

Les paradoxes du monde quantique et le réel voilé

Jean-Louis Rivail

Les prémisses d'une révolution

À la fin du dix-neuvième siècle, le monde de la physique vivait dans un relatif confort intellectuel après les grandes avancées opérées au cours de ce siècle. Pour ce qui est de la lumière, le vieux débat entre Newton, tenant d'une nature corpusculaire, et Huygens, tenant d'une nature ondulatoire, semblait tranché dès 1801 par Young qui avait montré que la lumière était faite d'ondes, par une expérience célèbre qui consiste à éclairer un écran par un faisceau lumineux séparé en deux par deux fentes pratiquées sur un cache. Puis Fresnel réalisait des mesures de longueurs d'onde et, en 1862, Foucault donnait une valeur assez précise de la vitesse de la lumière, ce qui permettait de déterminer la fréquence d'un rayonnement monochromatique.

En 1864, Maxwell, en faisant la synthèse des équations de l'électricité et du magnétisme, prévoyait l'existence d'ondes électromagnétiques et, en portant dans les équations les constantes expérimentales intervenant dans ces lois, il obtenait une vitesse de propagation égale, aux erreurs expérimentales près, à celle de la lumière. Une vingtaine d'années plus tard, Hertz créait, en laboratoire, des ondes électromagnétiques de grande longueur d'onde qui vérifiaient en tous points les équations de Maxwell.

Les grands mystères du monde physique semblaient être résolus ou sur le point de l'être. Il restait cependant un phénomène qui n'avait pas trouvé d'explication satisfaisante, le « rayonnement du corps noir » c'est-à-dire la lumière émise par un solide chaud, dont le spectre lumineux, continu, se déplace vers les hautes fréquences lorsque la température s'élève. Un traitement théorique des échanges d'énergie entre le solide et le rayonnement ne rendait pas compte de la forme de la courbe d'émission lumineuse, et prévoyait une divergence aux hautes fréquences, connue sous le nom de « catastrophe ultraviolette ». En 1900, époque où la théorie atomique, c'est-à-dire la nature discontinue de la matière, était encore objet de discussions, Max Planck montrait que, si l'on supposait que le solide était formé d'oscillateurs dont l'énergie était proportionnelle à la fréquence notée ν , et en traitant l'équilibre énergétique de ces oscillateurs avec la température, il retrouvait parfaitement les résultats expérimentaux avec un facteur de proportionnalité constant, qu'il avait représenté par la lettre h , si l'on donnait à ce facteur la valeur $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule.seconde.

Ce travail est resté ignoré jusqu'en 1905, date à laquelle Einstein s'intéressa à l'effet photoélectrique découvert par Hertz au cours de ses expériences sur les ondes électromagnétiques. Cet effet consiste en l'apparition d'une charge positive sur un échantillon de métal lorsqu'il est éclairé par une lumière de longueur d'onde suffisamment courte, la longueur d'onde de seuil, dépendant de la nature du métal. Une étude expérimentale plus poussée déterminait la vitesse des électrons émis en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse. Einstein fit remarquer que ce phénomène peut être interprété comme le bombardement du métal par des particules d'énergie suffisante pour arracher les électrons du métal – d'où l'existence du seuil – et d'en conclure que la lumière est constituée de particules d'énergie $h\nu$ auxquelles il sera donné par la suite le nom de photons. Newton était de retour ! C'est cette découverte qui vaudra à Einstein le prix Nobel en 1921.

Le quantique entre en scène

Les bouleversements des approches du monde physique sont à l'origine d'une grande effervescence intellectuelle au cours des premières années du XX^e siècle. En 1923, Louis de Broglie, en étudiant les relations formelles entre les théories existantes et certains aspects fondamentaux de la physique, a montré que l'on pouvait décrire formellement le comportement d'une particule de masse m animée d'une vitesse v comme celui d'une onde de longueur d'onde $\lambda=h/mv$. Des expériences de diffraction d'électrons ont depuis confirmé le caractère ondulatoire de ceux-ci, avec des longueurs d'onde conformes à la théorie. Par ailleurs, le phénomène du spectre discontinu de l'émission lumineuse par les atomes excités thermiquement ou électriquement, prouvant l'existence d'états électroniques d'énergie discontinue, pouvait s'expliquer qualitativement en invoquant des états ondulatoires stationnaires. Or, à la suite de la thèse de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, en introduisant les hypothèses de la théorie dans l'équation classique des ondes, a obtenu une équation qui admet comme solutions des états énergétiques discrets et des « fonctions d'onde » qui contiennent toute l'information sur le système. Max Born a montré que le carré du module de la fonction d'onde d'une particule en un point représente la densité de probabilité de présence de la particule en ce point, et plus généralement la fonction d'onde permet de calculer la valeur moyenne d'une grandeur physique pour un système donné. Enfin l'équation de Schrödinger permet de suivre l'évolution d'un système dans le temps. Il convient de noter le caractère probabiliste de cette théorie.

