

## Introduction

« On a toujours tort d'essayer d'avoir  
raison devant des gens qui ont toutes  
les bonnes raisons de croire qu'ils  
n'ont pas tort. »

Raymond Devos

Pour débiter, il me semble approprié de justifier le choix du titre *Certitudes et incertitudes en mécanique quantique*. Bien au-delà de la simple référence au principe d'incertitude d'Heisenberg, ce choix est motivé par l'objectif principal de cet ouvrage : tenter de mettre en lumière le contraste entre les **certitudes**, c'est-à-dire les prédictions fabuleuses de la mécanique quantique qui résistent jusqu'à présent à toute confrontation avec la réalité, et ses **incertitudes**, à savoir le statut que l'on doit donner aux concepts invoqués par la théorie ; en un mot, son interprétation. On peut aussi y voir un clin d'œil à l'ouvrage de John S. Bell *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*.

D'une certaine manière, j'ai écrit cet ouvrage comme un message à mon moi du passé. Pendant mes études de physique théorique, les cours de mécanique quantique m'ont toujours paru particulièrement déroutants. Je ne parle pas là de maîtriser le langage mathématique de la théorie, ou de résoudre les exercices, mais bien d'en avoir une compréhension physique. Après tout, j'avais décidé de faire des études de physique pour comprendre le monde, or dans les cours de mécanique quantique, il n'était pas tout à fait clair à quoi ce monde ressemblait, ni même s'il existait vraiment. Au fil des discussions avec mes camarades, je constatais que ce sentiment était partagé par tous, même si cela n'inquiétait pas tout le monde de la même manière.

En franchissant la frontière pour devenir enseignant, je constate que ce sentiment demeure largement partagé par de nombreux étudiants. Il me semble même, peut-être à tort, qu'il est plus prononcé chez les jeunes étudiants que chez leurs aînés, et qu'il s'atténue progressivement au fil du temps. Peut-être qu'avec le temps, les étudiants parviennent à se persuader qu'ils ont compris ou que les questions qu'ils se posaient ont toujours été dénuées de sens. Peut-être pensent-ils qu'il est plus judicieux de se concentrer sur des choses plus concrètes et utiles, en se laissant la possibilité de revenir sur ces questions plus tard dans leur carrière. Bien sûr, il serait difficile de les blâmer, mais je doute que cette attitude soit la plus bénéfique.

Ainsi, cet ouvrage est principalement destiné aux étudiants, chercheurs et enseignants qui s'interrogent sur la mécanique quantique au-delà de ses aspects techniques. Il cible en premier lieu les étudiants en physique, mais également ceux d'autres disciplines qui incluent des cours de mécanique quantique dans leur programme, tels que les études de chimie ou certaines branches de l'ingénierie. Dans une perspective plus étendue, il s'adresse également aux esprits curieux non initiés, ayant déjà acquis un modeste bagage scientifique. En effet, les aspects techniques de la théorie n'y sont pas abordés. Bien qu'il puisse parfois nécessiter de se plonger dans des formules mathématiques, le raisonnement général peut être suivi sans nécessairement les maîtriser ; un simple brin de curiosité et une volonté d'apprendre seront amplement suffisants !

L'étudiant serait certainement rassuré, et le non-initié surpris, d'apprendre que ces questionnements suscitent des débats au sein même de la communauté scientifique et préoccupent aussi bien les physiciens que les philosophes. Mais alors, pourquoi ? Qu'y a-t-il de si particulier avec la mécanique quantique pour qu'elle engendre autant de questionnements et de débats ? Une réponse que l'on entend parfois est que la mécanique quantique est contre-intuitive, car elle décrit le monde microscopique. Il serait ainsi naturel qu'elle paraisse étrange à nous, humains, habitués aux échelles de longueurs macroscopiques. Cette perspective est, au mieux, incomplète, et au pire, erronée. Pour illustrer mon propos, je prendrai l'exemple de la théorie de la relativité, sous sa forme restreinte ou générale ; on peut reconnaître qu'elle est également très contre-intuitive. Cependant, elle ne suscite pas un tel débat dans la communauté scientifique ni de tels questionnements chez les étudiants. En réalité, une grande partie de la physique est contre-intuitive et il n'y a pas à chercher bien loin pour trouver des exemples. Même la mécanique newtonienne peut être très contre-intuitive : l'idée que la chute des corps dans le vide ne dépende pas de leur masse, par exemple, est assez contre-intuitive et en contradiction avec l'observation quotidienne, où les objets ne tombent pas dans le vide, mais dans l'air.

