



HAL
open science

“ A la recherche du réel perdu ” ou la pertinence de l’utilisation de la bande dessinée “ Le Mystère du MONDE QUANTIQUE ” dans l’enseignement de la mécanique quantique en Licence. Aspects épistémologiques et enjeux didactiques

Philippe Lautesse, Lionel Chaussard, Juliette Tuillon, Fabrice Ferlin,
Jean-Loup Heraud

► **To cite this version:**

Philippe Lautesse, Lionel Chaussard, Juliette Tuillon, Fabrice Ferlin, Jean-Loup Heraud. “ A la recherche du réel perdu ” ou la pertinence de l’utilisation de la bande dessinée “ Le Mystère du MONDE QUANTIQUE ” dans l’enseignement de la mécanique quantique en Licence. Aspects épistémologiques et enjeux didactiques. Tréma, 2019, 10.4000/trema.5138 . hal-02475824

HAL Id: hal-02475824

<https://hal.science/hal-02475824v1>

Submitted on 12 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

« A la recherche du réel perdu » ou la pertinence de l'utilisation de la bande dessinée « Le Mystère du MONDE QUANTIQUE » dans l'enseignement de la mécanique quantique en Licence. Aspects épistémologiques et enjeux didactiques.

Philippe Lautesse, PU, philippe.lautesse@univ-lyon1.fr

Lionel Chaussard, PU, lionel.chaussard@univ-lyon1.fr

Juliette Tuillon, MCU, juliette.tuillon@univ-lyon1.fr

Fabrice Ferlin, Chercheur associé, fabrice.ferlin@univ-lyon1.fr

Jean-Loup Héraud, Chercheur associé, jean-loup.heraud@univ-lyon1.fr

Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, S2HEP,
38 Bd Niels Bohr 69622 Villeurbanne Cedex, France.

Résumé

Le but de notre étude consiste à discuter d'un enseignement de mécanique quantique en 2^{ème} année de licence, permettant d'aborder les enjeux épistémologiques et ontologiques de la physique quantique au travers de la bande dessinée de Damour et Burniat (2016), *Le Mystère du MONDE QUANTIQUE*. Nous discutons au préalable de la pertinence pour l'enseignement de ce récit de fiction dans le cadre de la théorie des mondes possibles de Lewis, basée sur le principe de contrefactualité. Nous présentons ensuite une analyse en deux temps de cette bande dessinée. Nous proposons dans un premier temps une approche réflexive pour l'enseignement de la mécanique quantique en discutant les concepts de la physique quantique introduits dans la bande dessinée (enjeux épistémologiques) et en analysant différentes interprétations de la mécanique quantique (enjeux ontologiques). Nous présentons dans un second temps une analyse préliminaire d'une séquence de cours portant sur les concepts et interprétations de la mécanique quantique dans laquelle des vignettes de la BD ont été utilisées pour répondre aux questions des étudiants.

Mots clés

Mécanique quantique, Enseignement supérieur, Bande dessinée, Epistémologie, fiction, contrefactuel.

Abstract

The aim of our study is to discuss a teaching of quantum mechanics in second year of university, to address the epistemological and ontological issues of quantum physics through the comic book of Damour and Burniat (2016), *Le Mystère du MONDE QUANTIQUE*. First of all, we present the relevance of this fictional narrative for teaching in the context of Lewis' theory of possible worlds, based on the principle of counterfactual. We then present a two-step analysis of this comic book. Firstly, we propose a reflexive approach to the teaching of quantum mechanics by discussing the concepts of quantum physics introduced in this comic book (epistemological issues) and by analyzing different interpretations of quantum mechanics (ontological issues). In a second step, we present a preliminary analysis of a lecture session on concepts and interpretations of quantum mechanics in which thumbnails of this comic book were used to answer students' questions.

Key words

Quantum mechanics, Higher education, Comic book, Epistemology, fiction, counterfactual

I. Introduction et contexte

Notre groupe de recherche travaille depuis plusieurs années sur l'enseignement de la mécanique quantique (MQ) en terminale scientifique (Lautesse, Vila Valls, Ferlin, Héraud, et Chabot, 2015) en particulier sur l'utilisation de récits de fiction pour cet enseignement (Héraud, Lautesse, Ferlin, et Chabot, 2017). Ces récits peuvent être un support original et motivant pour les élèves (Soudani, Héraud, Soudani-Bani, et Bruguière, 2015). Par ailleurs, Singh, Belloni, et Christian (2006) ont montré que pour une bonne compréhension des phénomènes il n'était pas suffisant d'aborder la MQ uniquement par son formalisme mathématique. En effet, une approche réflexive facilite l'apprentissage de cette nouvelle physique. Dans ce contexte, nous travaillons actuellement sur l'extension de l'utilisation de ces récits de fiction au niveau de la transition enseignement secondaire/supérieur. Nous nous intéressons notamment à l'usage didactique de la bande dessinée (BD) *Le Mystère du MONDE QUANTIQUE* de Damour et Burniat (2016), dont nous avons présenté une analyse lors de la première édition du colloque « Telling Science, Drawing Science¹ » qui s'est déroulé à Angoulême, en 2016. Nous nous proposons dans cette nouvelle contribution d'approfondir notre démarche épistémologique et didactique vis-à-vis de l'utilisation de cette BD dans la perspective d'un enseignement en licence de physique.

Nous formulerons dans un premier temps notre problématique et nous proposerons un cadre théorique permettant d'une part de justifier l'intérêt épistémologique d'un récit de fiction dans un contexte d'enseignement et d'autre part d'éclairer les enjeux ontologiques liés au mystère du « monde quantique qui est le cœur » de la BD. Dans un deuxième temps, nous présenterons notre corpus ainsi que la méthodologie utilisée dans notre contribution. Dans un troisième temps, nous discuterons nos résultats en détaillant tout d'abord les enjeux épistémologiques et ontologiques² tels qu'ils sont abordés dans cette BD. Nous présenterons et analyserons ensuite une séquence d'enseignement de MQ en 2^{ème} année de licence de physique, où une partie réflexive a été proposée aux étudiants, grâce à l'intervention conjointe de l'enseignant et d'un philosophe de la connaissance. Nous avons utilisé une trentaine de vignettes de cette BD comme support à notre séquence d'enseignement.

II. Problématique et cadre théorique

¹ Dans cette première édition, ce colloque n'a pas proposé la publication d'actes.

² L'ontologie est une interrogation philosophique sur la nature et la structure de la réalité. L'épistémologie est la réflexion qui porte sur la construction des savoirs.

Notre objectif était de proposer aux étudiants de deuxième année de licence de physique (L2) une réflexion sur les concepts et interprétations de la MQ, en allant au-delà de la stricte utilisation du formalisme standard à laquelle l'enseignement se cantonne généralement.

Notre démarche est justifiée par le fait qu'aujourd'hui encore, le « mystère » de la MQ n'est pas résolu. En effet, bien que la théorie quantique soit solidement établie depuis maintenant une centaine d'années et que ses succès soient nombreux tant du point de vue de ses résultats que de ses applications technologiques, le monde qu'elle « dessine » pose encore problème et reste en débat, sans qu'une réponse unique ne s'impose.

Ainsi, notre lecture de la BD se centrera principalement autour du questionnement ontologique qui est au cœur de l'exploration historique de la physique quantique par les deux personnages principaux Bob et Rick : la question controversée de la réalité physique que l'on peut attribuer -ou non- à la MQ est en effet l'axe permettant de comprendre les étapes de son développement scientifique. L'histoire de la physique quantique ne se réduit donc pas à l'histoire des progrès de son formalisme mathématique, mais doit intégrer la question du genre de réalité qui peut correspondre à la MQ.