À l'aide de cette nouvelle théorie, le traitement du plus simple des systèmes : l'atome d'hydrogène (un noyau et un seul électron), a immédiatement conduit à la détermination des états électroniques de cet atome, en parfait accord avec les données expérimentales, ce qui confirmait pleinement l'usage de cette théorie pour le traitement des systèmes microscopiques. Le traitement des atomes à plusieurs électrons et *a fortiori* des molécules rencontre une difficulté supplémentaire, car il s'agit de problèmes dits à *n corps* dont Henri Poincaré a démontré qu'ils n'admettent pas de solutions analytiques. Mais de nos jours, l'usage des gros calculateurs numériques permet de traiter ces systèmes avec toute la précision souhaitée.

En 1928, Paul Dirac fit la synthèse de la mécanique quantique et de la relativité restreinte, ce qui conduit, entre autres, à la théorie des interactions qui structurent les noyaux atomiques, à celle du spin électronique et du spin nucléaire. Cette théorie a permis également à prévoir l'existence de l'antimatière mise en évidence expérimentalement par la suite. Plus récemment, plusieurs phénomènes de nature purement quantiques, comme la supraconductivité ou la superfluidité, ont été théorisés et mis en évidence expérimentalement. De nos jours, la mécanique quantique n'est contestée par personne et n'a jamais été prise en défaut. Elle s'avère être le plus puissant moyen d'investigation théorique de la microphysique. Elle est par ailleurs entrée dans notre vie quotidienne. Les lasers, les transistors, les ampoules LED, la résonance magnétique nucléaire, l'imagerie médicale, les cellules photovoltaïques et beaucoup d'éléments de microélectronique constituent des applications directes de la mécanique quantique.

Les problèmes posés par l'interprétation de cette nouvelle mécanique

Très tôt, des aspects paradoxaux de cette nouvelle théorie ont été remarqués. Les données de la physique classique ne s'accordent pas au caractère probabiliste des données de cette

nouvelle théorie. Le principe d'incertitude de Heisenberg ne peut laisser indifférent un physicien traditionnel, et des observations courantes posent des problèmes. Par exemple les chercheurs en physique nucléaire utilisent, pour caractériser les rayons émis par des noyaux radioactifs, des dispositifs du type chambre de Wilson ou chambre à bulles qui permettent de visualiser la trajectoire de la particule. Comment alors concilier le fait qu'avant de pénétrer dans la chambre, la particule est une onde, complètement délocalisée, et que, brusquement, elle se manifeste comme un corpuscule ? Plusieurs expériences montrent que lorsque l'on dispose d'un instrument destiné à mettre en évidence une particule, comme la chambre de Wilson ou un écran fluorescent par exemple, on observe cette particule, et que lorsqu'on réalise une expérience relevant de la physique des ondes, comme la diffraction des électrons ou l'expérience des fentes d'Young, on met en évidence l'onde associée à la particule. À cette question, Niels Bohr et ses collègues de Copenhague répondent par la notion de complémentarité onde-corpuscule, et que c'est la nature de l'instrument d'observation qui décide de la mise en évidence de l'un ou l'autre des comportements, et qu'au moment d'interagir avec l'instrument il y a « réduction de la fonction d'onde ». Pour eux cette nouvelle théorie est par nature fondamentalement indéterministe.

Au cours des premières années d'existence de la théorie, l'interprétation de Copenhague était loin de convaincre les physiciens attachés à des vues plus classiques de la physique, qu'il s'agisse de L. de Broglie, E. Schrödinger ou encore A. Einstein qui, tout en reconnaissant la puissance de cette théorie, n'acceptaient pas son caractère probabiliste et demeuraient attachés au déterminisme classique mis à mal par ces observations. L'alternative proposée par plusieurs contemporains pour faire entrer la mécanique quantique dans la cadre déterministe de la physique traditionnelle était de dire que dans son état présent la théorie était incomplète, et d'imaginer l'existence de variables supplémentaires attachées à la particule, qui se manifestent lorsque celle-ci interagit avec l'instrument de mesure. Le débat était très vif et les actes du Congrès Solvay de 1927 rapportent les joutes intellectuelles entre Einstein et Bohr.

