

Trois façons de « parler » de l'« objet quantique »

par **Alain LE RILLE**
Lycée Saint-Louis - 75005 Paris
alain.lerille@yahoo.fr

ON INTERROGE LE CONSTAT souvent partagé du manque d'intelligibilité et du caractère peu intuitif de la théorie quantique. On essaie de cerner les difficultés inhérentes à l'enseignement de la mécanique quantique en faisant appel à des concepts utilisés dans les sciences de l'éducation. On discerne enfin plusieurs stratégies didactiques possibles. Chacune de ces stratégies met en jeu un processus particulier de dépassement des conceptions erronées des élèves (en particulier onde et particule) et active un type spécifique de représentations mentales des objets microscopiques associé à une vision physique : le seul recours aux mathématiques comme représentation procédurale, la représentation conceptuelle de l'état quantique ou bien encore la complémentarité comme source d'images mentales.

INTRODUCTION : LA MÉCANIQUE QUANTIQUE, UN OBSTACLE ÉPISTÉMOLOGIQUE INSURMONTABLE ?

C'est quasiment un lieu commun, partagé par l'homme de la rue, mais aussi par les physiciens, que de dire que la mécanique quantique est complexe, difficile à saisir, voir incompréhensible. Richard Feynman a déclaré que « personne ne comprend vraiment la physique quantique », à tel point que « le praticien de la mécanique quantique aboutit régulièrement à des prédictions contraires à son intuition initiale » selon Jean Dalibar, professeur au Collège de France ([1], p. 98-101). On ne s'étonnera donc pas de lire parfois dans les manuels même que la mécanique quantique « est difficile à saisir intuitivement » [2].

À lire Feynman, c'est l'objet d'étude de la mécanique quantique, photon, électron ou autre, lui-même qui pose problème : à très petite échelle, les choses ne se comportent en rien comme ce dont vous avez une expérience directe. Elles ne se comportent pas comme des ondes, elles ne se comportent pas comme des particules, elles ne se comportent pas comme des nuages ni comme des boules de billard, ni comme des poids sur une corde, ni comme rien que vous ayez jamais vu [3]. Comment donc « saisir » ce qu'est cet étrange objet quantique ? Pour répondre à cette question, il s'agit bien sûr d'aller voir du côté des manuels. Mais au-delà, la didactique, comme la philosophie et l'histoire des sciences, peuvent nous

permettre d'étudier les différentes stratégies qui sont possibles pour « parler » de cet objet quantique.

1. UN CAS D'ÉCOLE : L'EXPÉRIENCE DE YOUNG

On s'appuiera dans cet article sur cette expérience archétypale, souvent citée dans les manuels, et sur ses différents avatars que nous dénommerons « expérience de Young », car grâce à elle, selon Richard Feynman, « nous vous avons donné les particularités fondamentales de toute la mécanique quantique » [3] ! Le dispositif utilisé d'abord en optique (dès le début du XIX^e siècle) est composé (cf. figure 1) d'un écran percé de deux fentes parallèles suivi d'un autre écran, parallèle au premier sur lequel on visualise l'intensité lumineuse résultant des interférences lumineuses. Il a été adapté (dès la fin du XX^e siècle) de différentes façons pour visualiser les interférences d'ondes de matière de Louis de Broglie. Ce qui nous intéressera ici, c'est qu'en envoyant un unique objet quantique (par exemple un électron ou un photon), il est possible de réaliser une expérience d'interférométrie à division du front d'onde. Mais le dernier écran permet de détecter l'objet microscopique qui y apparaît à chaque fois ponctuellement.