Dans ce contexte, notre groupe de recherche a élaboré un cadre théorique (Héraud et al., 2017), issu de la philosophie analytique, basé sur la théorie des mondes possibles de Lewis³ (1973). Cette théorie s'appuie en particulier sur le principe de contrefactualité, justifiant le recours à des récits de fiction comme levier pour se représenter les phénomènes physiques décrits par la MQ et inaccessibles dans notre monde quotidien.

Rappelons que les phénomènes physiques accessibles dans notre monde quotidien, représentables à notre échelle, sont les phénomènes qui mettent en jeu la physique macroscopique. Pour les étudier on a recours à la physique classique. Les grandeurs qui caractérisent ce monde macroscopique peuvent être mesurées avec des instruments de mesures classiques, tels un thermomètre, un baromètre, un microscope optique, une balance. A contrario, les phénomènes physiques décrits par la MQ ne sont généralement pas représentables à notre échelle. Ils sont décrits par la physique microscopique. Ces phénomènes nous échappent au quotidien. Des instruments de mesures plus complexes, voire des mesures indirectes, tels que le microscope électronique ou les mesures d'absorption de photons par exemple, sont nécessaires pour les mettre en évidence. Ces phénomènes restent la plupart du temps « invisibles » dans notre monde quotidien.

Ainsi, le recours à des récits de fiction est d'autant plus justifié dans le cas de la MQ que ces récits vont proposer un registre ontologique (de réalité possible) dans lequel d'une part les phénomènes non représentables à notre échelle seront figurés par des substituts graphiques ou narratifs, et dans lequel d'autre part la structure d'un monde possible de nature quantique sera construite en cohérence avec les principes et concepts de la MQ.

Notre cadre théorique, qui est utilisé pour justifier de la pertinence de l'utilisation de récits de fiction à des fins d'enseignement scientifique, est construit sur les cinq principes suivants :

a) Principe de contrefactualité

Ce principe, fondateur des mondes possibles, s'énonce dans une proposition qui, pour un fait (ou une loi) contraire au monde actuel, donc faux dans notre monde, établit une conséquence

³ Lewis est un philosophe américain de la deuxième moitié du vingtième siècle. Il fut professeur à l'Université de Princeton. Il est reconnu pour ses contributions majeures en métaphysique analytique et on lui doit la théorie de la pluralité des mondes (ou réalisme modal).

vraie dans un autre monde, appelé monde possible. Dans la BD, ce principe est relatif au fait que la théorie quantique « semble doter le monde microscopique de propriétés surprenantes, comme la délocalisation spatiale ou la superposition de réalités contradictoires ! La théorie quantique remet en cause la vision habituelle du monde macroscopique qui nous entoure » (Damour & Burniat, p.13)⁴

b) Principe de similarité comparative

Le principe de similarité implique une modification *a minima* du monde actuel. Dans la BD, le monde dans lequel évoluent les personnages est un monde possible analogue au notre excepté l'apparition de phénomènes quantiques lors d'expériences de physique à l'échelle macroscopique.

c) Principe de consistance

Ce principe consiste à proposer, dans un récit, une version fictionnelle consistante (c'est à dire non contradictoire) scientifiquement. Ainsi, les lois de la physique du monde possible créé par Damour et Burniat forment un ensemble cohérent.

d) Principe d'accessibilité cognitive

Ce principe consiste en ce que le monde contre-intuitif d'un récit soit intelligible pour un lecteur. Ainsi, le caractère graphique de la BD permet de rendre visibles, sur un registre macroscopique, des phénomènes quantiques, invisibles dans notre monde quotidien.

e) Principe de reconstruction

Ce principe impose de pouvoir reconstruire les lois du monde actuel par confrontation avec les faits du monde possible. Dans le cas de la BD, l'apparition de phénomènes quantiques lors d'expériences de physique à l'échelle macroscopique dans le monde contrefactuel du récit, permet au lecteur de mieux s'appropriier les principales interprétations de la physique quantique.

Notre problématique, au travers du questionnement ontologique qui traverse l'intrigue de la BD, est de discuter la MQ en prenant deux points de vue antagonistes. Le premier considère que la MQ est seulement une physique mathématique, alors que le second considère que la MQ est à la base un monde à part entière. Ainsi, deux postures et interprétations ontologiques principales, logiquement possibles, seront en jeu dans cette BD : soit la MQ est une fiction au sens où elle n'a pas de réalité propre, seul existe le monde de la physique classique comme l'a souligné Bohr⁵, ou bien « Tout est quantique », ce que la posture de Everett⁶ peut justifier⁷. C'est bien là l'objectif de la BD et son parti-pris ambitieux : montrer que le monde quantique, malgré son caractère contre-intuitif à l'égard de notre monde familier n'a rien d'un monde fictif, mais correspond bien à la réalité du monde physique dans son ensemble. C'est ce mystère que la BD aura pour tâche de résoudre.

Comment alors cerner le bénéfice présenté par le recours à cette BD dans un contexte d'enseignement ? Comme nous le verrons par la suite, la BD permettra d'exploiter cette

⁴ Tant qu'il n'est pas observé, un objet quantique n'a pas de position ni d'état déterminés. Il a une probabilité non nulle d'être au même moment à différents endroits (« délocalisation ») et dans plusieurs états (« superposition »).

⁵ Bohr est un physicien danois qui a été un des principaux fondateurs de la théorie quantique dans les années 1920.

⁶ Everett est un physicien américain qui a proposé en 1957 une interprétation de la MQ en termes d'états relatifs, que DeWitt (physicien américain également) reformulera en 1973 en termes d'univers multiples ou multivers.

⁷ A l'image de la BD, nous présentons cette opposition de points de vue entre les deux physiciens de la manière la plus marquée possible. On pourra se reporter à l'ouvrage de Laloë (2017) ainsi qu'aux références incluses dans ce livre, pour une vision plus nuancée et plus approfondie de ces points de vue.

double dimension épistémologique et ontologique dans l'élaboration d'une séquence didactique avec des étudiants de L2.

III. Corpus et méthodologie

1) Corpus

Notre corpus est constitué par la BD *Le Mystère du MONDE QUANTIQUE* de Damour et Burniat⁸ (2016) dont une trentaine de vignettes ont été utilisées lors de la séquence de cours.

L'intrigue de leur BD est centrée sur l'énigme suivante : pourquoi Rick le chien empaillé de Bob, se met-il soudain à revivre, alors qu'il avait été écrasé avec sa combinaison à oxygène par une météorite lors d'une expédition spatiale sur la Lune ? Comment comprendre le mystère d'une telle métamorphose -un chien mort en chien vivant- sans que celle-ci soit pour autant irrationnelle, ni inexplicable, ni relevant du magique ou du fantastique ?

La BD envisage dans ce qu'elle nomme « monde quantique » non pas un voyage imaginaire en immersion dans ce monde mais un voyage rétrospectif dans le temps pour restituer les étapes de formation de la théorie quantique à travers les débats ontologiques et épistémologiques relatifs aux avancées proprement scientifiques. Il ne s'agit pas tant de visiter et décrire un monde quantique de l'intérieur que de conduire un voyage intellectuel dans l'histoire conceptuelle de la physique quantique en utilisant les deux modes de narration, verbal et graphique, pour introduire certains concepts de la MQ (« dualité » onde/corpuscule, superposition des états quantiques...).

Nous n'aurons la réponse qu'au terme de l'aventure dans laquelle Rick va entraîner Bob son maître. Ils vont remonter le temps et partir à la rencontre des physiciens à l'origine des grandes découvertes de la physique quantique. Ils vont alors se trouver dans un autre monde obéissant à des lois physiques sans équivalent dans notre monde quotidien. Il s'agit ici de faire comprendre aux lecteurs ce qui se passe dans un monde possible et qui est incompréhensible à notre échelle.

