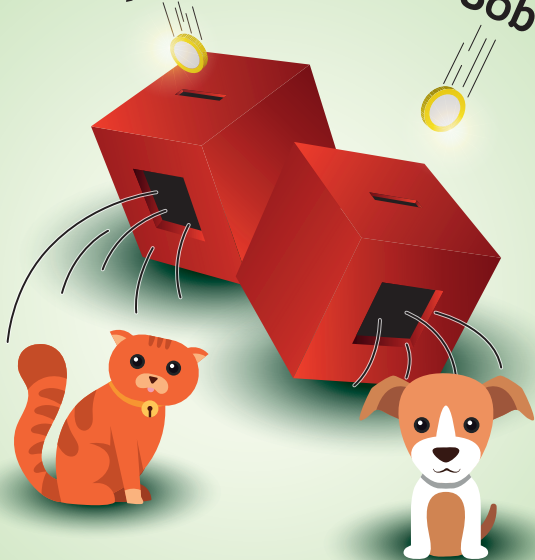


Alice

Bob



# INTRO UNE INTRODUCTION À TION DUCTION

## QUANTIQUE : AU-DELÀ DE L'ÉTRANGE

Philip Ball

*Traduction de Michel Le Bellac*

edp sciences

## QUANTIQUE : AU-DELÀ DE L'ÉTRANGE

La mécanique quantique a la réputation d'une théorie difficile d'accès et qui plus est « étrange » : « Personne ne comprend la mécanique quantique » écrivait en 1965 le prix Nobel de physique Richard Feynman.

Les travaux de John Bell, les expériences menées à la fin du siècle dernier et au début de ce siècle, ainsi que les développements de l'information et de l'ordinateur quantiques, ont permis de mieux cerner le caractère étrange du monde quantique. Nous avons compris que la mécanique quantique pourrait être davantage une théorie de l'information qu'une théorie traitant d'ondes et de particules microscopiques.

En évitant de tomber dans le piège d'analogies souvent trompeuses, Philip Ball expose les principes de base de la théorie quantique et en décrit les principales interprétations : Copenhague, multimondes, etc. Il montre ce que la théorie quantique nous révèle du fonctionnement intime de la nature. Nous sommes induits en erreur par notre expérience quotidienne et l'étrangeté réside dans notre compréhension, pas dans la nature elle-même.

Ce livre, accessible à un large public, séduira le lecteur désireux de comprendre en profondeur la science contemporaine et d'accéder à ses développements les plus récents. « Intense, profond et extrêmement bien documenté, ce livre est celui que l'on doit lire si l'on veut acquérir une vision contemporaine et globale du monde quantique tel que nous le connaissons aujourd'hui », écrit la revue de la Société de physique britannique *Physics World*, qui lui a décerné son prix du livre de vulgarisation scientifique parmi une quarantaine de titres parus au cours de l'année 2018.

*Philip Ball est journaliste scientifique. Il a longtemps été éditeur scientifique pour la physique de la revue Nature. Il a publié un grand nombre d'articles de vulgarisation scientifique et plusieurs livres, dont Serving the Reich, un vaste panorama de la physique en Allemagne de 1933 à 1945.*

*Michel Le Bellac est professeur émérite de physique à l'Université de Nice-Sophia Antipolis.*

Isbn : 978-2-7598-2338-3



Création graphique : Béatrice Couëdel

edp sciences  
www.edpsciences.org

La collection « **UNE INTRODUCTION À...** » se propose de faire connaître à un large public les avancées les plus récentes de la science. Les ouvrages sont rédigés sous une forme simple et pédagogique par les meilleurs experts français.

**Collection « Une Introduction à »  
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac**

# **Quantique : au-delà de l'étrange**

**Philip Ball  
Traduction de Michel Le Bellac**



EDP Sciences  
17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

## Dans la même collection

*Aux origines de la masse : particules élémentaires et symétrie fondamentales*

Jean Iliopoulos, préface de F. Englert

*Les relativités : espace, temps, gravitation*

Michel Le Bellac, préface de T. Damour

*Le temps : mesurable, réversible, insaisissable ?*

Mathias Fink, Michel Le Bellac et Michèle Leduc

*La révolution des exoplanètes*

James Lequeux, Thérèse Encrenaz et Fabienne Casoli

*À l'orée du cosmos*

Alain Omont

*Vertigineuses symétries*

Antony Zee, traduit par Michel Le Bellac

*Le temps des neurones – Les horloges du cerveau*

Dean Buonomano, traduit par Michel Le Bellac

*Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps*

Stéphane Collion

*Les planètes et la vie*

Thérèse Encrenaz, James Lequeux et Fabienne Casoli

*Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur <http://laboutique.edpsciences.fr>*

Authorized French translation from the English language edition entitled "Beyond Weird: Why Everything You Thought You Knew About Quantum Physics is Different" by Philip Ball, © Philip Ball 2018.