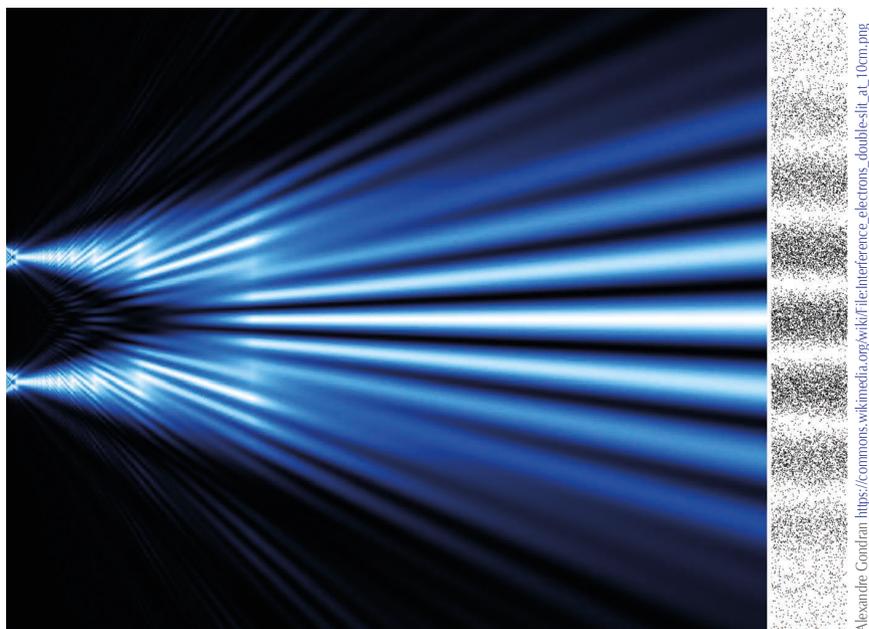


Figure 1 - Deux illustrations de l'expérience de Young :

- à gauche (avant l'écran), l'onde de probabilité (dont l'intensité $|\psi|^2$ est proportionnelle à la luminosité représentée en bleu) ;
- à droite (sur l'écran), des détections ponctuelles d'objets quantiques repérées par des points noirs.

Ainsi, l'objet quantique semble insaisissable, car flou et contradictoire, à la fois onde et particule, ce qui fait dire à Richard Feynman : *Il ne se comporte donc réellement ni comme l'une ni comme l'autre. À l'heure actuelle, nous avons abandonné ce dilemme et nous disons : « il n'est ni l'une ni l'autre ». [...] Le comportement quantique des objets atomiques (électrons, protons, neutrons, photons, etc.) est le même pour tous, ce sont tous des « ondes-particules » ou comme vous voudrez les appeler* [3]. Dans un autre manuel, on lit : *Nous devons abandonner l'idée que [...] les objets quantiques ont une dualité d'essence, à la fois ondes et corpuscules (ce qui est logiquement absurde puisque les deux concepts s'excluent). Il faut donc reconnaître que nous avons affaire à d'autres objets, proprement quantiques. Pour cette raison, nous les baptiserons quantons, bien que cette dénomination ne soit pas universellement utilisée. Ces quantons se comportent de façon spécifique* [4].

On voit que certains auteurs ont essayé de forger un néologisme (« quanton » que nous venons de voir, ou bien « particule », ou encore « ondicule » [5]) pour nommer ce que nous appelons dans cet article, bien malhabilement, « objet quantique ». Édifiantes sont les difficultés sémantiques soulevées lorsque l'on veut simplement nommer ce que l'on étudie en mécanique quantique ! Il semble en tout cas salvateur du point de vue pédagogique d'adopter un nouveau terme, car il faut bien marquer la différence entre cette entité quantique et celles que l'on trouve en physique classique.

2. UN ENSEIGNEMENT DE LA DIDACTIQUE : APPRENDRE IMPLIQUE DE DÉPASSER DES CONCEPTIONS

En effet, l'apprentissage implique un conflit entre connaissances antérieures et nouvelles. La didactique nous apprend [6] que le prolongement des acquis peut se faire par rupture avec les connaissances antérieures. Aussi, tout apprentissage est le produit d'une confrontation entre des savoirs anciens et des informations nouvelles. Comme le note un document du ministère de l'Éducation nationale [7] : « il s'agit d'effectuer avec les élèves un long travail de fissuration et de dépassement de conceptions intuitives tenaces et de contribuer de manière efficace à la mise en place d'un raisonnement nouveau ». La notion clé ici est celle de « conception » (c'est-à-dire de conception antérieure ou intuitive) : *une conception [...] est le fruit de l'expérience antérieure de l'apprenant (qu'il soit enfant ou adulte). C'est à la fois sa grille de lecture, d'interprétation et de prévision de la réalité que l'individu a à traiter et sa prison intellectuelle. Il ne peut comprendre le monde qu'à travers elle* [6].

