



Enseigner la physique quantique en Terminale scientifique en France. L'objet quantique, une référence problématique

Philippe Lautesse, Adrien Vila Valls, Karine Bécu-Robinault, Hugues Chabot, Fabrice Ferlin, Jean-Loup Heraud, Philippe Lo Bello

► To cite this version:

Philippe Lautesse, Adrien Vila Valls, Karine Bécu-Robinault, Hugues Chabot, Fabrice Ferlin, et al.. Enseigner la physique quantique en Terminale scientifique en France. L'objet quantique, une référence problématique. 8ème rencontres scientifiques de l'Association pour la Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies, Mar 2014, Marseille, France. ESPE - Université Aix-Marseille, 18 (1), pp.323, 2014. <halshs-00971372>

HAL Id: halshs-00971372

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00971372>

Submitted on 3 Apr 2014

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.

Enseigner la Physique Quantique en Terminale scientifique en France. L'objet quantique, une référence problématique.

Philippe Lautesse¹, Adrien Vila Valls², Karine Bécu-Robinault³,
Hugues Chabot⁴, Fabrice Ferlin⁵, Jean-Loup Héraud⁶,
Philippe Lo Bello⁷.

¹S2HEP - EA 4148 (Université Lyon 1, ENS de Lyon)

philippe.lautesse@univ-lyon1.fr

²S2HEP- EA 4148 (Université Lyon 1, ENS de Lyon)

adrien.vila-valls@univ-lyon1.fr

³S2HEP- EA 4148 (Université Lyon 1, ENS de Lyon – IFE)

Karine.Robinault@ens-lyon.fr

⁴S2HEP - EA 4148 (Université Lyon 1, ENS de Lyon)

hugues.chabot@univ-lyon1.fr

⁵S2HEP - EA 4148 (Université Lyon 1, ENS de Lyon)

ferlin@math.univ-lyon1.fr

⁶S2HEP - EA 4148 (Université Lyon 1, ENS de Lyon)

jean-loup.heraud@univ-lyon1.fr

⁷Haute Ecole Pédagogique Vaud

philippe.lo-bello@hepl.ch

Résumé

Depuis 2012, la physique quantique est de nouveau enseignée dans les classes de Terminale scientifique en France. D'un point de vue épistémologique, un problème majeur pour comprendre la physique quantique est celui de la référence à l'objet quantique. Nous avons identifié, à travers l'histoire conceptuelle de la physique quantique, deux postures épistémologiques : une posture que nous qualifions de conservatrice (liée à "l'école de Copenhague") et une autre que nous qualifions de novatrice (associée aux travaux de M. Bunge et J.M. Lévy-Leblond). A partir d'une analyse épistémologique des manuels scolaires, nous discutons de l'importance de ces deux postures. Nous faisons l'hypothèse que la mise en évidence de ces deux épistémologies, qui semblent rester dans le domaine de l'implicite, peut apporter aux enseignants des éléments leur permettant une distance réflexive sur les racines historiques et épistémologiques de la physique quantique. Cette analyse nous paraît être un préalable indispensable au développement et la mise en œuvre de séquences d'enseignement concernant ce domaine de la physique.

Mots clés

physique quantique – épistémologie – objet quantique – manuels scolaires – quanton – dualité onde-particule

Abstract

French official curricula ask upper secondary school teachers to teach quantum physics since 2012. From an epistemological point of view, one of the main problems to understand quantum physics is related to the quantum object reference. On the basis the historical construction of quantum physics, we identified two epistemological postures: the first one is referred as conservative (close to the so-called "Copenhagues' school") and the second one as innovative (associated with Bunge's work and Levy-Leblond). Once these postures defined, we analyze French textbooks used by teachers, in order to reveal the implicit adopted postures. We draw the hypothesis that highlighting the implicit epistemological choices can help the teachers to reflect upon the historical and epistemological roots of the quantum physics. Such an analysis forms an important basis for developing and implementing teaching sequences concerning quantum physics.

Key words

quantum physics – epistemology – quantum object – physics textbooks – quanton – wave-particle duality

Introduction : objectifs et problématique

L'objectif de notre travail est d'effectuer une étude épistémologique relative à la partie correspondant à l'introduction de la Physique Quantique (PQ) dans les manuels scolaires de Terminale scientifique (Programmes 2012). Cette analyse constitue la première étape d'une recherche plus vaste dans laquelle nous effectuerons un travail d'analyse des pratiques des enseignants associées aux activités d'études des élèves. Ce travail est une des facettes du groupe de recherche¹ pluridisciplinaire constitué autour de la PQ dans notre laboratoire « Sciences, Société, Historicité, Education, Pratiques » (S2HEP) à Lyon, et qui va aborder les problèmes liés à l'enseignement de la PQ en Terminale scientifique en France sous d'autres angles dont celui des récits de fiction qui pourraient permettre de s'intéresser non seulement aux enseignements dispensés en classe de physique mais aussi à ceux des cours de philosophie avec des enseignants ayant une formation de philosophie des sciences.

L'intérêt pour les questions relatives à l'enseignement et l'étude de la physique quantique trouve son origine dans son introduction officielle en 2012, dans le programme de Terminale scientifique en France. En rupture avec les théories classiques, cette partie de la physique présente des caractéristiques singulières. La tâche des professeurs de lycée est d'autant plus délicate que la PQ est peu présente dans leur formation standard (Concours externe du CAPES, 2013). Or, si le contenu de la partie qui lui est consacrée n'est pas plus complexe sur le plan mathématique que le reste du programme, il nécessite néanmoins l'adoption de stratégies didactiques dont les enseignants doivent avoir conscience, en les reliant à leurs fondements épistémologiques. Une des difficultés à opérer des choix informés sur cet enseignement peut se traduire pour les enseignants dans la diversité du vocabulaire désignant les objets même de la physique quantique.