*Imprimé en France*

**ISBN (papier) : 978-2-7598-2338-3 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2411-3**

© 2019, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

# Avant-propos

## Une traduction exceptionnelle pour un ouvrage très actuel

*Quantique : au-delà de l'étrange* : voici encore un livre traitant de la mécanique quantique publié aujourd'hui par EDP Sciences. L'éditeur n'en est pourtant pas à son premier titre sur le sujet, stimulé par l'intérêt d'un public nombreux, toujours désireux d'entendre parler des phénomènes quantiques et de leurs interprétations. La théorie quantique a beau être née il y a un siècle, elle continue de susciter les passions des physiciens autant que des philosophes, et elle intrigue le grand public. Elle questionne le réel et se heurte à notre perception quotidienne du monde. N'ayant jamais été mise en défaut, elle est utilisée par les praticiens de la physique dans sa formulation dite de Copenhague, bien que celle-ci laisse de nombreuses questions ouvertes. Les interrogations sur ses fondements, qui avaient si fortement agité les grands de la physique au temps d'Einstein avant de quitter la scène pendant une longue période, ont repris de plus belle depuis quelques décennies.

### Les technologies quantiques sont à l'ordre du jour de la recherche mondiale

Une première raison est sans doute que les technologies quantiques sont en plein essor, avec en perspective le rêve de l'internet quantique totalement sécurisé et surtout de l'hypothétique ordinateur quantique, qui pourrait résoudre des problèmes inaccessibles aux ordinateurs classiques. Tous les grands pays, comme la Chine et les États-Unis, y consacrent depuis peu des moyens considérables. La communauté européenne vient d'en faire son troisième *flagship* à un milliard d'euros. Ce que certains nomment la « seconde révolution quantique » anime

le monde de la photonique, de la science des matériaux, aussi bien que l'informatique et les mathématiques. Le nombre des chercheurs en « quantique » croît constamment. Ils multiplient les équipements pour se diriger dans l'espace, pour mesurer toujours plus précisément le temps, les infimes mouvements du sol, les champs magnétiques. Leurs expériences, de plus en plus sophistiquées, finissent pourtant par tester les limites de la théorie quantique elle-même, ce qui produit un regain d'intérêt pour une plus grande compréhension des fondements de la théorie.

### La vision théorique de la mécanique quantique se renouvelle

Par ailleurs, une récente génération de théoriciens de la mécanique quantique s'est lancée dans des formulations qui permettent de s'interroger sur ce qui constitue l'essence même de la théorie, fondées sur de nouveaux types d'axiomes ou sur des concepts novateurs. Cette aventure passionnante mais souvent déconcertante est l'objet de la seconde partie de ce livre, qui se situe au plus près des recherches les plus contemporaines. Toujours précises mais jamais pédantes, les explications fournies intriguent, amusent ou bien irritent le lecteur, en fonction de ses convictions personnelles. L'auteur lui-même ne manque d'ailleurs pas de nous laisser entrevoir ce qu'il trouve intéressant, ou simplement « clinquant », dans la foule des interprétations qu'il présente, en les bousculant parfois, mais avec une parfaite honnêteté et une pédagogie subtilement progressive. Parmi la profusion des ouvrages sur les interprétations de la mécanique quantique, « Quantique : au-delà de l'étrange » s'en distingue par son objectif de dresser un vaste panorama des interprétations les plus actuelles, tout en faisant la chasse aux idées fausses ou simplistes. Il aide le lecteur dans l'ascension des pentes glissantes de la compréhension et le conduit jusqu'au point où cette compréhension s'arrête, le laissant sur l'espoir que ce n'est pas là le mot de la fin.

### Le traducteur

Cet ouvrage exceptionnel méritait certainement d'être accessible dans une traduction fidèle pour le public français. La présente édition a eu la très grande chance de bénéficier pour la traduction du concours de Michel Le Bellac, dont les compétences étaient particulièrement adaptées à cette tâche ardue. Michel Le Bellac est lui-même professeur de physique théorique spécialiste des particules élémentaires, il a fait une partie de sa carrière au CERN et a enseigné à tous les niveaux dans les universités de Nice et de Marseille. Il est auteur d'un très grand nombre d'ouvrages de science, dont cinq chez EDP Sciences, tous traduits en anglais chez Oxford University Press. « Physique Quantique », trois fois réédité,

lui a valu le prix Claude Berthault de l'Académie des sciences en 2007. Plusieurs autres ouvrages de réputation mondiale ont bénéficié de la traduction de Michel Le Bellac, tels *Fearful Symmetries* (Vertigineuses symétries) de Anthony Zee. Sa présente traduction de *Beyond Weird* de Phillip Ball, sous le titre particulièrement bien trouvé de *Quantique : au-delà de l'étrange*, est non seulement parfaitement fidèle à l'ouvrage original, mais de plus fourmille de notes du traducteur (NdT) en bas de page, extrêmement précieuses : soit elles complètent une explication ardue, soit elles fournissent des éléments de démonstration pour les plus avertis des lecteurs.