Les idées à ce sujet ont évolué au cours des dernières décennies, et cette particularité pour un objet quantique de se comporter soit comme une particule soit comme une onde est interprétée comme deux manifestations particulières d'une réalité plus générale qui n'est pas accessible directement.

Les paradoxes de la physique quantique

Cette dérangeante question n'est pas la seule conséquence surprenante des principes de la physique quantique. Pour prendre un exemple simple, l'électron de l'atome d'hydrogène dans son état de plus basse énergie a une probabilité de présence régulièrement répartie autour du noyau mais qui est maximale au niveau du noyau, en contradiction avec l'électrostatique classique qui stipule que deux charges opposées venant en contact l'une de l'autre doivent se neutraliser, et c'est la raison pour laquelle les premiers modèles de l'atome avaient été bâtis comme des systèmes planétaires. De même, l'effet tunnel qui prévoit qu'une particule a une certaine probabilité de traverser une barrière est un autre aspect surprenant de cette théorie.

Le principe de superposition

D'autres propriétés caractéristiques des ondes dérangent, c'est le cas en particulier du principe de superposition. Ce principe résulte du caractère linéaire de l'équation de Schrödinger qui a pour conséquence que si deux fonctions sont solutions de cette équation, leur combinaison linéaire vérifie aussi l'équation. Cette propriété fait que des mesures portant

sur un état superposé donnent un résultat relatif soit à l'un des états, soit à l'autre avec une probabilité dépendant du poids de chaque état dans la combinaison linéaire. Cela pouvait se comprendre comme un effet statistique lorsque l'expérience se faisait avec un grand nombre de particules, mais de nos jours, il est possible de réaliser des expériences portant sur une particule unique, et celles-ci montrent que dans le cas d'un état superposé, on obtient l'un ou l'autre des deux résultats avec des probabilités conformes au poids de chaque état dans la superposition. De façon similaire, il est expérimentalement établi qu'une particule unique produit des interférences dans des expériences du type des fentes d'Young, ce qui prouve que l'onde qui lui est associée emprunte les deux chemins.

Le paradoxe EPR

Le plus célèbre détracteur de l'interprétation dite de Copenhague était, nous l'avons dit, Albert Einstein qui, bien que ne contestant pas la puissance de la théorie, cherchait à mettre en évidence son caractère incomplet pour aboutir à une « super théorie » totalement déterministe. En 1935, peu après son arrivée à Princeton, il entreprend, avec deux étudiants, Boris Podolski et Nathan Rosen, une recherche de tests expérimentaux prouvant la justesse de ses vues. Il ne s'agissait que d'expériences dites de pensée car peu réalisables dans les conditions expérimentales du moment. Parmi celles-ci, il eut l'idée de considérer non pas une particule unique mais une paire de particules qui, selon la théorie, constituent un système unique. On pense par exemple à deux protons de spins opposés ou à deux photons de polarisation contraire, ce que l'on appelle maintenant un état intriqué. Imaginons que ces deux particules s'éloignent l'une de l'autre, et qu'à un moment donné, une intervention extérieure modifie l'état de l'une d'elles. Dans ce cas, la mécanique quantique prévoit que l'autre particule adopte immédiatement l'état complémentaire à celui de la première, quelle que soit la distance qui les sépare, en vertu d'une loi de conservation, ce qui signifie qu'il y a une action qui a circulé plus vite que la vitesse de la lumière, en contradiction avec la relativité restreinte. Cette remarque constitue ce que l'on a appelé le « paradoxe EPR », des initiales de ses trois auteurs.