Le point de départ de ce voyage est la participation de Bob à un colloque de physique quantique (Damour & Burniat, p. 13) suite à l'annonce dans un article de presse de la 25^{ème} édition du célèbre Congrès Solvay à l'hôtel Métropole de Bruxelles. Notons que le titre de l'article est le suivant :

« LE MYSTERE DU MONDE QUANTIQUE

A la recherche du réel perdu »

L'enjeu épistémologique de la BD est alors de faire comprendre aux lecteurs ce qui est « un mystère », incompréhensible selon les repères qui sont ceux de notre connaissance des phénomènes de notre monde quotidien. Il faut pour cela changer de paradigme (Kuhn, 1962) c'est-à-dire révolutionner notre cadre de compréhension intellectuelle en réinterrogeant les concepts d'onde et de particule notamment, et en essayant de dépasser ce qui peut alors faire obstacle (Bachelard, 1940).

Dans ce but, une séquence de cours est proposée aux étudiants afin de leur permettre de discuter des concepts de la physique quantique qu'ils ont étudiés ainsi que des interprétations possibles de la mécanique quantique.

⁸ Thibault Damour est un physicien théoricien français de renommée internationale, récompensé par de nombreux prix (dont la médaille d'or du CNRS ou le prix A. Einstein), et membre de l'Académie des sciences. Il est par ailleurs auteur d'ouvrages de vulgarisation.

Mathieu Burniat est un dessinateur et scénariste belge de bandes dessinées.

2) Méthodologie

Cette séquence a été élaborée et proposée par l'enseignant de cours magistraux (CM) de MQ de L2 et par un philosophe de la connaissance, tous deux impliqués dans le groupe de recherche présenté en introduction.

La promotion est composée de 139 étudiants, 105 dans la mention physique et 34 dans la mention physique chimie. Les étudiants ont été prévenus dès le premier cours du semestre, lors de la présentation de l'UE, de la venue d'un philosophe de la connaissance en toute fin d'année afin d'aborder les questions, d'une part du rôle de l'observateur dans les expériences faites avec des objets quantiques, et d'autre part des interprétations de la mécanique quantique. Ce cours suit une approche historique de la physique moderne. L'objectif de cette UE est de faire prendre conscience aux étudiants de la rupture épistémologique qu'il est nécessaire d'opérer afin de comprendre cette nouvelle physique. Nous n'abordons donc que très peu le formalisme mathématique qui sera principalement utilisé en troisième année de licence dans l'UE spécifique de « Mécanique Quantique ». Quant à l'UE de L2, elle se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre qui porte sur une introduction à la physique statistique, ne sera pas discuté ici. Les deuxième et troisième chapitres sont consacrés à la compréhension de la transition entre la physique classique et la physique moderne. Les expériences fondatrices de la mécanique quantique que sont le rayonnement du corps noir, la variation de la capacité calorifique en fonction de la température et l'effet photoélectrique sont utilisées pour justifier l'introduction de la constante de Planck, h . Le quatrième chapitre concerne à proprement parler l'introduction à la mécanique quantique. L'expérience des doubles fentes de Young est alors utilisée pour montrer le « double aspect » ondulatoire et corpusculaire des photons. En complément de cette expérience des fentes de Young, nous introduisons l'expérience de pensée du chat⁹ de Schrödinger¹⁰ pour aborder le rôle de l'observateur dans les expériences sur des objets quantiques et le difficile passage de la physique quantique à la physique classique, donc des objets microscopiques aux objets macroscopiques. Ces deux expériences sont propices au questionnement ontologique sur les fondements mêmes de la mécanique quantique. Les étudiants posent régulièrement des questions sur l'interprétation que l'on peut donner de ces deux expériences.

Revenons sur le déroulé de cette séquence d'enseignement. Elle a durée 50 minutes et a constitué la dernière partie du troisième CM du quatrième chapitre concernant la MQ. La séquence était prévue comme un échange libre entre les étudiants, l'enseignant de CM et le philosophe. Durant les deux premiers CM de ce chapitre, au fur et à mesure de leur questionnement, il leur a été annoncé la venue d'un philosophe durant un CM, afin qu'ils préparent leurs questions et réflexions.

Pour nous aider à construire cette séquence, nous avons alors décidé d'utiliser la BD *Le Mystère du MONDE QUANTIQUE* comme support didactique. Nous avons construit dix diapositives à partir d'une trentaine de vignettes de la BD concernant les différentes interventions des physiciens portant sur les trois grandes interprétations de la mécanique

⁹ Un chat est enfermé dans une boîte dans laquelle se trouve un atome radioactif qui présente une probabilité égale de désintégration et de non désintégration pendant une durée de référence d'une heure. Si l'atome se désintègre, il actionne un dispositif qui libère un poison volatil qui tue le chat. Tant que la boîte est fermée, la théorie quantique impose que l'atome est dans une superposition d'états « désintégré » et « non désintégré ». Si on poursuit le raisonnement, le chat est donc lui-aussi dans un état de superposition « vivant » et « mort » ce qui est évidemment absurde. Il semble donc exister une contradiction entre les lois de la MQ et celles de notre monde quotidien (macroscopique).

¹⁰ Schrödinger est un physicien autrichien et un des pères fondateurs de la mécanique quantique. Il est à l'origine (en 1926) de l'équation qui porte son nom.

quantique qui seront exposées dans un paragraphe suivant. Ces diapositives ont été construites afin d'être projetées au fur et à mesure de la séance, en fonction des questions posées par les étudiants.

Ces vignettes ont été sélectionnées majoritairement entre les pages 81 et 103 de la BD et sont relatives à l'aspect interprétations de la MQ. Nous précisons ce point dans la partie IV.

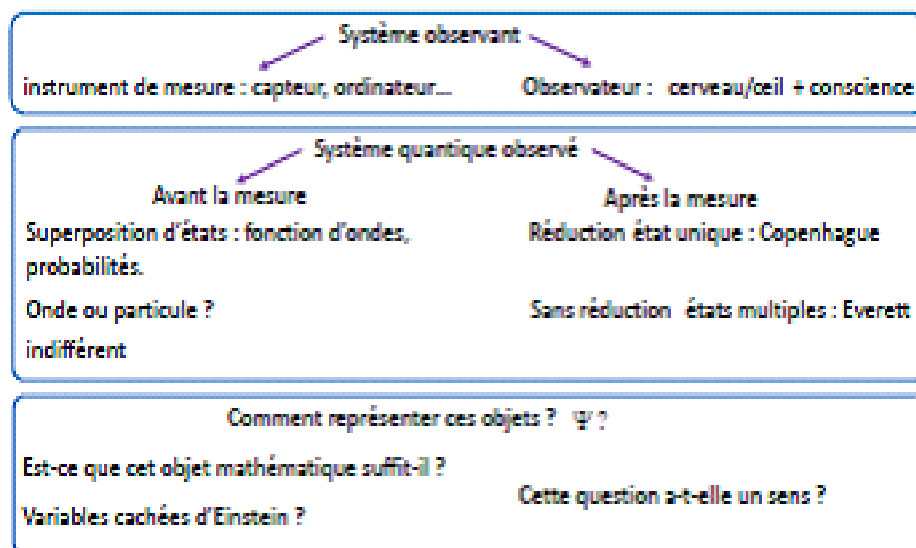
Lors de la séance, il y avait donc deux intervenants, le philosophe de la connaissance et l'enseignant qui intervient en cours habituellement. Avant de donner la parole aux étudiants, l'enseignant a projeté la diapositive de la figure 1 qui est une synthèse des notions abordées dans les deux CM précédents concernant le rôle de l'observateur. Le but est de pouvoir revenir sur la nature de la fonction d'onde $\psi(x,t)$ de l'équation de Schrödinger et sur certaines des interprétations qui en sont faites. Ce transparent a aussi servi de point d'appui pour la discussion avec les étudiants.