Michèle Leduc

Directrice de recherche émérite au Laboratoire Kastler-Brossel à l'ENS  
Responsable du rayonnement du réseau francilien SIRTEQ

#### Ouvrages publiés par Michel Le Bellac chez EDP-Sciences

##### Comme auteur

- Physique quantique, Tome I (fondements), 534 pages, nouvelle édition 2013
- Physique quantique, Tome II (applications et exercices corrigés), 564 pages, 2013
- Le monde quantique, 2010, 232 pages
- Les relativités : espace, temps, gravitation, 230 pages, 2015
- Le temps, mesurable, réversible, insaisissable, 180 pages, 2016

##### Comme traducteur

- Vertigineuses symétries, la recherche de la beauté en physique contemporaine, 388 pages, 2018
- Le temps des neurones, les horloges du cerveau, 280 pages, 2018
- Quantique, au-delà de l'étrange, 290 pages, 2019





## En guise d'introduction...

Faire la rencontre de la physique quantique revient à se mettre dans la peau d'un voyageur dans le temps arrivant depuis l'Empire romain et qui voit une auto pour la première fois. Il se dit que cela sert manifestement à quelque chose, et que c'est sans doute très utile, mais cela sert à quoi exactement ?

John Archiblad Wheeler

Quelque part dans [la théorie quantique] la distinction entre la réalité et notre connaissance de la réalité a été occultée, et le résultat ressemble plus à de la nécromancie moyenâgeuse qu'à de la science.

Edwin Jaynes

Nous ne devons jamais oublier que « réalité » est un mot du langage humain, tout comme « onde » ou « conscience ». Notre tâche est d'apprendre à utiliser correctement ces mots – c'est-à-dire de façon non ambiguë et cohérente.

Niels Bohr

[La mécanique quantique] est un cocktail particulier décrivant en partie des réalités de la nature et en partie une information humaine incomplète sur celle-ci – tout cela concocté par Heisenberg et Bohr avec comme résultat un breuvage dont personne n'a réussi à identifier la composition.

Edwin Jaynes

On peut argumenter que la leçon la plus importante de la mécanique quantique est qu'il nous faut revisiter nos hypothèses les plus basiques sur la nature.

Yakir Aharonov

J'espère que vous allez accepter que la nature est telle qu'elle est : absurde.

Richard Feynman



# Table des matières

Avant-propos	iii
1 Quelle signification ?	1
2 Quanta	15
3 Ondes et particules	25
4 Dans deux états à la fois	45
5 La mesure quantique	61
6 Interprétations	81
7 La logique quantique	99
8 Incertitudes quantiques	111
9 Intrication	121
10 Une action à distance ?	137
11 Physique quantique à taille humaine	151
12 Darwinisme quantique	167
13 Chatons de Schrödinger	181
14 L'ordinateur quantique	191
15 Le parallélisme quantique	209
16 Interprétation multimonde	215
17 Au-delà du quantique ?	229
18 De nouveaux axiomes ?	239
19 Conclusion	251
Remerciements	263
Bibliographie	265
Index	275



# 1

## Quelle signification ?

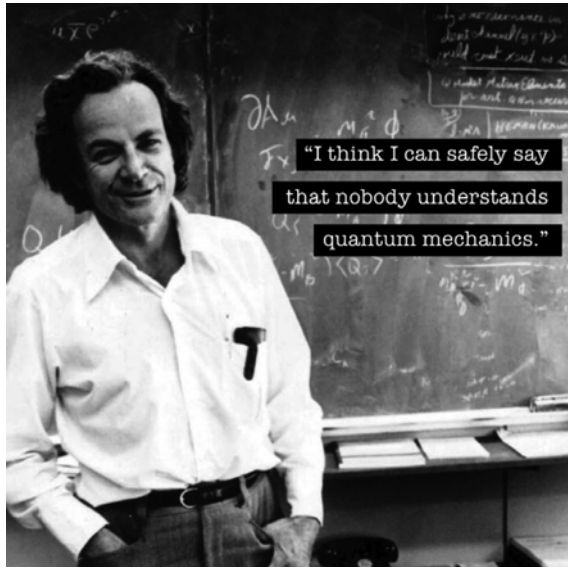
PERSONNE NE SAIT CE QUE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE VEUT DIRE...ET C'EST LE SUJET DE CE LIVRE.

« Je pense que l'on peut affirmer sans prendre de risque que personne ne comprend la mécanique quantique ». Cette citation fameuse de Richard Feynman date de 1965, l'année même où le prix Nobel de physique lui fut attribué pour ses travaux sur la mécanique quantique.