L'image de la conception comme « prison intellectuelle » éclaire la problématique de l'enseignement : libérer celui qui apprend de ses conceptions est la condition de l'apprentissage de nouvelles connaissances. Ces « conceptions » sont bien documentées en ce qui concerne l'apprentissage de la mécanique classique (dans l'enseignement secondaire) : [comme le dit Bachelard] *« l'adolescent arrive en classe de physique avec des*

connaissances empiriques déjà constituées», notamment parce que les notions manipulées en mécanique, telles que la force, la vitesse ou l'accélération font partie de la vie courante avant leur introduction dans un cours de sciences physiques. L'enseignement de la mécanique se fait donc le plus souvent contre les conceptions erronées des élèves. Les raisonnements communs [...] sont en effet des structures profondes de pensée qui fonctionnent comme des théories naïves [...] et différents auteurs [...] ont expliqué qu'il était difficile de les faire évoluer notamment parce que ces conceptions étaient pertinentes dans la vie quotidienne [8].

Le physicien et philosophe des sciences Michel Paty soutient que les difficultés relatives à l'apprentissage de la mécanique quantique ne sont pas, dans leur essence, différentes de celles relatives à la mécanique classique : *On assigne, en fin de compte, aux systèmes quantiques des propriétés décrites par leurs grandeurs abstraites d'une manière aussi naturelle qu'on le fait pour la physique classique avec les concepts d'énergie ou de points (singuliers) d'une trajectoire (continue). Pour ces derniers aussi, il fallut la familiarisation avec des concepts construits, parfois peu clairs au début (la masse, le point matériel, la force, l'énergie, le potentiel...), et sous-tendus par un outil mathématique qui avait été créé pour l'occasion, le calcul différentiel et intégral. L'exceptionnelle abstraction des grandeurs physiques n'est, à cet égard, une spécificité de la mécanique quantique que par un effet de perspective rapprochée. L'histoire de la physique nous rappelle que sa mathématisation a toujours opéré par l'intervention de grandeurs abstraites qui paraissaient initialement éloignées des phénomènes [9].* Ainsi, l'apprentissage de la mécanique quantique ne présente pas dans son essence de différences didactiques avec celui de la mécanique classique : dans un cas comme dans l'autre, il s'agit de dépasser des conceptions.

3. UNE PROPOSITION DE CLASSIFICATION DE STRATÉGIES DIDACTIQUES FONDÉE SUR LES CONCEPTS DE REPRÉSENTATION MENTALE ET DE CONCEPTIONS À DÉPASSER

Si l'on sait ce que n'est pas l'objet quantique (les conceptions à dépasser : ce n'est ni une onde ni une particule), si on l'a baptisé (appelons-le « quanton » par exemple), reste à s'en faire une représentation mentale (c'est-à-dire le cerner afin de le « comprendre vraiment»). Par la suite, nous nous fonderons sur les différentes formes que peuvent prendre les représentations mentales, telles que définies dans l'extrait suivant : *Depuis un siècle, les psychologues ont [...] identifié trois grands types de représentations mentales : les procédures, les images mentales et les concepts. [...] À la différence de l'image mentale, le concept ne possède pas de caractère figuratif. [...] Les représentations procédurales, quant à elles, sont mises en œuvre dans l'exécution d'une tâche. [...] Elles sont obtenues au cours d'un apprentissage par l'action [10].*

Nous verrons dans ce qui suit comment donner de l'objet quantique des représentations procédurales (liées en particulier aux calculs effectués dans le cadre de la théorie axiomatisée), conceptuelles (fondées sur des abstractions que l'on ne peut pas se figu-

rer) et imagées (utilisant des idées qui s'incarnent dans des images mentales). Suivant la façon de se comporter vis-à-vis des conceptions, nous associerons ces trois types de représentations mentales, en reprenant trois positionnements possibles de l'enseignant listés par le didacticien Pascal Duplessis [11] :

- ◆ la conception comme obstacle à éliminer en la niant ;
- ◆ la conception comme obstacle à éliminer en la réfutant ;
- ◆ la conception comme obstacle à dépasser (« faire avec pour aller contre »).