IV – Réflexions :

les différentes interprétations de la mécanique quantique

Comment donner une réalité au monde quantique ?

Éléments mis en jeu dans une observation, une mesure : rôle de l'observateur



© utilisation de la BD « Le mystère du monde quantique » T. Damour et M. Burniat

Figure 1 : diapositive d'introduction de la séquence d'enseignement.

Cette diapositive permet à l'enseignant, dans une première approche, de synthétiser les concepts de la physique quantique (onde, particule...) notamment au travers du problème de la mesure tel qu'il a été abordé en cours avec l'expérience des doubles fentes de Young et l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. Dans une seconde approche, et c'est son objectif principal, cette diapositive a permis à l'enseignant de discuter quelques interprétations principales de la mécanique quantique :

- le cas où la fonction d'onde décrit complètement le système conduit à la théorie des états relatifs (Everett, 1957) que DeWitt (1973) reformulera en terme de multivers, ou à l'interprétation dite standard de la mécanique quantique (appelé aussi interprétation de Copenhague, même si ce qualificatif mériterait une plus vaste discussion). Dans la théorie des multivers, DeWitt considère que le formalisme décrit totalement la réalité.

En revanche l'interprétation standard (portée par Bohr, Heisenberg¹¹, et Pauli¹²) correspond à une conception positiviste de la mécanique quantique, selon laquelle la théorie quantique ne décrit pas la réalité, mais permet seulement de connaître les résultats d'opérations de mesure. Dans ce cadre, l'équation de Schrödinger est interprétée en terme de densité de probabilité (interprétation de Born¹³) et elle est probabiliste par essence. L'interprétation standard est celle qui est proposée dans l'enseignement de la mécanique quantique, en France mais aussi dans la plupart des pays.

- Le cas où la fonction d'onde ne décrit pas complètement le système conduit à ajouter des termes supplémentaires dans l'équation de Schrödinger. C'est le cas des théories à variables cachées non locales, dont l'exemple le plus connu est la théorie de Bohm¹⁴ (1952) qui constitue ainsi plusieurs équations et réintroduit l'aspect déterministe, donnant ainsi une alternative aux interprétations probabilistes.

Notons que les interprétations de la MQ sont extrêmement nombreuses¹⁵ et nous avons seulement pris pour exemple celles qui sont le plus fréquemment citées¹⁶ et qui permettent une discussion directe sur la complétude ou non de la fonction d'onde.

Nous avons ensuite présenté l'intrigue de la BD et justifié l'utilisation des vignettes comme support de réponses aux questions et commentaires en faisant l'hypothèse que les vignettes présentées seront une aide pour la compréhension des étudiants lors des réponses à leurs interventions

Suite à ce CM, une question totalement libre, à laquelle les étudiants devaient répondre par écrit dans la semaine qui a suivi la séance, leur a été posée concernant leur impression sur cette séquence didactique : « Pouvez-vous me donner votre avis sur la deuxième partie du cours de vendredi dernier, le 6 avril ? ».

3) Grille de lecture

En amont de la séquence proposée, nous avons défini une grille de lecture *a priori* pour catégoriser les questions des étudiants et leurs commentaires. De notre point de vue, les questions et commentaires que pouvaient proposer les étudiants, suite au cours qui avait été dispensé et compte tenu de ce qu'ils pouvaient potentiellement connaître de manière informelle, peuvent être synthétisés dans une grille de lecture comprenant trois points principaux :

¹¹ Heisenberg est un physicien allemand et un des pères fondateurs de la MQ. Son article fondateur sur la théorie matricielle de la MQ a été publié en 1925.

¹² Pauli est un physicien autrichien connu pour sa définition du principe d'exclusion en MQ, ou principe de Pauli (1925).

¹³ Born est un physicien allemand et un des pères fondateurs de la mécanique quantique. La règle qui porte son nom et donne une interprétation probabiliste de l'équation de Schrödinger a été présentée au congrès Solvay en 1927.

¹⁴ Bohm est un physicien américain qui a notamment repris les travaux de de Broglie (physicien français) pour tenter de réintroduire le déterminisme en mécanique quantique.

¹⁵ On pourra se reporter au chapitre II de Laloë (2017) pour davantage de précisions.

¹⁶ D'autres physiciens ont proposé d'introduire une évolution de type stochastique en introduisant des termes non linéaires dans l'équation de Schrödinger (cette approche n'est pas citée dans la diapositive mais elle constitue néanmoins une des principales interprétations actuelles). C'est le cas de l'interprétation GRW (Ghirardi, Rimini, Weber, 1985, 1986). Un autre aspect important (mais qui ne sera pas non plus discuté) est la théorie de la décohérence (Zeh, 1970). Dans le cas d'un système macroscopique, on ne peut pas négliger l'interaction de ce système avec son environnement. La théorie de la décohérence montre que cette interaction entraîne la disparition des superpositions quantiques.

a/ le premier item est relatif à un questionnement portant sur le caractère « mystérieux » des phénomènes quantiques (contre-intuitifs pour nous car non explicables ou observables à l'échelle du monde empirique, tel l'exemple du chien Rick mort-vivant),
b/ le deuxième item est relatif à une problématisation des concepts propres à la MQ : superposition des états, réduction du paquet d'ondes,
c/ le troisième item est relatif à un enseignement de la MQ, soit complètement centré sur le formalisme en privilégiant donc l'aspect mathématique, soit au contraire ouvert sur les concepts ou principes, et qui n'est donc pas réduit au formalisme de la MQ mais qui aborde aussi les aspects épistémologique et ontologique.

Nous analyserons également les questions posées par les étudiants ainsi que leurs commentaires, lors de cette séquence. Ces questions et commentaires, ainsi que les réponses des intervenants ont été enregistrées. Par ailleurs, suite à la séquence de cours, les étudiants ont été invités à donner leurs impressions, par écrit, sur la séance. Leurs réactions ont également été analysées.

Dans le paragraphe suivant, nous allons d'abord présenter les enjeux épistémologiques et ontologiques de la BD. Nous proposerons ensuite une analyse préliminaire de la séquence d'enseignement lors de laquelle ces enjeux ont été abordés avec les étudiants.

IV. Résultats et discussions

IV.1 Enjeux épistémologiques et ontologiques de la BD

Quelles sont la nature et les propriétés contrefactuelles des objets quantiques ? Cette question que les auteurs de la BD mettent en avant va traverser les débats des fondateurs de la MQ. On va assister avec Einstein¹⁷ d'abord et de Broglie¹⁸ ensuite à un renversement ontologique des positions ancrées dans la science en cours. Einstein va mettre en évidence le caractère corpusculaire de la lumière, de Broglie mettra en évidence les propriétés ondulatoires de la matière que Schrödinger exprimera ensuite mathématiquement en proposant l'équation d'onde qui porte son nom, et qui s'applique à l'ensemble des objets quantiques non relativistes, de masse non nulle : « Un jour j'ai [de Broglie] eu l'idée de renverser la proposition d'Einstein ! Einstein nous dit qu'il faut associer aux ondes lumineuses des PARTICULES. Quant à moi, j'ai proposé d'associer aux particules de matière... des ONDES ! » (p. 50).

Mais de Broglie ne va pas au bout de son intuition ondulatoire qui sera formalisée par Schrödinger.

Cette dualité sera au centre des discussions autour de l'utilisation des fentes de Young pour observer le comportement d'objets quantiques à travers la formation de figures d'interférences.