Au cas où il n'aurait pas été compris, Feynman enfonça le clou dans son style typique de monsieur-tout-le-monde : « quand je suis né, je ne comprenais pas la mécanique quantique » s'exclama-t-il en riant, « [et] je ne la comprends toujours pas ! » Voilà donc un homme que l'on venait de consacrer comme l'un des meilleurs experts du sujet et qui déclarait qu'il n'y comprenait rien. Quel espoir restait-il au commun des mortels ?

Cette citation bien connue a contribué à sceller la réputation de la mécanique quantique comme l'un des sujets scientifiques les plus obscurs et les plus difficiles. La mécanique quantique est devenue le symbole de la « science impénétrable », de même que le nom d'Albert Einstein (qui joua un rôle important dans sa création) est devenu le symbole de génie scientifique.

À l'évidence, Feynman ne voulait pas dire qu'il n'était pas capable de *pratiquer* la mécanique quantique. Il voulait dire qu'il était uniquement capable de faire cela. Il pouvait sans aucun doute naviguer sans problème à travers ses mathématiques – après tout il en avait inventé une partie. Bien sûr, il n'est pas question de prétendre que ces maths sont faciles, et si vous êtes allergique aux



**FIGURE 1.1.** Richard Feynman : « Je pense que l'on peut affirmer sans prendre de risque que personne ne comprend la mécanique quantique ».

nombre, alors vous n'avez aucune chance de faire carrière en mécanique quantique. Mais ce serait aussi le cas pour une carrière en mécanique des fluides, en dynamique des populations ou en économie, qui sont tout aussi hermétiques à celles et ceux qui sont brouillés avec les chiffres.

Non, ce n'est pas en raison des équations que la mécanique quantique est perçue comme si ardue. Ce sont les idées qui font problème. Nous ne pouvons juste pas les comprendre. Et c'était aussi le cas pour Richard Feynman.

Feynman admettait qu'il avait échoué à comprendre ce que les maths voulaient dire. Ces maths fournissaient des nombres : des prédictions de quantités physiques qui pouvaient être confrontées à l'expérience, et qui passaient invariablement tous les tests expérimentaux haut la main. Mais Feynman ne pouvait pas comprendre ce que ces nombres et ces équations voulaient réellement dire : ce qu'ils disaient du « monde réel ».

Il est possible de soutenir que ces équations ne nous disent absolument rien du « monde réel ». Elles représentent juste une construction fantastiquement utile, une sorte de boîte noire que nous pouvons utiliser avec une totale confiance dans notre pratique de la science et de l'ingénierie. Une autre conception est que la notion de « monde réel » au-delà des maths n'a aucun sens, et c'est une perte de temps que d'y penser. Ou peut-être n'avons-nous pas encore trouvé les maths adéquates pour poser les bonnes questions sur le monde qu'elles sont

censées décrire. Ou bien encore, ainsi que le disent certains, les maths nous prédisent que « tout ce qui pourrait arriver finit par arriver » – à condition que cette phrase veuille dire quelque chose.

L'objectif de ce livre est d'examiner ce que les maths quantiques veulent réellement dire. C'est une chance que nous puissions explorer la question sans nous retrouver en immersion profonde dans les maths elles-mêmes. Vous pouvez même sauter allègrement le peu de ces maths que j'ai inclus dans le texte.

Mais je ne vais pas prétendre que ce livre vous donnera une réponse. Le fait est que nous n'en avons pas. Certaines personnes affirment qu'elles en ont une, mais seulement dans le sens où l'on peut trouver des réponses dans la Bible : leur vérité repose sur la foi, pas sur une preuve. Cependant, nous pouvons aujourd'hui poser des questions plus affûtées qu'à l'époque où Feynman admettait son ignorance, et c'est là un progrès décisif.

Ce que nous *pouvons* dire, c'est que le narratif de la mécanique quantique – du moins pour ceux qui ont réfléchi le plus en profondeur sur sa signification – a été modifié de façon remarquable depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle. La théorie quantique a révolutionné notre conception des atomes, des molécules, de la lumière et de leurs interactions, mais cette transformation ne s'est pas effectuée de manière brutale et, en un certain sens, elle est toujours en cours aujourd'hui. Cette transformation a débuté dans les toutes premières années du XX<sup>e</sup> siècle, et elle s'est traduite par un ensemble d'équations et de concepts exploitables vers la fin des années 1920. Mais c'est seulement depuis les années 1960 que nous avons commencé à entrevoir ce qui est le plus important et fondamental dans la théorie ; certaines des expériences cruciales n'ont pu être effectuées que depuis le début des années 1980 et, pour plusieurs d'entre elles, seulement au XXI<sup>e</sup> siècle. Même aujourd'hui nous nous efforçons encore d'appréhender les idées de base et de tester leurs limites. Si ce que nous voulons vraiment est une théorie qui soit bien comprise et pas simplement une théorie qui fasse son travail de calculer correctement des nombres, alors nous ne pouvons pas encore affirmer que nous disposons d'une véritable théorie quantique.

