

Avant-propos

La mécanique quantique m'a toujours fasciné. Dans ma jeunesse, parmi les rudiments appris au lycée, le principe d'incertitude de Heisenberg représentait pour moi le sujet emblématique de la philosophie et de la métaphysique, à travers une question centrale : « À quoi ressemble le réel indépendamment de ce que nous en percevons ? » Cette question m'aura taraulé l'esprit pendant une trentaine d'années jusqu'à ce que je tombe sur le remarquable ouvrage de Nicolas Gisin, *L'impensable hasard* (2012).

Avant cela, j'avais en tête l'image confuse d'une indétermination quantique, qui en fait se satisfaisait à tort du modèle classique de l'incertitude, c'est-à-dire de ce que l'on ne sait pas mais qui existe de manière incontestable et parfaitement déterministe. Au fil de mes différentes lectures et réflexions, je me suis ensuite demandé pourquoi l'incertitude se produirait uniquement dans le monde microscopique ? Pourquoi il y aurait soit une onde soit un corpuscule ? C'est quoi cette onde ? Pourquoi la quantification ? En cherchant les réponses, je me suis heurté à la complexité de la mécanique quantique. Les références ordinaires sont soit trop théoriques et nécessitent un socle très large de connaissances très pointues en mathématique et en physique pour les comprendre, soit, à l'opposé, trop vulgarisées pour obtenir des réponses pertinentes.

Puis bien plus tard – c'était juste avant la pandémie – en rejoignant les stations de ski au début des vacances d'hiver, je rencontre par hasard dans le TGV mon ami et témoin de mariage, avec sa famille. Je ne l'avais pas vu depuis assez longtemps. Il était lui aussi en direction des vacances de neige. Nous décidâmes alors tous d'aller échanger de nos nouvelles à la voiture bar. Au bout d'une heure, la discussion s'engagea inopinément sur le thème philosophique du hasard. Avec enthousiasme, je fis alors part de ma lecture de l'ouvrage de Nicolas Gisin, dans l'idée d'essayer d'expliquer à mes interlocuteurs – plutôt littéraires que scientifiques – ce que j'avais compris du jeu de « Bell » et du hasard fondamental. Mais le train arrivant à ma destination, je dus abandonner mes amis qui descendaient plus loin. Je fus délivré par la même

occasion d'avoir à poursuivre mes explications brouillonnes ! C'est alors que j'ai eu l'idée d'écrire un petit billet de 3 ou 4 pages pour mettre au clair mes idées. Je commençai donc à exposer à ma manière la règle du jeu de Bell. Mais comprendre comment obtenir le score du jeu, m'emmena de jour en jour à devoir déchiffrer puis à expliquer l'ensemble des phénomènes quantiques. J'arrivais quand même à relever le défi : contourner les mathématiques et les concepts physiques très pointus utilisés dans l'enseignement traditionnel de cette discipline. Comment ? Sans suivre l'ordre chronologique des découvertes du cursus, qui est assez rébarbatif ! Je dus cependant déterrer mon petit bagage d'algèbre matricielle, de probabilités et d'analyse spectrale – acquis pendant mes jeunes années et honorant, au passage, de toute mon estime l'instruction scolaire qui m'a été offerte par notre éducation nationale – pour vérifier la robustesse de mes raisonnements. L'idée de mon petit billet se transforma donc plus de deux années après en cet ouvrage de plus de 150 pages, avec l'envie de partager le cheminement original de mes investigations. Mon but : essayer de rendre abordables ces connaissances – révolutionnaires tant sur le plan scientifique que philosophique – à un public de non-spécialistes, le plus large possible.

Mes remerciements vont à : Nicolas Gisin ; Alain Aspect ; Alain Connes ; Jacques Henno ; Jacques Verdier ; François et Martine Carre ; Sylviane, Christophe et Marie-Laure Verdier ; Nicolas Verdier et Henrietta Rothman ; Thomas Cabaret.

Et à : Bruno Vacaro ; Alexandra Barral ; Encyclopædia Universalis ; Éditions Flammarion ; Société mathématique de France.