L'intrication quantique, la non-séparabilité et l'action à distance

À la fin des années 1950 et au début des suivantes, deux physiciens théoriciens, l'un irlandais, John Bell, l'autre français, Bernard d'Espagnat, se retrouvent au CERN de Genève avec chacun un contrat de recherche en relation avec des expériences en cours ou prévues dans cette célèbre institution européenne. D'Espagnat a rappelé dans un entretien les longues discussions qui se nouent entre eux sur ces sujets d'interprétation de la mécanique quantique et, en 1964, Bell décide de prendre une année sabbatique pour se consacrer à ce problème. Il en résulte un travail théorique proposant une approche expérimentale permettant de vérifier ou d'infirmer le paradoxe EPR. La démarche consiste à envisager une série d'expériences du type EPR mettant en jeu des paires de particules intriquées. De nombreuses mesures sont effectuées sur deux détecteurs réglés au hasard, et séparées par des intervalles de temps inférieurs au temps mis par la lumière pour aller d'un détecteur à l'autre. Dans le cas où le système obéit aux principes fondamentaux de la physique classique, confirmant ainsi l'existence de variables cachées, les corrélations entre les résultats expérimentaux des deux détecteurs doivent prendre une valeur située entre deux limites données par la théorie. On parle alors des « inégalités de Bell ». Dans le cas où les prédictions de la mécanique quantique seraient vérifiées, ces inégalités seraient violées.

Ce résultat théorique, on s'en doute, a retenu l'attention de nombreux expérimentateurs, mais les conditions matérielles pour réaliser une telle expérience n'étaient pas réunies à l'époque. Néanmoins, dans les années 1970, quelques tentatives, sans être totalement concluantes, semblaient plaider en faveur de la violation des inégalités de Bell.

À la fin des années 1970, à l'université de Paris-sud Orsay, un jeune physicien, Alain Aspect, conçoit une expérience, dans le cadre de l'Institut d'Optique, mettant en jeu une paire de photons intriqués, dont les polarisations sont opposées. L'expérience, qui prendra sa forme définitive en 1982, suppose de la très haute technologie, car les deux récepteurs distants de 12 m doivent être commandés successivement en moins de temps que mettrait la lumière pour aller de l'un à l'autre, c'est-à-dire 4 ns. La mise en évidence de la violation des inégalités de Bell, donc l'absence de variables cachées, fait de cette expérience la référence pour l'action à distance, encore appelée non-localité, de deux particules intriquées. Par la suite, plusieurs expériences sont pratiquées dans des conditions variées et avec des particules de nature diverse : protons, autres noyaux, électrons..., y compris une expérience dans laquelle les mesures sont faites à plus de dix kilomètres de distance, ou une autre mettant en jeu un satellite artificiel qui reliait deux points d'observation distants sur terre de 1203 kilomètres et des rayons dont la longueur cumulée, via le satellite, varie de 1600 à 2400 kilomètres. Toutes ces expériences ont confirmé la violation des inégalités de Bell, et par conséquent le fait que le système quantique constitue un tout et que les particules intriquées ne sont pas indépendantes, quelle que soit la distance qui les sépare. Résultat en contradiction avec les hypothèses du réalisme proche selon lequel les particules sont physiquement séparées et qu'une interaction ne peut pas se propager de l'une à l'autre avec une vitesse supérieure à celle de la lumière.

La seconde révolution quantique

Alors que les innombrables expériences mettant en jeu les particularités de la mécanique quantique, ainsi que les nombreuses applications de cette science nouvelle, portent sur des systèmes macroscopiques, l'évolution des techniques et en particulier l'apport des lasers modernes permettent maintenant d'expérimenter des systèmes quantiques individuels. Ceci a été brillamment confirmé par deux expériences réalisées, l'une à Boulder (Colorado) par l'équipe de David Wineland, l'autre à Paris par l'équipe de Serge Haroche, qui ont valu à leurs auteurs le prix Nobel de physique en 2012. Le jury les récompense pour « leurs méthodes expérimentales novatrices qui permettent la mesure et la manipulation des systèmes quantiques individuels ». « Les lauréats ont ouvert la voie d'une nouvelle ère d'expérimentation dans la physique quantique en démontrant l'observation directe de particules quantiques individuelles sans les détruire ».

Ces expériences fournissent un exemple de ce qui devient possible de nos jours. De tels systèmes sont dotés de propriétés qui, lorsqu'ils font partie d'un ensemble macroscopique, sont noyées dans une moyenne qui ne permet généralement pas de tirer parti de leurs particularités. Cette possibilité nouvelle de réaliser des objets quantiques spécifiques ouvre la voie à des applications multiples en cryptologie ou téléportation d'objets quantiques, ou encore à la possible réalisation d'un ordinateur quantique qui en fournit l'exemple le plus médiatisé. L'intense activité de recherche relevant de ces possibilités nouvelles laisse à penser que le XXI^e siècle sera celui de l'étude et des applications du quantique en lui-même, ce qui constitue indiscutablement une révolution scientifique que l'on nomme souvent la seconde révolution quantique par comparaison à la première qui a conduit à toutes les réalisations qui nous sont familières et dont certaines ont été mentionnées plus haut.