Ce livre a pour objectif de donner une idée des meilleures conjectures de ce à quoi la théorie quantique pourrait ressembler, si elle existait. Il est probable qu'une telle théorie déstabiliserait la plus grande part, voire la totalité, de ce que nous estimons comme acquis sur l'étoffe du monde, lequel semble être un endroit bien plus étrange et bien plus complexe que ce que nous avons pu envisager jusqu'ici. Ce n'est pas tant parce que ce serait un endroit où s'appliqueraient des règles physiques différentes qu'un endroit où nous serions obligés de réviser nos idées sur ce que signifie le monde physique et sur ce que nous pensons être en train de faire lorsque nous nous efforçons de l'appréhender.

En passant en revue ces nouvelles perspectives, je voudrais insister sur deux idées qui ont émergé de cette révolution<sup>1</sup> dont nous sommes les témoins – le mot révolution est pleinement justifié – dans les investigations sur les fondements de la mécanique quantique.

En premier lieu, ce que l'on appelle trop fréquemment la *bizarrierie* de la mécanique quantique n'est pas une véritable étrangeté du monde quantique, mais plutôt une conséquence de nos contorsions (compréhensibles) pour trouver des images nous permettant de visualiser ce monde ou les histoires que nous racontons sur lui. La physique quantique défie l'intuition, mais nous lui faisons un mauvais procès en la qualifiant d'« étrange » ou de « bizarre ».

Ensuite – et c'est encore plus ennuyeux – ce lieu commun de l'« étrangeté quantique », qui s'affiche de façon si nonchalante dans les exposés de vulgarisation et même les exposés techniques de la théorie quantique, obscurcit en fait plus qu'il n'éclaire ce qui est vraiment révolutionnaire dans cette théorie.

D'une certaine façon, la mécanique quantique n'est pas si difficile. Elle est déconcertante et surprenante, et aujourd'hui vous pourriez dire qu'elle reste impénétrable sur le plan cognitif. Mais cela ne veut pas dire qu'elle est *difficile*, dans le sens où réparer une voiture ou apprendre le chinois est difficile (j'ai une expérience douloureuse des deux). Nombre de scientifiques trouvent la théorie plutôt facile à accepter, à maîtriser et à utiliser.

Au lieu d'insister sur ses difficultés, nous ferions mieux de la considérer comme séduisante, affolante, et même comme un défi amusant lancé à notre imagination.

Parce que c'est *elle* qui doit réellement relever le défi. Je soupçonne que, dans un contexte culturel plus large, nous sommes finalement en train d'en prendre conscience. Des artistes, des écrivains et des auteurs dramatiques ont commencé à s'imbiber et à déployer des idées empruntées à la physique quantique : voyez par exemple la pièce de théâtre de Tom Stoppard, *Hagwood*, ou celle de Michael Frayn, *Copenhagen*, et des romans comme celui de Jeanette Winterson *Gut Symmetries* ou celui d'Audrey Niffenegger, *The Time Traveler's Wife*<sup>2</sup>. On peut argumenter sur l'exactitude ou la pertinence avec lesquelles ces auteurs s'approprient les idées scientifiques, mais on doit se réjouir qu'il y ait des réponses imaginatives à la mécanique quantique, parce qu'il est tout à fait possible que seule une imagination suffisamment fertile et libérée soit capable d'approcher ce que nous dit cette théorie.

---

<sup>1</sup> NdT. Certains auteurs parlent de « seconde révolution quantique », la première ayant eu lieu au milieu des années 1920.

<sup>2</sup> NdT. Gut = *Grand Unified Theory*, théorie de grande unification ; *Gut Symmetries* : Symétries de la grande unification. *The Time Traveler's Wife* : La femme du voyageur dans le temps.



Il n'y a aucun doute que le monde décrit par la mécanique quantique défie notre intuition. Mais « étrange » n'est pas un mot particulièrement utile pour en parler, parce que ce monde est aussi notre monde. Nous avons aujourd'hui une description assez bonne, quoiqu'encore incomplète, de la façon dont le monde qui nous est familier, un monde d'objets qui possèdent des propriétés et des positions bien définies et qui ne dépendent pas de la manière de les mesurer, émergent à partir du monde quantique. Ce monde « classique » est, en d'autres termes, un cas particulier dans la théorie quantique, et pas quelque chose de différent. Si quelque chose mérite le qualificatif d'étrange, c'est bien nous.