Introduction

« Une fois que le nouveau système de concepts est rendu clair, alors on dispose également d'une nouvelle intuition. »¹

« Seule la théorie décide de ce que l'on peut observer. »²

Nos lointains ancêtres, avec leur sens commun et leur intuition, extrapolaient la platitude de l'horizon – des mers qu'ils parcouraient ou des plaines qu'ils cultivaient – à notre planète tout entière. Aujourd'hui nous avons l'évidence qu'ils se trompaient. Mais lorsque nous imaginons le monde microscopique, n'avons-nous pas tendance à répéter ce type d'erreur ? Ne pensons-nous pas qu'il a la même forme, les mêmes lois et les mêmes propriétés physiques, juste à une plus petite échelle que celle de notre environnement habituel ? Certes, nous savons qu'il y a des atomes et des particules indivisibles minuscules mais nous continuons à nous représenter ceux-ci localement, dans la même réalité et avec les mêmes schémas de pensée que ceux dictés par notre intuition et par notre perception ordinaire. Or l'histoire, de Galilée à Einstein, nous a montré que les extrapolations sont très souvent fausses. Elles doivent toujours être confrontées rigoureusement avec l'observation et la théorie.

Il y a des observations qui n'ont *a priori* rien à voir avec le sujet, mais dont leur compréhension s'avère fondamentale. Par exemple, bien malin eut été celui qui aurait deviné que, à partir de l'analyse des radiations émises par un morceau de charbon

1. « Lettre de Wolfgang Pauli à Niels Bohr du 12 décembre 1924 », dans la *Revue d'histoire des sciences*, 38, 3(4), 1985. Dans *Bohr et la complémentarité*, article de Catherine Chevalley, « Complémentarité et langage dans l'interprétation de Copenhague », PUF, Paris, p. 272. Voir : https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1985_num_38_3_4007.

2. Albert Einstein dans Heisenberg, W. (2010). *La partie et le tout*. Flammarion, Paris, p. 118. Voir : <https://www.cairn.info/revue-connexions-2014-2-page-121.htm>.

chauffé, la découverte de la quantification allait permettre de révéler la structure extrêmement fine et totalement inattendue du monde microscopique. Quelques décennies plus tard, après l'élaboration de l'élégante théorie quantique, cette révélation allait contribuer à réaliser, bien au-delà de toute espérance, les horloges les plus précises, les semi-conducteurs les plus petits pour les ordinateurs les plus puissants, les réseaux Télécom les plus denses, les instruments médicaux les plus sophistiqués, les systèmes de navigation les plus performants, etc., conduisant à un progrès incontestable pour notre civilisation. La connaissance de l'infiniment petit n'est pas une extrapolation. Il ne suffit pas d'imaginer le monde microscopique comme un « zoom » de notre environnement macroscopique. Se représenter les objets, l'espace et le temps qui le composent de manière identique, juste à une échelle différente, conduit à une impasse et à des paradoxes insurmontables.

Aujourd'hui en contemplant l'horizon, comme le faisaient nos ancêtres, nous apercevons parfois un arc-en-ciel. Mais encore peu d'entre nous imaginent ce qui se cache réellement derrière ce décor magique. Comment concevoir qu'une forme lumineuse aussi grande, aussi continue et aux couleurs aussi bien ordonnées émerge du hasard ? Elle est pourtant le résultat d'un phénomène purement statistique. Elle recourt à des grandeurs extrêmes dans lesquelles notre intuition se perd complètement : une quantité infiniment grande de particules infiniment petites. L'architecture du monde microscopique qui porte cette représentation harmonieuse ne se dévoile à nous que grâce à une théorie très élaborée. Celle-ci s'exprime avec la puissance du langage des mathématiques. L'équation de Schrödinger qui en est l'emblème résume à elle seule, en une vingtaine de caractères, bien plus que toutes les pages de cet ouvrage³. Avant les inventions que nous venons de citer, elle a guidé les observations pour les réaliser. Elle a permis de mettre en œuvre la quantification extrêmement fine de l'énergie, les ondes de matières, puis la non-localité. Enfin, elle nous a conduit à saisir le hasard dans toute sa profondeur. Tels sont quelques-uns des concepts qui édifient la structure du monde microscopique. Ils sont infiniment plus riches que ceux de la réalité dite « classique », limitée à notre perception ordinaire du monde macroscopique. C'est ce que cet ouvrage va essayer de nous faire comprendre.