Nous pourrions alors discerner trois stratégies didactiques distinctes qui sont résumées dans le tableau 1 et que nous allons maintenant expliciter autour de l'expérience de Young.

| Stratégie | 1 | 2 | 3 |
|--|--|--------------------------------|-----------------|
| Conceptions | Niées | Réfutées | Dépassées |
| Représentation mentale privilégiée | Procédures | Concepts | Images |
| Vision physique | « Shut up and calculate » | État quantique | Complémentarité |
| Avant la détection dans le dispositif de Young | Calcul de $\underline{\psi}$ selon l'équation d'évolution de Schrödinger | Superposition d'états | Onde |
| Lors de la détection dans le dispositif de Young | Utilisation de $\underline{\psi}$ pour calculer les probabilités | Effondrement en un unique état | Particule |

Tableau 1 - Récapitulatif des différentes stratégies didactiques.

4. LES STRATÉGIES

4.1. Une première stratégie du « shut up and calculate » utilisant uniquement les représentations procédurales

La probabilité de détection en un point est proportionnelle à l'intensité de la fonction d'onde $|\underline{\psi}|^2$ en ce point. Aussi, il suffit de calculer la fonction d'onde en superposant les deux fonctions d'ondes relatives aux deux voies de l'interféromètre. C'est ce qui fait dire à Jean Dalibar : *Il n'y a aucun flou dans la démarche à suivre pour aborder un nouveau problème avec les outils de la mécanique quantique ; ils ne souffrent pas d'ambiguïté, chacun peut suivre l'intégralité du chemin conduisant des premiers principes jusqu'aux prédictions [...] Dans ces conditions, dire « qu'on ne comprend pas » me semble difficilement... compréhensible* ([1], p. 98-101).

La mécanique quantique est donc compréhensible si l'on s'en tient aux représentations mentales de type procédural. Rappelons pour mémoire ces procédures. Il s'agit de déterminer $\underline{\psi}$ qui peut être comprise comme un répertoire de possibilités et, de

plus, $\underline{\psi}$ donne accès, pour tous les résultats possibles de mesures, à leurs probabilités. En effet, à toute grandeur physique mesurable \mathcal{A} est associé un opérateur linéaire \widehat{A} . On peut décomposer la fonction d'onde sur une base $\{\underline{\phi}_k\}_{k \in \{1; N\}}$ de vecteurs propres de \widehat{A} (pour ne pas surcharger les notations, on se placera dans un cas non dégénéré) :

$$\underline{\psi} = \sum_{k=1}^N c_k \underline{\phi}_k \quad \text{avec} \quad \widehat{A} \underline{\phi}_k = a_k \underline{\phi}_k$$

$\underline{\psi}$ évolue en suivant l'équation de Schrödinger. Elle fournit la probabilité de trouver a_m pour l'observable \widehat{A} , selon la règle de Born :

$$\mathcal{P}(a_m) = |c_m|^2.$$

Le praticien est ramené pour chaque problème à la détermination de $\underline{\psi}$ et à la déduction qu'il en fait des mesures possibles et des probabilités associées à chacune de ces mesures. La procédure guide celui qui l'utilise sur un « chemin » bien balisé, donnant ainsi une représentation – procédurale – claire. Si tout est si clair, l'étudiant n'a donc pas de questions à se poser ! La méthode pédagogique se résumerait donc à ce slogan « shut up and calculate ! » Si c'est un peu caricatural bien sûr, on pourrait dire que le discours de l'enseignant est : « en dehors des mathématiques, point de salut » et les conceptions antérieures de l'étudiant sont facilement surmontées, car elles sont tout simplement niées, oubliées : *on invite les élèves à partager notre ignorance en les plongeant dans un état de cécité totale du monde physique où le bon sens perd son statut de juge suprême. Dans ces ténèbres, un seul fil d'Ariane salvateur : les mathématiques* ([1], p. 157-159).