J'énumère ci-dessous quelques-unes des raisons les plus courantes invoquées pour justifier le caractère étrange de la mécanique quantique. La théorie est supposée contenir des énoncés tels que :

- Les objets quantiques peuvent être à la fois ondes et particules. C'est ce que l'on appelle la *dualité onde-particule*.
- Les objets quantiques peuvent se trouver simultanément dans plusieurs états différents : disons par exemple qu'ils peuvent être simultanément *ici* et *là*. C'est ce que l'on appelle la propriété, ou principe, de *superposition* (des états quantiques).
- Il est impossible en général de connaître exactement deux propriétés différentes d'un objet quantique, par exemple sa position et sa vitesse. C'est le *principe d'incertitude de Heisenberg*.
- Deux objets quantiques peuvent s'influencer mutuellement même s'ils sont situés à très grande distance l'un de l'autre : c'est ce que l'on appelle « l'action fantasmagorique<sup>3</sup> à distance ». Cette propriété est une conséquence du phénomène typiquement quantique appelé *intrication*.
- Vous ne pouvez pas mesurer quelque chose sans le perturber, de sorte que l'observateur humain ne peut pas être exclu de la théorie, qui devient inévitablement subjective.
- Tout ce qui pourrait arriver finit par arriver. On peut donner deux arguments en faveur de cette affirmation. L'un d'entre eux est enraciné dans la théorie (non controversée) appelée électrodynamique quantique, formulée par Feynman et d'autres<sup>4</sup>. L'autre vient de l'interprétation (très controversée) de la mécanique quantique connue sous le nom d'« interprétation multi-mondes ».

Et pourtant la mécanique quantique ne dit rien de tel. De fait, la mécanique quantique ne nous dit *rien* sur « comment sont les choses ». Elle nous dit ce à quoi nous devons nous attendre quand nous effectuons telle ou telle expérience.

---

<sup>3</sup> NdT. En anglais *spooky action at a distance*, selon la formule originale d'Albert Einstein.

<sup>4</sup> NdT. Schwinger, Dyson et Tomonaga.

Toutes les affirmations ci-dessus ne sont que des *interprétations* superposées à la théorie. Par la suite, je me demanderai jusqu'à quel point ce sont des interprétations valables (et j'essaierai de donner au moins un parfum de ce que « interprétation » pourrait bien vouloir dire) – mais je vous préviens d'emblée qu'aucune des affirmations ci-dessus n'est une très bonne interprétation, et que certaines sont même de véritables fausses pistes.

La question est : pouvons-nous faire mieux ? Indépendamment de la réponse, il est clair qu'on nous impose un régime trop strict et trop rassis. Le catalogue conventionnel des images, des métaphores et des « explications » n'est pas seulement un cliché, mais il risque de masquer à quel point la mécanique quantique va à l'encontre de nos attentes.

C'est tout à fait compréhensible qu'il en soit ainsi. Nous pouvons difficilement parler de la théorie quantique à moins de trouver des histoires à raconter sur celle-ci : des métaphores qui offrent à l'esprit des ouvertures, mais sur un sol glissant. Malheureusement, on prend bien trop fréquemment ces histoires et ces métaphores pour ce que les choses sont réellement. La raison pour laquelle nous pouvons les expliciter est qu'elles sont exprimées dans les termes du quotidien : on fait rentrer les règles quantiques dans le moule des concepts familiers de notre monde de tous les jours. Mais c'est précisément dans ce moule qu'elles ne semblent pas vouloir rentrer.

Il est tout à fait singulier qu'une théorie physique ait besoin d'une interprétation. D'habitude, en sciences, une théorie et son interprétation vont de pair et naviguent de concert de manière relativement transparente. Il est certain qu'une théorie peut avoir des *implications* qui ne sont pas évidentes et qui méritent d'être explicitées, mais sa *signification* de base est immédiatement apparente.

Prenons comme exemple la théorie de l'évolution par sélection naturelle due à Charles Darwin. Les objets auxquels elle se réfère – les organismes et les espèces – sont relativement non ambigus (bien que ce soit parfois un défi de les rendre vraiment précis), et ce que la théorie dit de la façon dont ils évoluent est clair. Cette évolution dépend de deux ingrédients : des mutations aléatoires de traits transmises à la descendance, et une compétition pour des ressources limitées qui donne un avantage reproductif aux individus présentant certaines variantes d'un trait particulier. Comment cette idée se concrétise en pratique – comment elle se traduit au niveau génétique, comment elle est affectée par les différentes tailles des populations ou les différents taux de mutation, etc. –, est réellement complexe dans le détail, et même aujourd'hui tout n'est pas véritablement compris. Mais nous n'avons pas à batailler pour comprendre ce que la théorie *veut dire*. Nous en écrivons les ingrédients et les implications dans le vocabulaire de tous les jours, et nous n'avons besoin de rien ajouter.