La question ontologique ainsi ouverte va entraîner de nouvelles aventures pour Bob qui est invité par Schrödinger : « J'ai justement rendez-vous avec certains d'entre eux pour débattre de ce que suggère la physique quantique sur notre réalité... ça promet d'être fort animé !

¹⁷ Einstein fut lui aussi professeur à l'université de Princeton.

¹⁸ De Broglie est un physicien français, et est un des pères fondateurs de la mécanique quantique. Il a en particulier proposé d'associer une onde à chaque « particule de matière » (1924).

Voulez-vous m'accompagner ? » (p. 85). Ces débats auxquels Bob va participer (et même intervenir activement cette fois) feront se confronter quatre postures ontologiques :

- **L'ontologie ondulatoire de Schrödinger**

Emporté par un tourbillon dans le tableau des matrices, s'accrochant à la constante, h , comme à une bouée, Bob est tiré hors de l'eau par Schrödinger qui manifeste tout de suite son opposition de principe à l'idée que la MQ soit sans réalité physique :

« Même si ses résultats mathématiques sont exacts, Heisenberg se refuse à concevoir ce qui se cache derrière. Selon sa théorie, l'infiniment petit est un monde impénétrable et abstrait. J'ai moi-même décidé d'emprunter un autre chemin théorique. » Bob répond : « Vous ... vous avez trouvé une façon plus intuitive pour décrire la physique des atomes ? » (p. 75).

Schrödinger explique à Bob qu'il a mathématisé la notion d'onde proposée par de Broglie et l'a étendue à toute la réalité physique : « A mon sens, il faut tout simplement abandonner l'idée que la matière soit faite de particules ! » (p. 82), « Toutes ces notions, je les remplace par une description purement CONTINUE ET ONDULATOIRE DE LA MATIERE ! [...] J'espère en effet être revenu à une vision déterministe de la physique quantique. » (p. 84). Les deux vignettes relatives à ces citations font partie de celles qui ont été sélectionnées pour la séance de cours. C'est sur ce postulat ontologique que Schrödinger formulera sa célèbre équation d'onde avec la fonction ψ « [...] notation que j'ai choisie pour noter l'onde associée à n'importe quel système matériel. » (p. 79) ; « Aussi étrange que soit cette onde¹⁹ ψ , elle m'a permis d'obtenir une équation qui décrit toute la physique quantique !! » (p. 80), « [...] LA formule qui résout, je l'espère, définitivement le mystère du monde quantique ! » (p. 81). La vignette relative à cette citation est l'une de celles qui ont été sélectionnées pour la séance de cours.

« [...] mon formalisme permettait de retrouver les tableaux infinis de Heisenberg » (p. 84). Notons que Schrödinger est en conflit avec certains de ses contemporains sur son ontologie ondulatoire et son épistémologie déterministe.

- **Il n'y a pas d'interprétation ontologique**

L'école de Copenhague rejette toute interprétation ontologique spécifique de la théorie quantique. Born, en particulier, exclut l'interprétation ondulatoire de l'objet quantique : « J'en déduis donc que l'électron s'est manifesté sous la forme d'une PARTICULE LOCALISEE dans l'espace... et non sous la forme d'une onde qui serait étalée sur tous les détecteurs ! » (p. 94). Bob, qui comprend maintenant les enjeux relatifs aux différentes postures ontologiques objecte à Born, que ce dernier ne réfute pas l'équation de Schrödinger mais s'oppose à l'interprétation exclusivement ondulatoire qu'en a faite son auteur : « Mais alors, que nous dit cette équation sur la réalité ? Car enfin, elle met bien en jeu une onde ψ » (p. 95). A quoi Born répond « c'est une onde de PROBABILITES. » (p. 96). La vignette relative à cette citation est l'une de celles qui ont été sélectionnées pour la séance de cours. Born rejette la formulation déterministe de l'équation de Schrödinger pour l'interpréter mathématiquement sous une forme probabiliste.

Le questionnement ontologique est-il superflu et dénué de sens ? A la recherche insistante de Bob sur « la nature de la réalité quantique », Bohr répond « Jeune homme, c'est le genre de question qu'il ne faut pas poser » (p. 98), « Eh bien, je pense qu'il n'y a pas de réalité quantique objective ... Seuls existent les résultats des observations, faites par des appareils que l'on peut décrire par les lois habituelles du monde classique ! Il ne faut pas essayer de

¹⁹ Notons que cette onde est décrite dans un espace à $3N$ dimensions (N étant le nombre d'objets quantiques considérés) appelé espace de configurations et non dans l'espace tridimensionnel ordinaire.

savoir sous quelle forme est l'électron, avant qu'il ne se révèle dans un détecteur !» (p. 100). Les vignettes relatives à ces citations font partie de celles qui ont été sélectionnées pour la séance de cours.

Autrement dit il faut s'en tenir dans l'interprétation des lois scientifiques, aux phénomènes qu'elles permettent de prédire et d'observer, sans vouloir rechercher l'essence cachée du monde physique.

S'il n'y a donc pas de réalité quantique, il faut en revenir aux images classiques d'onde et de corpuscule pour décrire les phénomènes quantiques que nous pouvons observer soit sous forme de corpuscule soit sous forme d'onde, en accord avec le principe de complémentarité (p. 99) qui sera énoncé par Bohr.

- **L'incomplétude ontologique du monde quantique**

Entérinant la déception de Bob sur le fait que « ces messieurs [de l'école de Copenhague] nous disent que la physique quantique n'a rien à nous apprendre sur la réalité de l'Univers » (p. 102), Einstein rejette le positivisme et maintient la légitimité du questionnement ontologique : « Bohr et Born ne cessent de considérer tout questionnement sur la réalité quantique comme une hérésie à combattre ! [...] Cette philosophie positiviste est absurde ! » (p. 102). « Born nous dit que la physique quantique est fondée sur le hasard... Mais pour moi, Dieu ne joue pas aux dés ! » (p. 102) (la vignette relative à cette citation est l'une de celles qui ont été sélectionnées pour la séance de cours).

« Mais alors... selon vous, qu'est-ce que la théorie quantique nous dit sur le monde réel ? » demande Bob à Einstein. Ce dernier répond : « Je ne sais pas... le problème reste très mystérieux à mes yeux. » (p. 103).

Selon Einstein, la théorie est incomplète dans son état actuel : « Cependant, elle [la formule de Schrödinger] nous donne une vision incomplète de la réalité » (p. 103). La vignette relative à cette citation est l'une de celles qui ont été sélectionnées pour la séance de cours.

Une nouvelle interprétation ontologique serait-elle alors à concevoir ?

- **L'ontologie des « mondes multiples » d'Everett**

La dernière rencontre de l'album est celle d'Everett qui passe en revue critique la divergence des positionnements ontologiques soutenus par les scientifiques de la MQ dans la vignette (p. 110) qui résume l'ensemble du périple effectué, à partir de l'exigence ontologique posée par Einstein contre l'Ecole de Copenhague : « Il ne faut jamais renoncer à essayer d'avoir une description objective du monde ! » (p. 110). Everett tente de combiner les acquis de ces différentes positions en proposant une nouvelle interprétation. Ainsi, l'expérience de pensée du chat de Schrödinger sera jouée par le chien Rick dans la BD, avec les risques que cela comporte : le trouver mort lorsqu'on ouvrira l'enceinte dans laquelle on va répéter l'expérience mortelle. Everett ajoute comme Schrödinger « La fonction d'onde est comme le génie d'Aladin. Une fois qu'elle sera sortie de la petite bouteille du monde atomique, elle envahira le monde macroscopique de sa nébulosité ! » (p. 115). On voit en effet Rick à la fois mort et vivant dans son enceinte, de deux couleurs différentes.