La métaphore de la cécité est particulièrement adaptée du fait de l'absence d'images mentales. Mais est-ce que cette représentation procédurale est suffisante ? En appauvrissant les représentations mentales possibles lors de l'apprentissage, le risque est grand de laisser en chemin bon nombre d'apprenants, comme le note Claude Cohen-Tannoudji (prix Nobel de physique 1997) : *Je suis persuadé que la meilleure approche pour pénétrer dans le monde quantique consiste [à] se forger des images simples [...] Bien sûr, il faudra aussi résoudre des équations, mais il faut « faire parler » ces équations, saisir les idées qu'elles renferment* ([1], p. 92-97).

De même, le prix Nobel de physique 2022 Alain Aspect défend la nécessité des images mentales dans son travail de chercheur : *Certains physiciens acceptent [...] de renoncer aux images, mais d'autres, dont je suis, ont besoin de visualiser les phénomènes pour guider leur intuition, avant de passer au calcul* ([1], p. 130-135). Aspect critique cette première stratégie, coupable selon lui de ne pas développer l'intuition, « l'aptitude à l'action de deviner, pressentir, sentir, comprendre, connaître quelque chose d'emblée, sans parcourir les étapes de l'analyse, du raisonnement ou de la réflexion » selon le dictionnaire. Aussi, l'intuition engage souvent les représentations mentales de types conceptuel et imagé, en se passant des représentations procédurales. Si l'on développe un unique type de représentation mentale, celui relatif aux procédures, le risque est grand de ne pas développer assez son intuition. Ainsi, la mécanique quantique semblera toujours

contre-intuitive (et du coup incompréhensible en grande partie) à celui qui l'a apprise selon la stratégie didactique du «shut up and calculate». Passons donc à une autre possibilité pédagogique.

4.2. Une deuxième stratégie fondée sur la représentation conceptuelle d'«état quantique»

De nombreux manuels utilisent une stratégie qui revient à s'opposer aux conceptions classiques de particules et de trajectoires. Ainsi Jean-Louis Basdevant et *al.* tirent comme conclusion de l'expérience de Young que : *les atomes n'ont pas de trajectoire au sens classique : observant l'impact d'un atome dans une expérience d'interférences, nous ne pouvons pas dire par où il est passé à chaque instant antérieur. [...] En physique quantique, la notion de trajectoire, un des fondements de la mécanique newtonienne, ne résiste pas à l'analyse expérimentale* [12]. De même pour Claude Aslangul : *il existe une incompatibilité entre les faits expérimentaux et l'attribution à une particule d'une trajectoire définie au sens classique* [13]. Quant à Michel Le Bellac dans son ouvrage, il va plus loin : *la question : «quel est le chemin suivi par un photon déterminé ?» ne peut pas avoir de sens, on n'est simplement pas autorisé à la poser. On pourrait être tenté de sortir de ce dilemme en affirmant : «le photon a suivi les deux chemins à la fois», mais ce n'est qu'une façon d'éluder le problème, car un photon ne se divise pas. En fait, le seul énoncé correct est : «le photon se trouve dans un état de superposition linéaire (ou cohérente) des deux trajets»* [14].

On voit apparaître là le concept sur lequel se fonde la plupart des manuels pour parler de l'objet quantique : l'«état» associé à $\underline{\psi}$. Or, si $\underline{\psi}$ évolue de façon déterministe (selon l'équation de Schrödinger) avant la mesure, elle subit lors d'une mesure un «effondrement du paquet d'ondes» :

$$\underline{\psi} = \sum_{k=1}^N c_k \phi_k \xrightarrow{\text{mesure}} \underline{\psi} = \phi_m.$$

Ainsi, l'état quantique passe d'une superposition, ensemble de possibles, à un état unique qui se réalise lors de la mesure qui «actualise» $\underline{\psi}$ lors de l'effondrement du paquet d'ondes.

