un exposé présenté par le physicien Jean-Michel Raimond d'une expérience faite par Serge Haroche, Michel Brune, lui-même et d'autres membres du laboratoire Kastler-Brossel (École normale supérieure) dans le courant des années 1990 et qui est d'un grand poids en ce domaine car elle fut la première à mettre en évidence le fait que la décohérence se produit en un temps très court mais fini. La seconde (IV) rapporte un échange de vues très nourri suscité par cette expérience et qui a porté sur divers aspects théoriques de la décohérence, y compris ceux de ces aspects qui, manifestement, touchent à des questions de philosophie générale (et, de nouveau, sans éluder celles relatives à la notion même de réalité).

On sait que parallèlement à la mécanique quantique dite «orthodoxe» ou «standard» – celle exclusivement enseignée dans toutes les universités de la planète – subsiste, encore vivante et vue comme plus satisfaisante par des physiciens de renom, une théorie dite «de l'onde pilote», conçue en 1927 par Louis de Broglie, développée à partir de 1952 par David Bohm, et qui fournit les mêmes prévisions observationnelles que la théorie standard tout en étant fondée sur des idées radicalement différentes. C'est à l'examen de cette théorie que furent consacrées les séances V et VI. La première (V) a été centrée sur un exposé – présenté par Franck Laloë du même laboratoire Kastler-Brossel – des grandes idées directrices de cette théorie et des avantages qu'elle comporte, le principal étant sans doute une explication toute simple, pour ne pas dire presque triviale en apparence, de ce qui se passe lors d'une mesure quantique : caractéristique effectivement remarquable car les explications que la théorie standard parvient à fournir de ce processus sont contournées et forment encore matière à débats. La seconde (VI) rapporte, ici encore, l'échange de vues ayant eu lieu sur ce sujet, ainsi qu'un commentaire de Franck Laloë visant, cette fois, à préciser les quelques sérieuses réserves que, malgré tout, il entretient à l'égard de la théorie en question.

Les séances VII et VIII portent sur deux sujets distincts, la non-localité et l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique, sujets associés ici en raison d'une circonstance : la parution récente d'un article de Carlo Rovelli et Matteo Smerlak réexaminant le premier à la lumière du second. La séance VII a comporté l'exposé donné par ce second auteur, premièrement des idées directrices de l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique initialement conçue par le premier et, deuxièmement, de leur incidence relativement à ladite non-localité. La discussion subséquente fut alimentée en partie par des contributions de Carlo Rovelli lui-même, présent ce jour-là. Quant à la séance VIII, elle a comporté deux cours exposés suivis de discussions, l'un, par Michel Bitbol, consacré à la non-localité et aux théorèmes de Bell, l'autre, par Alexei Grinbaum, s'interrogeant sur la notion d'observateur dans l'approche de Rovelli, et un débat plus général où d'autres questions relatives à cette même approche relationnelle furent soulevées.

La séance IX fut consacrée à la présentation par Roger Balian d'un mode de résolution du problème de la mesure fondé sur l'interpréta-

tion statistique de la mécanique quantique et procédant par analyse détaillée de certains modèles dynamiques. Et pour finir par un coup de projecteur sur la recherche à venir, dans la dixième et ultime séance de cet ouvrage, Carlo Rovelli a brossé une esquisse rapide de la théorie de la gravité quantique qui vise à l'unification de la mécanique quantique et de la relativité générale, et qui tente donc de donner un cadre unifié à l'ensemble des phénomènes physiques.

Il se trouve qu'en français nombre d'expressions orales courantes donnent à appréhender le fil sous-jacent aux bonnes idées nettement plus vite et mieux que ne le fait leur exposé dans le langage écrit conventionnel. Pour cette raison, la transposition des débats dans ce langage-là a été réduite au strict nécessaire. Chaque fois que possible, et donc en fait le plus souvent, leur acuité spontanée a volontairement été préservée. Il en résulte un style oral que nous avons volontairement conservé pour rendre compte le mieux possible de l'atmosphère de ces séances de travail et cela donne lieu, ici ou là, à des juxtapositions sans fard de vues opposées. Mais, encore une fois, il n'était pas question d'aboutir à une trompeuse unité de vue. De ce point de vue, le document ici présenté est un objet fondamentalement incomplet. Mais c'est dans cette incomplétude même – dans cette absence de conclusion – que l'on découvrira peut-être sa pertinence. Car en un temps, le nôtre, de grands ébranlements conceptuels, il initie par cette incomplétude même à des pistes de réflexion neuves, diverses et toutes sous-tendues par des faits nouveaux et très peu contestables. Il met en lumière tant les traits positifs que les difficultés propres à chacune d'elles et vise à inciter par là à l'approfondissement comparatif des unes et des autres. Méthode difficile, qui exige à la fois savoir, circonspection et intelligence imaginative et cela à très haut degré, mais qui est prometteuse pour cette raison et susceptible par conséquent de séduire de très bons esprits.