C'est une fiction que rend possible le graphisme de la BD, pouvant représenter des situations contradictoires que l'on ne peut rencontrer dans la vie réelle. « C'est cette même absurdité que Schrödinger voulait dénoncer en proposant l'expérience que nous venons de réaliser. » (p. 116).

Nos deux protagonistes demandent à Everett sur cette base qu'ils ont eux-mêmes acquise de « ... RESOUDRE LE MYSTERE DU MONDE QUANTIQUE ! » (p. 112).

Si les états de superposition existent pour les objets macroscopiques, comment expliquer qu'on ne les voit pas ? C'est que la fonction d'onde décrit mathématiquement l'ensemble des

configurations possibles, auxquelles sont associées des nuances de couleurs différentes, plus ou moins intenses en fonction de leur probabilité de se produire. « La réalité est un peu comme un film fait de la surimpression de plusieurs sous-films sur la même pellicule. » (p. 121). A la remarque de Bob selon laquelle tout cela n'est que de la fiction : « Vous n'avez pas l'air de comprendre...Ce qui se passe sous vos yeux est bien réel!! C'est là que réside ma découverte! » (p. 122). « Chacune de ces configurations existe réellement, sans être « consciente » l'une de l'autre ! » (p. 122).

Everett radicalise la conception du monde quantique de Schrödinger en lui trouvant une issue logique pour ce qui concerne le monde macroscopique. « Chaque configuration [...] n'est consciente que de l'environnement avec lequel elle interagit... » (p. 123), « c'est un peu comme les ondes émises par des stations radio différentes... » (p. 124). « Tu as compris, Bob ! Il existe une autre surimpression de la réalité, où j'ai bien été tué par le gaz. Dans cette réalité, tu dois être en train de pleurer sur ma misérable dépouille. » (p. 126). La vignette relative à cette citation est l'une de celles qui ont été sélectionnées pour la séance de cours.

Voilà l'énigme du départ résolue, celle de deux mondes qui coexistent, mondes générés par le fait que le météore s'écrase ou non sur Rick lorsqu'il se trouve en mission sur la Lune. Il y a de façon complémentaire un monde dans lequel le météore ne s'écrase pas sur Rick, et où le chien rentre vivant sur Terre et un monde dans lequel Rick est écrasé par le météore et meurt.

On peut alors conclure que le monde quantique est une surimpression de réalités multiples.

Finalement, « ...LE MONDE QUANTIQUE EST PARTOUT ! » (p. 124), veut dire deux choses : En premier lieu, « Le monde quantique est un monde multiple fait de la superposition de réalités classiques différentes ! » (p. 126). En second lieu, « Cette superposition de réalités [...] s'étend à tout l'Univers, y compris l'Univers lointain des galaxies! » (p. 127).

Cette présentation des enjeux épistémologiques et ontologiques de la BD, justifie la pertinence de l'utilisation de cette BD dans un contexte d'enseignement. En particulier, le récit de Damour et Burniat s'articule bien avec le cours dispensé aux étudiants de L2 sur la physique microscopique (voir figure 1). Cet enseignement permet en effet de susciter une réflexion sur ce qu'est la fonction d'onde (signification physique, complétude, problème de la mesure, superposition...) en proposant une ouverture sur des interprétations possibles. La BD, au travers de l'histoire conceptuelle de la MQ et de certaines de ses interprétations, peut justement permettre aux étudiants de recentrer leur réflexion sur la nature de la fonction d'onde. Nous allons maintenant nous intéresser aux questions et commentaires des étudiants.

IV. 2 Analyse des commentaires et questions des étudiants pendant la séance

Rappelons que cette séquence de 50 minutes a été élaborée et conduite conjointement par l'enseignant de physique et par un philosophe de la connaissance. L'objectif du philosophe est de faire émerger chez les étudiants une prise de distance critique sur la signification des concepts de la MQ enseignés, au-delà ou en complément de leur expression mathématique, sans imposer une présentation détaillée des interprétations auxquelles elle a donné lieu. Le tableau synthétique (figure 1) sert de cadre pour susciter les questions et commentaires des étudiants.

Concernant les vignettes, l'enseignant s'appuie sur une vignette du début de la BD pour relier l'énigme de l'intrigue (le sort du chien Rick) au « mystère du monde quantique », la résolution de celui-ci apportant une solution à celle-là :

« Dans la première image du livre, Rick, le chien de Bob meurt. Bob est inconsolable de la mort de son chien. Puis, Bob est « projeté » au début du XX^{ème} siècle et va ainsi traverser l'histoire de la MQ. Il va rencontrer la plupart des physiciens qui ont apporté des contributions majeures sur le sujet et discuter avec eux. La constante, h , fondamentale de la MQ, accompagne également Bob dans ses pérégrinations. A la fin de l'histoire, Bob comprend que le monde dans lequel son chien est mort n'est qu'un des mondes possibles et donc il peut en exister d'autres où il continue à vivre. Nous pourrions discuter cette interprétation de la MQ que propose le livre, celui des univers multiples. »

Comment expliquer que Rick, le chien (empaillé) mort dans notre monde, puisse revivre dans un monde gouverné par les lois la physique quantique ?

Les étudiants ont posé une quinzaine de questions et fait des commentaires. Deux grands sujets ont été abordés du point de vue d'une réflexion philosophique, celui des mondes multiples d'Everett sous-tendu par le problème de la réduction du paquet d'ondes par l'observation, et celui de la place des mathématiques dans la MQ, sujets encore en débat pour lesquels aucune réponse définitive n'est apportée à ce jour. Dans les deux cas on retrouve bien le questionnement ontologique sur la nature de la fonction d'onde $\psi(x,t)$ et sur le statut des états de superposition régis par l'équation de Schrödinger.

Nous allons discuter ces questions et commentaires en fonction de la grille de lecture définie *a priori* lors de notre lecture de la BD.

Pour cette analyse, nous reprenons les trois items de notre grille :

a/ le premier item porte sur le questionnement relatif au caractère « mystérieux » des phénomènes quantiques, contre-intuitifs car non explicables ou observables à l'échelle de notre monde quotidien.

Sur les 15 interventions, aucune n'est véritablement relative à cet aspect mystérieux ou contre-intuitif : le terme « contre-intuitif » n'est cité qu'une seule fois. Comme on le verra dans l'item c/, certains étudiants pensent que « la » solution consiste à s'intéresser uniquement à l'aspect mathématique de la MQ, c'est-à-dire à son formalisme et non à son ontologie de l'objet quantique. Notons que l'expérience des doubles fentes de Young, ou l'expérience de pensée du chat de Schrödinger ont été l'objet de cours précédents, ce qui peut contribuer à atténuer l'effet « mystérieux » de la physique quantique.

b/ le deuxième item porte sur la problématisation des concepts propres à la MQ : superposition des états d'un système quantique, associée à l'énigme de la réduction du paquet d'ondes au moment de la mesure.