3. On connaît la très célèbre citation de Galilée, dans *L'Essayeur* (1623) : « La philosophie est écrite dans ce livre gigantesque qui est continuellement ouvert à nos yeux (je parle de l'Univers), mais on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit en langage mathématique, et les caractères sont des triangles, des cercles, et d'autres figures géométriques, sans lesquelles il est impossible d'y comprendre un mot. » La philosophie dont parle Galilée est évidemment la philosophie naturelle – qui va devenir notre physique. Jean-Marc Lévy-Leblond, « Symbolisation, physique », *Encyclopædia Universalis* [En ligne]. Voir : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/symbolisation-physique/>.

Nous ne décrivons pas l'équation de Schrödinger. Sa complexité dépasse de loin le but recherché qui est ici plus philosophique que purement physique. Mais ne pas avoir à utiliser le bagage théorique habituel de très haut niveau, trop souvent encore considéré être le seul permettant de décrire ces concepts très abstraits, est un défi. Nous sélectionnerons donc « juste » les principales idées qui nous conduiront à notre objectif, et nous établirons le plus rationnellement possible les liens logiques permettant de les déduire les unes des autres. Comme si nous cherchions à comprendre l'architecture de l'abbaye du Mont-Saint-Michel par exemple, mais seulement une fois sa réalisation achevée : en la visitant et en observant une à une ses principales parties selon un ordre pas nécessairement identique à celui de sa construction, en démarrant directement par le très haut, très visible et très symbolique clocher, puis en allant seulement examiner les éléments essentiels qui permettent de le soutenir.

Dans le chapitre 1 de cet ouvrage, nous commencerons donc par explorer les résultats très emblématiques de l'expérience absolument capitale du physicien français Alain Aspect⁴. Nous illustrerons celle-ci par un petit jeu joué avec deux personnages, Alice et Bob. Ce jeu, bien que représenté autrement et de façon futuriste, est inspiré de l'ouvrage de Nicolas Gisin (2012). Nous verrons qu'avec l'aide du dispositif quantique expérimental que nous décrivons, Alice et Bob obtiennent des scores tout à fait surprenants. Ceux-ci révèlent des corrélations qui lient physiquement deux points distants de l'espace, aussi éloignés l'un de l'autre soient-ils. En essayant de comprendre ces corrélations, nous verrons que la seule issue logique et compatible avec le corpus de la science actuelle est complètement vertigineuse. Elle révèle la présence d'un hasard absolu, profond, dit fondamental, car très différent du (faux) hasard des jeux classiques. Nous découvrirons aussi le fameux théorème de Bell qui permet de différencier ce qui appartient à la réalité classique, déterministe et locale, de ce qui appartient à une réalité *a priori* opposée, fondamentalement indéterministe et non locale.

Dans le chapitre 2, nous découvrirons les propriétés inimaginables qui en découlent. Nous expliquerons ce que sont des états superposés et cohérents, et ce que l'on appelle les observables. Nous en déduirons l'indétermination de grandeurs complémentaires mesurées simultanément et le phénomène d'intrication quantique. Nous montrerons comment ce dernier permet de concevoir, non seulement un protocole de cryptographie inviolable, mais aussi l'ordinateur quantique « suprême » censé révolutionner l'informatique d'aujourd'hui. Nous éluciderons le problème du chat de Schrödinger et la raison pour laquelle il se pose comme un défi à toutes ces inventions.