«Faire parler les équations», c'est ce à quoi s'attellent souvent les manuels de mécanique quantique. Or il est parfois délicat de bien faire la différence entre le système lui-même, la fonction d'onde qui permet des prédictions de mesure, et les représentations mentales que l'on se donne. Ainsi, comme le note Albert Messiah : *la fonction d'onde ne représenterait pas l'état objectif du système étudié, ce serait plutôt un objet mathématique contenant la totalité des renseignements que l'on possède sur un système incomplètement connu* [2]. Mais on voit souvent la transformation lexicale qui fait passer de «la fonction d'onde comme combinaison linéaire de paquets d'ondes» au «système dans une superposition d'états» ([1], p. 92-97). En parlant ainsi, on fait comme si, avant toute mesure, l'ensemble des possibles répertoriés par la fonction d'onde était réel et comme si le système existait sous la forme d'une sorte de juxtaposition (étrange) de plusieurs sous-systèmes.

Pour bien comprendre ce glissement sémantique, appelons à la rescousse le fameux chat de Schrödinger imaginé en 1935 afin de mettre en évidence de façon très imagée la notion de superposition quantique. Le mécanisme imaginé par Schrödinger lie l'état (mort ou vivant) d'un chat à l'état d'un atome (radioactif) dans une boîte. Avant la mesure (l'ouverture de la boîte), la fonction d'onde associée au chat est une combinaison linéaire de deux paquets d'ondes correspondant à un ensemble de mesures possibles (l'état mort et l'état vivant). Si l'on accorde un statut ontologique à la fonction d'onde, cela revient à dire que le chat est dans la superposition de deux états quantiques (l'état mort et l'état vivant, cf. figure 2). En effectuant un tel glissement sémantique, on présente ψ comme une description des propriétés du système plutôt qu'un catalogue de mesures possibles.



Figure 2 - Exemple d'« ontologisation » induite : le chat de Schrödinger sous la forme d'une superposition mort et vivant à la fois.

Une telle interprétation est bien sûr contradictoire avec l'indétermination des grandeurs physiques tant qu'on ne les a pas mesurées, indétermination principielle pour la mécanique quantique standard. Mais, si le paradoxe est levé simplement en rejetant toute ontologie et en limitant la théorie à une simple épistémologie qui ne dit rien du réel, comment se raccrocher alors à un *état* qui... *n'est pas* ? On voit ici les limitations de la représentation conceptuelle fondée sur l'« état quantique ».

4.3. Une troisième stratégie utilisant les représentations imagées de la complémentarité

Passons enfin à la dernière stratégie didactique qui consiste à s'appuyer sur les anciennes conceptions afin de les dépasser : [Si] *le savoir est construit par l'apprenant, il devient nécessaire de s'appuyer sur les connaissances déjà présentes chez lui, sur son « déjà là » cognitif. Ce dernier offre ainsi des « structures d'accueil » permettant de faciliter de nouveaux*

apprentissages [...] jouent pour le sujet un rôle d'intermédiaire entre connaissances antérieures et nouvelles. La conception devient ainsi le pivot, la base fondatrice de nouvelles acquisitions. C'est ainsi que l'obstacle doit, pour le didacticien, devenir une aide à l'apprentissage. D'où cette formule quelque peu paradoxale [...] : «faire avec pour aller contre». «Faire avec» puisque les conceptions des élèves [...] sont les seuls outils cognitifs dont ils disposent ; «aller contre», parce que le savoir scolaire va généralement à l'encontre des évidences immédiates qui nourrissent les conceptions [11].