Le réel voilé

La mécanique quantique constitue indubitablement une très puissante théorie pour expliquer et prévoir les propriétés du monde atomique et subatomique. Elle bouscule les fondements de la physique classique qui constituaient un ensemble cohérent à la fin du XIX^e siècle. Ainsi les notions d'intrication, d'action à distance et de non-séparabilité sont en contradiction totale avec les principes fondamentaux de la physique classique.

Si les utilisateurs de la mécanique quantique, pour progresser dans la compréhension du monde physique, peuvent utiliser l'outil quantique sans se poser de questions d'ordre philosophique, certains théoriciens cherchent à se faire une idée unifiée du monde physique tel qu'il se présente aujourd'hui, et nos connaissances actuelles éliminent certaines positions philosophiques devenues intenable, parfois rangées sous le vocable mécanicisme. Une riche littérature est disponible sur le sujet. En particulier les pères fondateurs de la mécanique quantique ont tous fait part des réflexions qui ont guidé leur travail, mais les certitudes récentes acquises sur des points controversés dans la première moitié du XX^e siècle ont permis d'asseoir la pensée sur des éléments beaucoup plus sûrs mais aussi très troublants. De nos jours, il apparaît que le réel est plus mystérieux qu'il semblait l'être autrefois où la physique reposait sur la notion de réalisme local qui exclut toute action à distance. Il s'agit donc de briser les moules de pensée de la physique traditionnelle pour mieux appréhender la complexité du réel.

L'objet quantique

	Caractéristique	Spatialité	Trajectoire
Corpuscule	discret	localisé	définie
Onde	continue	étalée	aucune
Objet quantique (quanton)	discret	étalé	indéterminée

Les objets quantiques ne sont ni des ondes ni des corpuscules, mais nous les percevons comme s'ils étaient l'un et l'autre.

Un exemple courant est fourni par la perception d'un cylindre. Selon la façon dont on le regarde, il peut apparaître comme un cercle ou un rectangle, et c'est en intégrant la troisième dimension qu'il apparaît vraiment comme un cylindre. Concernant les objets quantiques, nous ne disposons pas d'une dimension supplémentaire nous permettant d'en avoir une perception unifiée.

Certains physiciens contemporains recherchent une vision globale du monde matériel qui soit compatible avec les données indiscutables de la physique quantique, et les débats sont riches. Parmi eux, la figure de Bernard d'Espagnat (1921-2015) occupe une place originale,

car ce théoricien incontesté dans le domaine de la physique quantique, dispose d'une solide culture philosophique. Il appartient à la génération qui a immédiatement suivi celle des pionniers et qui a vu s'éclaircir certains points controversés, comme l'absence de variables cachées, mais aussi la découverte de propriétés surprenantes comme la non-séparabilité et l'action à distance. Il a, de ce fait, vécu à une époque charnière. Membre de l'Académie des sciences morales et politiques, il a fondé, sous le patronage de cette académie, le Collège de physique et philosophie qui, il y a peu, a organisé un séminaire qui témoigne des débats qui ont lieu parmi les principaux acteurs de la discipline (1). La démarche de Bernard d'Espagnat consiste en une recherche du réel, comme l'indique le titre d'un de ses ouvrages ou, comme il l'a écrit, de l'Être. Après une étude détaillée des divers réalismes qui fondent la version moderne de la physique classique et qui sont tous fondés sur l'expérience du monde tangible, d'une part, et des connaissances apportées par la physique macroscopique d'autre part, il constate que la mécanique quantique échappe au cadre qu'ils érigent. Ce fait, qui préoccupait tant nombre de grands physiciens au début du XX^e siècle, semble maintenant bien établi. L'auteur en vient ainsi à considérer un Réel qui déborde le cadre de la physique classique et dont il est impossible de tracer les limites. C'est ce qu'il nomme le « réel voilé ».