Davantage de questions abordent en effet l'expérience des doubles fentes de Young et sur cette base le problème de la réduction du paquet d'ondes. Ces aspects ayant été exposés en cours, plusieurs étudiants abordent ce problème du côté de la non réduction et de ses conséquences sur l'ontologie de la physique quantique. Dans l'intervention 3, l'étudiant demande : « ...il y aurait combien de mondes, une infinité de mondes différents, ou ça serait...? ». Trois autres interventions (1, 10 et 11) portent sur l'existence de mondes multiples

bien séparés avec un observateur par univers : « Les univers, pardon, oui, voilà c'est pour dire [...] qu'y a aucune observation possible entre eux en fait, aucune preuve tangible de ça... »

Des étudiants veulent comprendre au-delà du constat, les raisons et/ou les conséquences du phénomène de réduction. Ainsi dans l'intervention 3, l'étudiant poursuit : « Mais justement, avec la réduction du paquet d'ondes, ce que je ne comprends pas, c'est ce que devient l'énergie associée aux autres... ». Plus surprenante encore, est l'intervention 7, qui relie-la réduction du paquet d'ondes à la conscience : « Le rôle de la conscience. Est-ce qu'on ne serait pas avec la réduction du paquet d'ondes à la limite de l'intelligible en fait ? [...] Est-ce qu'on n'atteint pas une limite par rapport à la conscience ? »

On relèvera la pertinence d'une telle question, redoutable du point de vue philosophique : elle ouvre une perspective épistémique, celle de savoir si ce sont les structures de la conscience humaine qui formateraient la connaissance des phénomènes quantiques. Il convient de noter que l'aspect « réduction du paquet d'ondes par la conscience », cher à Von Neumann²⁰ (1932) mais aussi à Wigner²¹ (1967), n'a pas été du tout abordé au cours de cette séance, et n'est pas non plus présent dans la BD, mais reste un problème important en physique quantique.

c/ le troisième item est relatif à un enseignement de la MQ, soit complètement centré sur le formalisme en privilégiant donc l'aspect mathématique, soit au contraire ouvert sur les concepts ou principes, qui ne soit pas réduit au formalisme de la MQ mais qui aborde aussi les aspects épistémologique et ontologique.

Les questions posées relatives à cet item sont également très surprenantes et instructives. Les aspects ontologiques ne sont pas vus comme complémentaires au formalisme mathématique, mais plutôt en opposition. Les mathématiques se suffisent à elles-mêmes et point n'est besoin d'interprétations, affirme l'étudiant lors de l'intervention 8 : « C'est juste, l'interprétation elle apporte rien, y'a le niveau purement physique, comme vous l'avez dit pour les forces, ça a beau paraître contre-intuitif les maths sont là, elles fonctionnent, elle continuent, donc ce que vous disiez à l'instant, ça peut juste bloquer dans le pire des cas, au mieux ne rien faire, mais l'interprétation... » Seules les mathématiques peuvent nous apporter la solution, le reste sont des spéculations intellectuelles.

Les progrès de la théorie quantique n'ont été réalisés que grâce aux équations successives établies par différents physiciens, en partant d'une théorie non relativiste (Schrödinger) à des théories relativistes (Klein-Gordon, Dirac) selon l'étudiant lors de l'intervention 6. En tout état de cause, seuls les formalismes sont à considérer pour cet étudiant : « ...je vois qu'on utilise un peu les équations de Schrödinger, et tout ça mais par contre on sait très bien que les équations de Schrödinger partent d'un avis classique, [...] Il faut regarder du côté de Dirac, Klein-Gordon. Je ne sais pas pourquoi on parle de Schrödinger tout le temps... ».

Un autre aspect concerne les interventions relatives à l'ontologie des univers multiples d'Everett : d'une part, la question de savoir s'il y a une démonstration mathématique (1) : « C'est par rapport aux états multiples, ça se démontre mathématiquement ou peut-être autrement, est-ce que c'est une hypothèse simplement ou est-ce que ça a été démontré d'une manière quelconque ? » ou d'autre part s'il y a une preuve expérimentale (10) « ... y a aucune

²⁰ Von Neumann est un physicien américano-hongrois et un des pères fondateurs de la mécanique quantique. Il fut professeur à Princeton, où il repose, pas très loin de Lewis.

²¹ Wigner est un physicien américano-hongrois. Il fut professeur à Princeton.

observation possible entre eux en fait, aucune preuve tangible de ça. [...] on pourra jamais prouver qu'il existe différents univers. »

Un étudiant revient vers la fin de la séquence sur la difficulté à comprendre et à se représenter l'ontologie de la MQ. Pourquoi l'ontologie du monde quantique nous reste mystérieuse ? On remarquera la pertinence de son argumentation (suite de l'intervention 8) :

« ...Mais est-ce qu'on ne peut pas se dire que ces questions d'interprétations sont plutôt du domaine de la métaphysique, ou pourquoi c'est plus difficile pour nous d'imaginer un objet quantique, alors que pour nous c'est très facile d'imaginer une particule ou une onde, et même une force, alors que de manière objective, est-ce qu'une force, une particule, une particule classique a plus de raison d'exister qu'un objet quantique ? Nous, on est né dans un monde qui est quand même classique, avant qu'on soit là, on n'a pas expérimenté la MQ. »

Au fur et à mesure de ces interventions, l'enseignant projette les vignettes de la BD en rapport avec la nature des interventions relatives soit aux états de superposition, soit à l'interprétation des univers multiples où le graphisme prend toute sa pertinence, à la fois synthétique et explicite par sa nature visuelle. En effet, dans cette séquence, les vignettes ont été utilisées comme illustration et clarification des événements caractéristiques de la MQ, sur un autre registre que verbal. Tel est le cas par exemple de la dernière vignette de la BD, représentant le chien Rick à la fois, mort et vivant sur la Lune, sous la modalité de deux couleurs, pour marquer la séparation de mondes parallèles exemplifiant les états de superposition.

Nous allons présenter maintenant notre analyse des commentaires écrits par les étudiants à la suite de la séquence.

IV. 3 Présentation des réponses écrites des étudiants à l'enseignant de physique

Une question totalement libre concernant leur impression sur cette séance didactique leur a été posée : « Pouvez-vous donner votre avis sur la deuxième partie du cours de vendredi dernier, le 6 avril ? »

Sur les 139 étudiants inscrits à cette UE, 120 suivent régulièrement les enseignements. 90 étudiants environ étaient présents à cette séance d'enseignement et nous avons eu 71 réponses, ce qui rend ce retour significatif. Certaines réponses détaillées ci-dessous s'inscrivent dans plusieurs thèmes, ce qui fera un total supérieur à 71.

IV. 3. 1. Réactions des étudiants concernant la séance de cours

12 étudiants ont juste signifié que cela était « intéressant » et 4 que l'on perdait son temps à se poser ce genre de questions. 30 étudiants ont apprécié d'avoir une ouverture, avec un enseignant d'une autre discipline, pour les amener à réfléchir sur ces questions fondamentales et aux limites que comportent ces théories. Voici un exemple de commentaire : « Très intéressant, je suis sortie du cours avec beaucoup plus de questions que j'en avais avant de venir. Maintenant je suis plus intéressée par le sujet. »

14 ont déclaré être trop novices pour pouvoir profiter pleinement de cette séquence. Certains indiquent qu'ils auraient aimé une conférence à part entière ou *a minima* une présentation des différentes interprétations afin de pouvoir mieux apprécier ces échanges : « Un résumé rapide

des concepts historiques et propositions d'explications par les différents physiciens serait utile pour apprécier la discussion/débat. »

5 étudiants ont indiqué être satisfaits de pouvoir aborder la MQ sans mathématiques.

Enfin, une quinzaine de réponses porte sur différents domaines comme la durée de la séquence, la pertinence du sujet, des intervenants et du type d'enseignement, le lien avec le cours et la durée des prises de parole des intervenants.