Feynman semblait pencher vers l'idée qu'il était impossible, et même sans objet, d'essayer d'arriver à quelque chose de comparable pour la mécanique quantique :

Nous ne pouvons pas prétendre la comprendre, étant donné qu'elle heurte de front notre sens commun. Le mieux que nous puissions faire est de décrire ce qui se passe dans ses mathématiques et dans ses équations, et ça c'est déjà difficile. Mais ce qui est encore plus difficile est de décider ce que signifient les équations. Cela, c'est véritablement le plus difficile.

La plupart des utilisateurs ne se préoccupent pas de ces énigmes. Suivant les mots du physicien David Mermin, de l'Université de Cornell, « ils se taisent et ils calculent », ou suivant une traduction plus fidèle, « ils la bouclent et ils calculent<sup>5</sup> ». Pendant des décennies, on a considéré que la mécanique quantique était avant tout une description mathématique d'une exceptionnelle exactitude et d'une exceptionnelle fiabilité, capable d'expliquer la forme et le comportement des molécules, le fonctionnement des transistors de nos smartphones, les couleurs de la nature et les lois de l'optique, le fonctionnement du Soleil et des étoiles, et bien d'autres choses encore. Un raccourci commode – mais inexact – serait de la considérer comme « la théorie du monde microscopique » : un compte rendu de ce à quoi le monde ressemble aux échelles les plus petites auxquelles nous pouvons accéder avec nos microscopes et nos accélérateurs les plus puissants.

Parler de l'interprétation de la mécanique quantique était, au contraire, un jeu de société convenable uniquement pour de grands esprits au crépuscule de leur carrière, ou pour des discussions de comptoir autour d'une bière. Ou pire : il y a seulement quelques décennies, manifester un intérêt sérieux pour ce sujet pouvait être équivalent à un suicide professionnel pour un jeune physicien. Seule une poignée de scientifiques et de philosophes, de façon idiosyncratique, sinon excentrique, insistait pour se préoccuper du sujet. Nombre de chercheurs haussaient les épaules ou écarquillaient les yeux quand on évoquait la « signification » de la mécanique quantique, et un certain nombre le font encore. « Oh là là, personne ne la comprend de toute façon ! »

Comme cela tranche avec l'attitude d'Albert Einstein, Niels Bohr et leurs contemporains, pour lesquels se confronter à la bizarrerie apparente de la théorie était quasiment devenu une obsession. Pour eux, la signification avait une

---

<sup>5</sup> *Shut up and calculate*. Cette citation est généralement attribuée à Feynman. C'est une idée tellement répandue qu'à un certain point Mermin lui-même commença à craindre que sa boutade n'ait simplement fait écho à la voix de Feynman. Mais, ainsi que nous le verrons, Feynman n'a pas été le seul physicien prodigue en aphorismes quantiques.

grande importance. En 1998, le physicien américain John Wheeler, un des pionniers de la théorie quantique moderne, se lamentait de la perte de cette « perplexité désespérée » qui était dans l'air au cours des années 1930. « J'aimerais retrouver ce sentiment une fois pour toutes, même si cela doit être ma dernière action sur la Terre », disait Wheeler.

Il est vraisemblable que Wheeler a exercé une influence considérable<sup>6</sup> en permettant à cette tendance déviationniste de devenir à nouveau honorable, et même à la mode. La discussion des options, des interprétations et des significations n'a plus à être confinée à une préférence personnelle ou à une philosophie abstraite, et si nous ne pouvons pas énoncer ce que la mécanique quantique veut dire, nous pouvons au moins énoncer plus clairement et plus précisément ce qu'elle ne veut pas dire.

Cette résurrection de la « signification quantique » est due en partie au fait que nous pouvons aujourd'hui effectuer des expériences qui nous permettent de sonder des sujets de caractère fondamental, alors que ces sujets relevaient autrefois d'expériences de pensée et étaient considérés comme flirtant dangereusement avec la métaphysique : un mode de raisonnement que, pour le meilleur ou pour le pire, beaucoup de scientifiques dédaignent. Nous pouvons aujourd'hui mettre à l'épreuve de l'expérience des paradoxes et des énigmes quantiques – y compris le plus célèbre de tous, le chat de Schrödinger.

Ces expériences sont parmi les plus ingénieuses jamais conçues. Elle peuvent souvent être effectuées sur une simple table avec un équipement relativement bon marché – des lasers, des lentilles, des miroirs – et cependant elles représentent des exploits extraordinaires qui rivalisent avec ceux réalisés par la « Big Science », auprès de très grands instruments comme les accélérateurs de particules ou les grands télescopes. Ces expériences impliquent la capture et la manipulation d'atomes, d'électrons, d'impulsions lumineuses, parfois sous forme individuelle, en les soumettant aux tests les plus précis. Certaines de ces expériences sont effectuées dans l'espace afin d'éviter les complications induites par la gravitation. D'autres sont effectuées à des températures plus basses que celles de l'espace interstellaire. Elle peuvent créer de nouvelles formes de matière. Elle rendent possible une sorte de « téléportation » ; elle mettent au défi les idées de Heisenberg sur le « principe d'incertitude » ; elles suggèrent que la causalité peut aller dans les deux sens du temps ou être entièrement brouillée. Elles commencent à lever le voile et à nous montrer ce qui, pour autant qu'il y ait

---

<sup>6</sup> NdT. Dans les années 1960, Wheeler a aussi exercé une influence considérable dans la renaissance de la relativité générale, quelque peu endormie depuis les années 1930. Il a inspiré la physique qui a conduit à la découverte des ondes gravitationnelles en 2016.