Pour comprendre ce qu'il y a de particulier avec la mécanique quantique, il est essentiel de comprendre son évolution historique et comment elle est généralement exposée aux étudiants aujourd'hui. La théorie quantique a été développée au début du

xx<sup>e</sup> siècle, en réponse à diverses anomalies et expériences qui ne trouvaient pas d'explications dans le cadre de la physique classique connue jusque-là. Ces expériences, incontestablement déroutantes, ont forcé une remise en question radicale de nombreuses notions considérées comme acquises, telles que le réalisme, le déterminisme et la notion de trajectoire. Les interrogations soulevées ont engendré d'intenses débats dans les années 1920 et 1930, impliquant les pères fondateurs de la théorie quantique, parmi lesquels figuraient Einstein, Schrödinger, Bohr, Heisenberg, et d'autres. Cependant, probablement pour des raisons historiques et économiques, le débat a connu un déclin notable après cette période.

Ce déclin graduel de l'intérêt pour les questions conceptuelles a laissé place à un cadre théorique par défaut, celui défendu par Neils Bohr, désigné de nos jours sous le nom d'*interprétation de Copenhague*, en référence à la ville natale de Bohr. Un tel cadre théorique propose d'admettre que nous n'avons pas accès à la véritable nature des choses et qu'il faudrait se contenter de **sauver les apparences**, c'est-à-dire de prédire de façon efficace les résultats des expériences faites en laboratoire. Dit autrement, il s'agit de remplacer une théorie sur le monde par un algorithme qui permet de rendre compte des mesures et des expériences faites en laboratoire. D'une part, grâce à son efficacité pratique pour rendre compte des résultats expérimentaux, et d'autre part, en raison du déclin de l'intérêt pour les questions conceptuelles, cette solution provisoire s'est imposée comme l'interprétation par défaut et le cadre théorique par lequel les étudiants sont introduits à la mécanique quantique, en particulier après la parution des premiers ouvrages de Dirac (1930) et de von Neumann (1932) sur le sujet. Cependant, dans la plupart des cours, l'interprétation demeure abordée de manière superficielle, mettant l'accent plutôt sur la maîtrise des aspects techniques. En conséquence, les étudiants continuent généralement à se forger des représentations mentales des processus quantiques, souvent erronées ou contradictoires.

Dans la communauté scientifique, cependant, les débats n'ont jamais complètement cessé et ont même connu une renaissance importante à partir des années 1970-1980. Jusque-là, beaucoup de physiciens considéraient que les questions conceptuelles avaient été résolues par Bohr, en particulier en raison des discussions qu'il avait eues avec Einstein, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, de Broglie et d'autres, lors des congrès Solvay de 1927<sup>1</sup>. Ces échanges ont instauré l'idée que l'interprétation standard de Copenhague était la position raisonnable à adopter. Depuis lors, une transformation s'est progressivement opérée dans la manière dont les physiciens perçoivent ces questions. Une raison est que, au sein de la communauté scientifique, on a pris conscience que les « théorèmes d'impossibilité » présentés par les partisans de l'interprétation de

---

1. Contrairement à la croyance populaire, la question de l'interprétation n'a pas été résolue lors du congrès Solvay, et aucun consensus n'a été atteint à ce moment-là. Au lieu de cela, une variété de points de vue nettement divergents y ont été présentés et largement discutés (voir [BAC 09] pour une histoire révisée du congrès).

Copenhague, en particulier par von Neumann, ne sont pas aussi décisifs<sup>2</sup>. Une autre raison est l'impact majeur des découvertes de J. S. Bell en 1964. Actuellement, l'interprétation de Copenhague ne bénéficie plus d'un consensus au sein de la communauté scientifique et différentes interprétations alternatives sont examinées avec un grand intérêt.