Ainsi, l'idée est d'utiliser les anciennes représentations mentales pour les faire évoluer vers de nouvelles, proches, mais différentes. C'est bien la méthode qu'utilise le manuel de Claude Cohen-Tannoudji et *al.* quand il présente l'expérience de Young : *L'analyse qui précède montre qu'il est impossible d'expliquer tous les phénomènes observés si l'on ne s'attache qu'à l'un des deux aspects, corpusculaire ou ondulatoire, de la lumière. Or ces deux aspects semblent s'exclure mutuellement [15].*

Eugène Hecht dans son manuel ne fait pas autrement : *Les entités microscopiques (électrons, protons, photons, atomes, etc.) se propagent comme des ondes et échangent de l'énergie comme des particules ; c'est la dualité onde-particule. Dans tout événement expérimental, de telles entités se manifestent soit comme des particules soit comme des ondes, mais non les deux à la fois. Les images de particules et d'ondes sont deux aspects de représentation du photon ; elles ne sont pas en compétition, mais plutôt l'une complète l'autre [16].* Car la représentation mentale sur laquelle s'appuie cette stratégie, c'est celle de la «complémentarité» proposée par Niels Bohr en 1927. Bohr ne croit pas à la possibilité de définir une image précise, car son principe de complémentarité ramène à des paires de concepts (position et quantité de mouvement, particule et onde...). Si les images mentales sont oxymoriques – onde et particule par exemple – c'est parce que notre langage est limité selon Bohr, pour qui la contradiction apparaît du fait que nos mots, associés à des images classiques, sont impuissants à décrire correctement (c'est-à-dire de façon unifiée) le monde quantique. Ainsi, au début l'objet quantique peut avoir pour représentation mentale une onde ; puis celle d'un corpuscule lors de son impact avec l'écran. On voit que cette représentation est duale et donne naissance à des images mentales fragmentées, mobilisées tour à tour pendant l'évolution du système ou à l'occasion de la mesure. À dire vrai, les représentations mentales proposées par Bohr sont parfois boudées par les chercheurs. La complémentarité se réduit alors à un argument, et n'est pas activée dans le travail de tous les jours : *les physiciens, même si d'aventure ils se souciaient de comprendre la complémentarité, n'en avaient pas besoin pour développer les conséquences de la mécanique quantique, et n'y faisaient guère référence que comme à une arme philosophique contre l'arrière-garde réaliste dominée par Einstein [17].*

La raison de ce rejet des images mentales est son caractère fragmentaire. Werner Heisenberg lui-même les critiquait : *Le concept de complémentarité introduit par Bohr dans l'interprétation de la théorie quantique a encouragé les physiciens à utiliser un langage ambigu [...] à appliquer alternativement différents concepts classiques qui mèneraient à des contradictions*

si on les utilisait simultanément [18].

Effectivement, il a été montré (certes dans un autre domaine) [19] qu'« un grand nombre d'étudiants ne parvient pas à une synthèse cohérente des deux modèles », celui d'onde et celui de particule.

CONCLUSION : LA MÉCANIQUE QUANTIQUE STANDARD N'OFFRE QUE DES REPRÉSENTATIONS FRAGMENTÉES

Werner Heisenberg propose comme échappatoire au flou des images de limiter la représentation mentale à sa dimension uniquement procédurale : *Quand cet emploi vague et non systématique du langage mène à des difficultés, le physicien est forcé de se rabattre sur le schéma mathématique et sur sa corrélation sans ambiguïté avec les faits expérimentaux* [18]. En rejetant un concept d'état (qui n'en est pas un avant la mesure), et une image (non-unitaire selon la complémentarité), on est ramené à la stratégie du « shut up and calculate » et à la renonciation de toute explication physique « avec les mains ».

Il semble bien que, quelle que soit la stratégie didactique choisie, les représentations mentales activées sont à chaque fois fragmentaires : il y a un avant et un après la mesure. La mesure en mécanique standard fait en effet soudainement « changer les règles ». Ce n'est qu'un des aspects du « problème de la mesure » [20] que cet article ne développera pas. On pourrait chercher d'autres stratégies didactiques dans des versions hétérodoxes de la mécanique quantique qui se présentent comme solution à ce problème de la mesure (en particulier, la théorie de l'onde pilote [20]).