À l'instar de M. Merleau-Ponty qui distinguait le petit rationalisme, celui du XIX^e siècle, du grand rationalisme, celui du XVII^e siècle, d'Espagnat distingue le petit réalisme de la physique classique d'un grand réalisme qui couvre tout le champ de la physique moderne et dont les limites ne peuvent être précisées. Il se réfère donc non pas aux philosophes d'après les Lumières, mais à ceux du XVII^e siècle, en particulier à Descartes, Malebranche et Spinoza qui donnent au Réel des noms comme Être, Substance ou « Dieu ». Dans *À la recherche du réel*, il s'explique longuement sur l'usage qu'il fait de ce « vieux mot » de Dieu. Il écrit : « Le fait d'appeler « Dieu » la réalité indépendante marque avec une force accrue la différence entre celle-ci et toute réalité purement phénoménale » (2), et encore : « S'il existe une compréhension non intellectuelle elle est très certainement, elle aussi, liée aux vieux mots. Et en particulier - dans une certaine mesure au moins - à ce vieux mot de « Dieu », lentement forgé tout au long des centaines de millénaires de l'enfance de l'espèce humaine » (3). Mais dans ses écrits, il adopte une position assez ambiguë. Il n'explicite pas beaucoup plus ce qu'il met sous ce « vieux mot » qu'il utilise pour désigner l'Être ou la réalité en soi, et laisse le lecteur libre de son interprétation. Il semble que, pour d'Espagnat, ce mot désigne un concept surtout scientifique ou philosophique, idée archétype d'absolu et d'infini. Cependant, dans *Un atome de sagesse*, il fait référence au « Dieu d'Abraham d'Isaac et de Jacob », qui est pour lui un modèle au sens physique du terme modèle, comme le modèle planétaire de l'atome. Un modèle en physique constitue une représentation simplifiée de la réalité qui permet d'appréhender les caractéristiques principales d'un phénomène (4).

D'Espagnat refuse par ailleurs la pensée moderne qui récuse tout recours à une cause extérieure au phénomène en soi, et se dit d'accord avec Thomas d'Aquin quant à la notion de l'Être. Il écrit : « Je maintiens très fermement qu'au moins nos perceptions doivent, elles, avoir une (ou des) cause(s). » et il ajoute : « Je crois... à l'Être, cause suprême des « phénomènes » ... même si, contrairement à saint Thomas, je ne le conçois pas comme le créateur d'objets en soi, animés ou inanimés » (5). Ce ne sont que quelques citations, mais ses écrits ouvrent la porte à un infini de réflexions sur le monde qui nous entoure. Son regard sur le réel peut se résumer par cette remarque : « si la physique d'une part échoue à nous fournir une description complète de la réalité et d'autre part réussit cependant à nous donner sur elle certaines lueurs, pourquoi telles ou telles autres approches, comme la musique, la peinture, la poésie ou le sacré, ne nous en donneraient-elles pas aussi ? » (6)

Notes

(1) Bernard d'ESPAGNAT et Hervé ZWIRN (dir.), *Le monde quantique. Débats philosophiques de la physique quantique*, Éditions météorologiques, 2016, 1209 pages.

(2) B. d'ESPAGNAT, *À la recherche du réel, le regard d'un physicien*, Gauthier-Villars, 1979, Dunod, 2015, p. 116.

(3) *Ibidem*, p. 118.

(4) Dans le modèle planétaire de l'atome, on imagine un électron ponctuel tournant autour du noyau sur des orbites prédéfinies, qui permet d'expliquer l'existence des niveaux énergétiques discrets, mais nous savons que la réalité est tout autre et qu'il est impossible d'en saisir toutes les caractéristiques autrement que par le calcul théorique.

(5) B. d'ESPAGNAT, *Un atome de sagesse, propos d'un physicien sur le réel voilé*, Seuil, 1982, p. 151-152.

(6) B. d'ESPAGNAT, E. KLEIN, *Regards sur la matière. Des quanta et des choses*, Fayard, 1993, p. 259.

Bibliographie

Outre les ouvrages cités ci-dessus, de nombreux écrits se rapportent aux questions abordées dans ce texte. On peut retenir :

Banesh HOFFMAN, *L'étrange histoire des quanta*, Éditions du Seuil, 1967.

Bernard d'ESPAGNAT, *Penser la science ou les enjeux du savoir*, Dunod, 1990.

Étienne KLEIN, *Conversations avec le sphinx. Les paradoxes en physique*, Albin Michel, 1991.

Étienne KLEIN, *La physique quantique*, Flammarion, 1996.

Serge HAROCHE, *Physique quantique*, Fayard, 2004.