Cet ouvrage retrace l'évolution des idées qui ont conduit à l'élaboration de l'interprétation standard de la mécanique quantique, explore les controverses qu'elle a suscitées, ainsi que les problèmes conceptuels auxquels elle se heurte, et présente les différentes tentatives visant à les résoudre. En outre, il s'attache à mettre en lumière un discours souvent vague et nébuleux, issu parfois des pères fondateurs de la théorie quantique. Ce discours a laissé des empreintes dans la compréhension de cette théorie par les physiciens et, de façon plus générale, dans l'imaginaire collectif, où elle est souvent perçue de manière mystique.

Le premier chapitre présente les principaux éléments de la théorie quantique ainsi que son développement historique menant à l'interprétation de Copenhague. Il explore les problèmes conceptuels qui en découlent et examine comment ces défis sont traités dans le cadre du formalisme standard. L'ensemble est enrichi par des échanges épistolaires et des déclarations provenant de divers auteurs. Le second chapitre explore les interprétations alternatives qui ont émergé en réponse aux problèmes conceptuels abordés. Il examine l'interprétation des mondes multiples d'Everett, le QBisme, les théories de l'effondrement objectif, ainsi que d'autres interprétations telles que la mécanique quantique relationnelle et l'interprétation des histoires cohérentes. Le troisième et dernier chapitre est consacré entièrement à l'interprétation de de Broglie-Bohm qui entend donner un cadre réaliste et déterministe à la mécanique quantique.

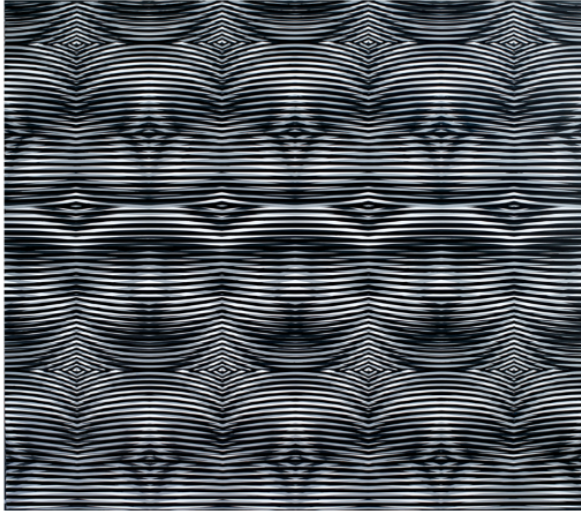
Cet ouvrage est **objectif** mais il n'est pas **neutre** : objectif dans la mesure où les arguments y sont présentés avec transparence et impartialité. Cependant, il prend clairement parti en accordant une place et un intérêt particuliers à l'interprétation de de Broglie-Bohm, mettant en lumière comment celle-ci permet de dissiper le flou et le nébuleux, caractéristiques de l'interprétation standard de la théorie quantique.

Comme la science et l'art sont souvent deux moyens différents d'exprimer la réalité, j'aimerais remercier les artistes qui ont contribué à rendre cet ouvrage plus agréable. Mes sincères remerciements à Lina Bouslimani pour les magnifiques portraits qui ornent ces pages, ainsi qu'à Sarah Sahnoune pour son illustration du chat de Schrödinger. Je suis également reconnaissant envers l'artiste américain James Flynn

---

2. On sait aujourd'hui que ces théorèmes d'« impossibilité » sont logiquement insatisfaisants car ils imposent de manière arbitraire des conditions qui ne s'appliquent pas aux théories qu'ils cherchent à réfuter. Il a fallu du temps à la communauté scientifique pour le réaliser en raison de la renommée scientifique exceptionnelle des auteurs de ces théorèmes.

et l'artiste et philosophe de l'art Mark Staff Brandl pour avoir généreusement autorisé l'utilisation de leurs œuvres. Enfin, je tiens à remercier le physicien Christopher A. Fuchs pour nos échanges sur le QBisme (« with a capital B, Kamel ! », comme il tenait à le préciser), même s'il ne sera probablement pas d'accord avec les conclusions que j'en tire ici.



**Figure I.1.** The Superposition of Schrödinger's Cats, œuvre de l'artiste américain James Flynn, illustrant l'expérience du chat de Schrödinger et le principe de superposition (voir sections 1.3 et 1.4). Cette représentation est reproduite ici avec l'aimable autorisation de l'artiste.