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier Léna Soler, ainsi que Nicolas Coppens et Renaud Mathevet pour leurs relectures et leurs remarques.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] J.-F. Dars et A. Papillault, *Le plus grand des hasards : surprises quantiques*, collection : Regards sur la science, Paris : Belin, 2010.
- [2] A. Messiah, *Mécanique quantique*, Paris : Dunod, 1969.
- [3] R. Feynman, R. Leighton et M. Sands, *Le cours de physique de Feynman*, sous la direction de F. Muller et J. Leroy, Paris : Dunod, 2018.
- [4] J.-M. Lévy-Leblond et F. Balibar, *Quantique : rudiments*, Paris : InterÉditions (Centre national de la recherche scientifique), 1984.

- [5] Ph. Loutesse, A. Vila Valls, K. Bécu-Robinault, H. Chabot, F. Ferlin, J.-L. Heraud, P. Lo Bello, «Enseigner la physique quantique en terminale scientifique en France – L'objet quantique, une référence problématique», *In* : 8^{es} rencontres scientifiques de l'association pour la Recherche en didactique des sciences et des technologies, T. 18. Issue : 1, ESPÉ – Université Aix-Marseille : Marseille, France, p. 323, mars 2014.
Consultable à l'adresse : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00971372>
- [6] A. Giordan, «Les conceptions de l'apprenant comme tremplin pour l'apprentissage», *In* : Sciences humaines, hors série (12), p. 48-50, mars 1996.
Consultable à l'adresse : <https://www.andregiordan.com/apprendre/concepttapp.html>
- [7] Il s'agit d'un document d'accompagnement de première S de 2002, caduque. On peut cependant retrouver des références plus récentes aux adresses :
<https://eduscol.education.fr/document/22858/download>
<https://eduscol.education.fr/document/22870/download>
- [8] N. Coppens, «Le suivi des conceptions des lycéens en mécanique : développement et usages d'exercices informatisés», thèse de doctorat, Paris 7, 2007.
Consultable à l'adresse : <https://www.theses.fr/2007PA077142>
- [9] M. Paty, «Interprétations et significations en physique quantique», *Revue Internationale de Philosophie*, 2, p. 199-242, 2000.
Consultable à l'adresse : <https://philpapers.org/rec/PATIES>
- [10] C. Meyer, «Les représentations mentales : entre «res» et «flatus vocis»», *Communication, Information médias théories pratiques*, vol. 21/1, p. 9-31, 2001.
Consultable à l'adresse : <http://journals.openedition.org/communication/5445>
- [11] P. Duplessis, «Les conceptions des élèves au centre de la didactique de l'information ?», *In* : 12^e Séminaire du GRCDI Contextes et enjeux de la culture informationnelle, approches et questions de la didactique de l'information, Rennes, p. 17, 2008.
Consultable à l'adresse : https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/sic_01468722
- [12] J.-L. Basdevant, J. Dalibard et M. Joffre, *Mécanique quantique*, Palaiseau : Les éditions de l'École polytechnique, 2002.
- [13] C. Aslangul, *Mécanique quantique : cours*, Louvain la Neuve : De Boeck supérieur, 2016.
- [14] M. Le Bellac, *Le monde quantique*, Les Ulis : EDP Sciences, 2010.
- [15] C. Cohen-Tannoudji, F. Lalœ et B. Diu, *Mécanique quantique*, nouvelle édition, Paris : EDP Sciences, Physique – savoirs actuels, CNRS éditions, 2018.

- [16] E. Hecht, T. Becherrawy et J. Martin, *Physique*, Paris : De Boeck Supérieur, 1999.
- [17] O. Darrigol, «La complémentarité comme argument d'autorité (1927-1934)», *Revue d'histoire des sciences*, 38 (3), p. 309-323, 1985.
- [18] W. Heisenberg, *Physics & philosophy : the revolution in modern science*, London : Penguin, 1989.
- [19] Ph. Collin, «Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement», thèse de doctorat, Paris 7, 1999.
Consultable à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel01275439v1>
- [20] F. Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, Paris : CNRS éditions, 2011.



Alain LE RILLE

Enseignant

Lycée Saint-Louis

Paris