IV. 3. 2. Réactions des étudiants concernant l'utilisation de la BD

5 étudiants sont revenus sur le support visuel proposé avec la projection des vignettes de la BD au fur et à mesure de la séquence, en fonction des questions posées. « Le support (la BD) était assez ludique. », « J'ai bien aimé lire les quelques extraits de la BD qui expliquaient bien les différentes interprétations. », « J'ai aussi été très intéressée par la BD "les mystères du monde quantique" qui semble être un bon moyen d'aborder cette matière. »

« J'aurais préféré une vraie partie "cours", avec la vision qu'ont les philosophes sur les sciences, basée sur la BD (qui est vraiment bien faite, et qui nous aide à se représenter les idées) et seulement dans un second temps, plus court, des questions. »

« J'ai vraiment trouvé que c'était un cours très intéressant. Il y avait beaucoup de discussions, et cela faisait vraiment penser à tout le monde, et toutes les questions quantiques qui font mal à la tête. J'ai bien aimé le livre (la BD) qu'on a regardé, et j'ai bien aimé cette expérience de grande discussion en CM, surtout avec un thème avec beaucoup d'interprétations différentes, et avec beaucoup des gens qui pensent différemment. »

IV. 3. 3. Réflexions préliminaires sur le retour des étudiants

Uniquement 5 étudiants sont revenus sur l'utilisation de la BD. On note qu'ils ont apprécié ce support et que pour un étudiant, cela l'a aidé à suivre les échanges. En fonction des autres réponses, nous estimons que cette séquence a bien fonctionné. Cette expérience est donc à renouveler, et à améliorer afin que le maximum d'étudiants puisse suivre ces échanges. L'utilisation de cette BD, pour faire une petite introduction sur le sujet, avec des points de repère tout au long des échanges, est envisagée.

Le côté ontologie et la présence d'un philosophe de la connaissance s'est avérée constructive. D'une part, les interprétations ont passionné un bon nombre d'étudiants même si une minorité préfère ne s'intéresser qu'au formalisme pur et dur. D'autre part, le support de la BD a été considéré comme ludique mais également comme une aide à la compréhension. Il y a certes une minorité d'étudiants qui ont évoqué la BD mais tous l'ont fait en terme positif.

Le fait qu'une minorité d'étudiants commentent la BD comme support à la discussion et à la compréhension de la MQ semble venir du fait que les vignettes n'ont été montrées qu'en réponse aux questions, et non introduites comme support d'un cours magistral de MQ.

Un étudiant fait d'ailleurs explicitement remarquer qu'il serait judicieux de présenter la BD avec ses enjeux comme complément de cours et de proposer une discussion ensuite.

V. Conclusion et perspectives

Notre article a permis d'une part de présenter les aspects épistémologiques et ontologiques ainsi que les enjeux didactiques de l'utilisation d'une BD dans l'enseignement de la mécanique quantique. L'analyse que nous avons faite permet de préciser le statut de cette BD dans la fonction éducative que nous voulons lui faire jouer. La BD n'est pas étudiée comme objet littéraire, sans cependant négliger sa fonction heuristique émanant de sa dimension narrative (dans le rapport du graphisme au texte). En faisant le choix de certains épisodes-clés nous pouvons montrer que cette BD ne se réduit pas à une fonction d'illustration documentaire, mais est aussi un support original pour faire entrer ses lecteurs dans la logique du monde quantique (ni magique, ni irrationnelle), au sens où sa « compréhension » exige le bouleversement des cadres de pensée par lesquels nous nous représentons notre monde physique.

D'autre part, notre article a également permis de présenter une première approche relative à une séquence de cours où l'épistémologie et l'ontologie de la MQ ont été abordées de manière à la fois ludique (BD) et originale (intervention d'un philosophe de la connaissance). Ce type de discussion a été apprécié par la grande majorité des étudiants, aussi bien sur la forme que sur le fond. Les rares critiques négatives, regrettant que l'on ne s'intéresse pas en cours exclusivement au formalisme sont également riches d'enseignements. Bien que depuis 2012, en terminale scientifique, les concepts soient privilégiés et notamment dans les chapitres d'introduction à la MQ qui a fait sa réapparition dans les manuels cette année-là, certains étudiants semblent continuer à privilégier une conception bohrienne de la MQ, proche du positivisme. Sans doute les enseignements de physique dans le secondaire et le supérieur et une certaine continuité dans l'inductivisme, au moins jusqu'au niveau licence, ne sont-ils pas étrangers à cette posture ? Cette constatation nous semble justifier que l'on essaie de développer le sens critique des étudiants, et les faire réfléchir à la fois sur les concepts, dans la continuité de la terminale scientifique, et sur les questions d'interprétations de la MQ comme les intervenants l'ont fait lors de cette séquence de cours.

Néanmoins, la grande majorité des étudiants s'est intéressée à l'ontologie de la MQ à travers ses interprétations ou plutôt celle dominante dans la BD de Damour et Burniat, concernant les univers multiples. Bien que la BD n'ait été que peu utilisée dans cette séance, les retours quant à sa pertinence et son aspect ludique, ainsi que l'étude épistémologique que nous avons faite de ce support, nous incitent à vouloir approfondir le travail initié.

Les enjeux épistémologiques et ontologiques de la MQ ont donc permis d'interroger les savoirs dans ce domaine chez la grande majorité des étudiants. Nous envisageons, pour la suite de notre recherche, de construire un enseignement où la bande dessinée sera utilisée en exploitant toute sa richesse scientifique et sa palette graphique lors de prochaines séances de cours de physique microscopique de la deuxième année de licence.

Bibliographie

Bachelard, G. (1940). *La philosophie du non : essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*. PUF.

Bohm, D. (1952). A suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables I. *Physical Review*, 85(2), 166-179.

Damour, T., Burniat, M. (2016). *Le Mystère du MONDE QUANTIQUE*. Paris : Editions Dargaud.

- DeWitt, B. & Graham, N. (1973). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton Series in Physics, Princeton University Press.
- Everett III, H. (1957). On the foundations of quantum mechanics. Ph.D.thesis, Princeton University.
- Ghirardi, G.C., Rimini, A., and Weber, T. (1985). *A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems*. In L. Accardi et al. (eds), *Quantum Probability and Applications*, Berlin, Springer.
- Ghirardi, G.C., Rimini, A., and Weber, T. (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review*, D. 34, 470.
- Héraud, J.L., Loutesse, P., Ferlin, F., Chabot, H. (2017). Representing the quantum object through fiction in teaching: ontological contribution of Gamow's narrative as part of an introduction to quantum physics. *Science & Education*, 26 (3-4), 299-322. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9890-6>.
- Kuhn, T. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. The University of Chicago Press. Trad. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Seconde édition, Flammarion.
- Loutesse, P., Vila Valls, A., Ferlin, F., Héraud, J.L., Chabot, H. (2015). Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France. *Science & Education*, 24 (7-8), 937-955. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9755-9>.
- Laloé, F. (2017). *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* EDP Sciences/CNRS Editions.
- Lewis, D. (1973). *Counterfactuals*. Cambridge: Harvard University Press.
- Paty, M. (1981). Nouveaux voyages au pays des quanta. Dans Hoffmann, B., et Paty, M. *L'étrange histoire des quanta*. Paris : Editions du Seuil.
- Singh, C., Belloni, M., Christian, W. (2006). Improving students' understanding of quantum mechanics. *Physics today*, 59, 8, 43. <https://doi.org/1.2349732>.
- Soudani, M., Héraud, J.L., Soudani-Bani, O., Bruguière, C. (2015). Mondes possibles et fiction réaliste. Des albums de jeunesse pour modéliser en science à l'école primaire. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (11), 135-160. <https://doi.org/10.4000/rdst.1013>.
- Von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen des Quantenmechanik*. Berlin, Springer. Trad. Anglaise (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton, Princeton University Press. Trad. française (1992). *Fondements mathématiques de la mécanique quantique*. Ed. Jacques Gabay.
- Wigner, E. P. (1967). *Symmetries and Reflections, Scientific essays of Eugene. P. Wigner*. Bloomington & London, Indiana University Press.
- Zeh, H. D. (1970). On the interpretation of measurement in Quantum Theory. *Foundations of Physics*, 1, 69-76.