200, 202–206, 208, 210, 211, 229, 230, 234, 237, 243, 244, 247, 248, 263

## L

lame séparatrice 72, 73  
lame semi-transparente 73  
laser 8, 18, 22, 63, 89, 106, 137, 138, 140, 183, 184, 202  
localité 141–146, 149, 163, 210, 229–231, 234, 236, 237, 247, 251  
longueur d'onde 18, 19, 53, 54, 118, 148

## M

macroréalisme 187, 188  
mécanique  
  bohémienne 86, 244  
  des matrices 116, 117, 118, 200  
  newtonienne 188, 240  
mesure quantique 65, 218  
microseconde 42, 173  
modèle GRW 30, 34, 35, 64, 87–89, 97, 144, 149, 193, 243, 247, 250  
moment angulaire 101, 105

## N

nanomécanique 183, 184  
nanomètre (nm) 34  
nanoseconde (ns) 43, 142, 221, 222  
neutrino 106  
neutron 41, 42, 56, 58, 62, 63, 100, 104, 119  
niveau d'énergie 30, 31, 101  
nombre quantique 101–103  
non-localité 86  
noyau atomique 32, 34, 36, 41, 42, 154

## O

ontologique 40, 249, 250  
ordinateur quantique 191, 192, 194, 196–199, 201, 204, 209, 210–214, 247, 251

## P

physique classique 12, 17, 19–22, 31, 37, 75, 88, 105, 114, 122, 149, 152, 158, 175, 185, 186, 187, 240  
photon 19, 20, 25, 26, 30, 31, 35, 43, 48–50, 54–60, 62, 66–76, 90, 93, 106, 118, 119, 126–133, 137–144, 158–163, 171–174, 181, 186, 189, 190, 195, 202, 203, 205, 206, 208, 212, 218, 229, 234, 268, 270, 273, 275  
piège à ions  
polarisation 48, 49, 50, 56–58, 66, 126–129, 131, 133, 138–142, 158, 159, 195, 202, 203, 205, 206, 234  
principe  
  d'incertitude 5, 8, 9, 41, 76, 111–119, 185, 243, 245  
  de superposition 48, 184, 191  
  d'exclusion de Pauli 46  
prisme polarisant 49, 50, 56, 57, 131, 139, 202  
probabilités 28, 42, 85, 86, 111, 118, 124, 142, 156, 225, 229, 244, 249  
  bayésiennes 94  
  d'ignorance 85, 124, 142  
  intrinsèques 85, 149  
problème de la mesure 23, 65, 78, 217  
proton 41, 42, 62, 100, 104, 106, 257

## Q

quantification des niveaux d'énergie  
21, 22, 36  
Qbisme 94–96, 260  
qubit 184, 185, 195–201, 204–206,  
209–213

## R

rayon de Bohr 35  
rayonnement du corps noir 19, 161  
réduction de la fonction d'onde 78–81,  
84, 88–90, 92, 93, 115, 155, 158, 161,  
163, 179, 197, 216–219  
règle de Born 28, 29, 50, 140  
relativité  
générale 8, 11, 16, 18, 28, 29, 45, 48, 60,  
93, 115, 119, 121, 123, 144, 145, 183,  
188, 216  
restreinte 11, 16, 19, 21, 85, 106, 127,  
134, 139, 140, 155, 167, 202, 203,  
230, 233, 235, 236, 241, 244–246,  
261

## S

simulateur quantique  
spin 56, 100, 101, 103–110, 113, 116, 117,  
119, 124–126, 128, 131–134, 141, 142,

146, 148, 167, 174, 184, 195, 200, 202,  
219, 223, 225, 227, 237, 243, 271

SQUID 163

superfluidité 189

superposition 5, 23, 47–51, 58, 66, 77,  
78, 87–89, 91–95, 141, 142, 145, 154,  
156–163, 165, 167–169, 172–174,  
177, 178, 181–191, 195–197, 199, 204,  
209–212, 217–220, 223, 225, 229, 230,  
243, 244, 247, 260, 268, 270, 272–274

supraconductivité 188

supersymétrie 107

## T

tardigrade 183

téléportation quantique 152, 153

température absolue

théorème

de non-clonage 202, 206, 207, 246

spin-statistique 106

transition quantique/classique 152, 153

## U

unitarité 89

## V

variable cachée 125