Le chapitre 3 explique les découvertes historiques majeures – du principe de moindre action de Maupertuis au théorème d'indétermination de Heisenberg, en passant par la quantification de Planck – qui ont conduit à l'expérience d'Alain Aspect. Ainsi elle

4. En octobre 2022, Alain Aspect a été récompensé du prix Nobel pour cette expérience.

montre comment s'est construit le formalisme de la mécanique quantique, et comment s'y est ancré le hasard fondamental au cœur des interactions. Elle établit ce qu'est une onde de probabilité et un paquet d'ondes associés à une particule. Elle expose notamment la manière dont la représentation spectrale des grandeurs physiques permet de comprendre notre perception classique du monde macroscopique.

Le chapitre 4 montre l'échelle à laquelle les phénomènes quantiques sont observables. Elle explique aussi ce que sont les phénomènes de diffusion, d'interférences et de transitions atomiques. En guise d'application concrète, elle décrit la logique de fonctionnement de l'horloge atomique.

Dans le chapitre 5, nous cheminerons sur le seuil de concepts complètement nouveaux et absolument renversants, développés par Alain Connes, qui suggèrent que les grandeurs variables d'espace et de temps – habituellement considérées comme primitives et irréductibles – émergent en fait toutes deux de la variabilité encore plus élémentaire produite par le hasard fondamental. Nous expliquerons pourquoi la notion de longueur étalon a pu être complètement repensée. Nous évoquerons l'interprétation de la multiplicité du monde qu'entraîne le phénomène d'effondrement de la fonction d'onde. Nous expliquerons également comment l'irréversibilité du temps intervient même au niveau du micro-état d'une particule élémentaire. À la lumière de ces nouvelles connaissances, nous essaierons d'aborder vraiment autrement les questions profondément existentielles de l'origine de notre Univers et de sa représentation.

Afin d'illustrer le monde quantique de la manière la plus compréhensible possible, nous essaierons de choisir des exemples simples. Nous utiliserons souvent des modèles rudimentaires, d'abord parce qu'ils sont plus faciles à imaginer. Comme nous le verrons, ceux-ci conduiront parfois à des approximations quantitatives très grossières à un point que le lecteur scrupuleux pourra se demander si cette démarche correspond vraiment à une réalité physique. L'auteur n'étant pas physicien à l'origine (loin s'en faut !) assume que la réponse puisse être négative. De même, il aura peut-être utilisé des notations ou des définitions qui ne paraîtront pas du tout conventionnelles aux yeux d'un physicien rigoureux. Mais, encore une fois, le but de cet ouvrage n'est pas de décrire un modèle physique parfaitement exact. Il n'est pas de déterminer avec précision la valeur de toutes les grandeurs qui régissent les phénomènes exposés. Il est seulement d'expliquer très pertinemment comment logiquement de tels phénomènes peuvent se produire réellement. Il est aussi d'approcher par la pensée une conception sans rupture et unifiée de deux mondes apparemment opposés, celui du macroscopique et celui du quantique microscopique. Le premier que nous percevons est continu, progressif, prévisible. Quant au second, il est invisible, discontinu, fluctuant et aléatoire. L'objectif est donc surtout de comprendre qu'il y a bien une et une seule réalité qui fusionne ces deux mondes ; et que c'est le hasard fondamental qui en est à l'origine.

Cependant, pour renforcer le poids de nos arguments, il nous a semblé essentiel de devoir justifier les choix de nos simplifications et d'en évaluer les limites. Ces explications figureront soit dans les renvois en bas de page, soit, lorsque c'est un peu plus technique, en annexe. Les encadrés aideront aussi le lecteur qui le désire à approfondir certains sujets. Ils exposent les démonstrations des résultats obtenus, ou le principe de fonctionnement des applications. Malgré tous les efforts déployés pour rendre la lecture la plus aisée possible, certains passages pourront peut-être paraître encore difficiles à saisir. Que le lecteur ne se sente surtout pas bloqué ; qu'il n'hésite pas à les relire, voire à revenir encore plus en arrière ; ou au contraire à poursuivre la lecture, les éléments de clarification pouvant se décanter soit d'eux-mêmes, soit lors de l'exposé d'une nouvelle propriété.