De tous les aspects que recouvre l'enseignement de la PQ, le problème de la référence de la théorie, à savoir le type d'objets physiques auxquels la théorie se réfère, nous semble le plus délicat. En effet, si le formalisme mathématique et les règles opératoires sur lesquels repose la PQ constituent un savoir stabilisé depuis maintenant plus de 80 ans, la question de comprendre sur quoi porte ce formalisme est encore très éloignée de tout consensus. Nous verrons notamment par un détour historique qu'au moins deux postures épistémologiques émergent quant à la réponse à apporter au problème de la référence, la première (que nous nommerons « épistémologie conservatrice ») consiste à se référer aux objets de la théorie par l'usage d'un vocabulaire classique, et la seconde (que nous nommerons « épistémologie novatrice ») ambitionne de penser la PQ par ses propres concepts et ses propres termes. Précisons que le terme « conservatrice » se réfère au simple fait que les concepts de la physique classique sont *conservés* dans cette approche. De la même manière, le terme de « novatrice » se réfère à l'introduction de *nouveaux* concepts. Ces choix terminologiques n'expriment aucun jugement de valeur et ne préjugent pas de la pertinence de chacune de ces approches.

La présente étude amorce une analyse critique des stratégies utilisées par les rédacteurs de manuels dans leurs présentations des objets de la théorie quantique. Les manuels constituent effectivement à ce stade de notre recherche un matériel propice à une analyse épistémologique des stratégies proposées aux enseignants chargés de mettre en œuvre les prescriptions du programme².

Le Bulletin officiel de l'Éducation nationale (2011) fournit quelques recommandations quant à la façon de traiter l'objet quantique :

« La dualité onde-corpuscule est une formulation qui s'applique aux manifestations du photon, qui se comporte soit comme une onde, soit comme une particule, selon le contexte expérimental considéré. Mais elle ne doit pas décrire la nature intrinsèque du photon lui-même, qui n'est ni une onde, ni une particule, mais l'archétype d'un objet quantique, appelé parfois « quanton » par les scientifiques. »

Ces recommandations laissent cependant les enseignants relativement libres quant à la façon d'articuler « *les manifestations* » de ces objets et leur « *nature* » supposée intrinsèquement quantique. Le point fondamental développé dans cette étude est le suivant : les injonctions institutionnelles et les manuels nous apparaissent souvent comme un compromis (conscient ou non) entre deux postures épistémologiques différentes concernant les caractéristiques de l'objet quantique.

¹ Notre groupe de recherche autour de la Physique Quantique (PQ) est constitué de chercheurs issus de disciplines scientifiques différentes (didactique, histoire, philosophie).

² Une évaluation complète de l'enseignement actuel de la physique quantique en Terminale nécessitant également l'étude des situations de classe, et notamment de sa réception par les élèves, notre étude constitue la première étape d'un travail plus ample.

Pour mener à bien l'analyse des stratégies adoptées par les rédacteurs des manuels, nous avons choisi de les mettre en perspective avec les deux postures épistémologiques précédemment mentionnées. Lors du travail collaboratif que nous envisageons de poursuivre avec des enseignants sur l'élaboration de séquences d'enseignement, nous pensons que la mise en évidence de l'existence de ces deux épistémologies permettra d'adopter une distance réflexive sur les racines historiques et épistémologiques de la physique quantique.

Nous aborderons d'abord le contexte de l'étude, entre savoir savant et savoir à enseigner. Puis nous nous consacrerons à une discussion portant sur les objets quantiques et les courants épistémologiques que nous allons retrouver à la fois dans les injonctions officielles et dans les différents manuels. Après avoir explicité les question et protocole de recherche, nous en ferons l'analyse. Enfin nous nous consacrerons à la discussion des données, et nous présenterons les perspectives de recherche de notre étude.

Le contexte : entre savoir savant et savoir à enseigner

L'étude de la physique quantique a donné lieu à des recherches didactiques dans différents pays européens avec des études de situations de classe (Michellini, 2004 ; Stefanel, 2011), contrairement à la France où l'enseignement de la PQ avait disparu des programmes du secondaire depuis une vingtaine d'années. En amont des études en situations de classes, nous faisons le choix de mener une étude épistémologique basée sur l'histoire conceptuelle de la PQ, de manière à pouvoir éclairer les choix didactiques des enseignants en relation avec les nouveaux programmes français de Terminale scientifique de 2012.

Avant d'aborder la partie concernant les courants épistémologiques, nous allons préciser le contenu à enseigner en Terminale scientifique, et son statut vis-à-vis du savoir savant. Les éléments d'introduction à la physique quantique abordés en classe de Terminale ne constituent pas un cours d'introduction à la mécanique quantique (MQ)³ proprement dite, dans le sens où ce qui constitue l'essentiel de cette théorie (MQ) est son formalisme mathématique, qui n'est pas présenté à ce niveau là. Les parties du programme en lien avec la PQ comprennent l'effet photo-électrique, le laser, le pompage optique, et la dualité onde-corpuscule. Les éléments théoriques suffisants à la compréhension des trois premiers points ont été pour l'essentiel découverts par Einstein (1905 et 1916) avant même la formulation de la MQ en tant que telle (1925-1926). Ceux nécessaires à la compréhension de la « dualité onde-corpuscule » sont dans une large part contenus dans les travaux de Louis De Broglie (1923-1924). Seule l'interprétation probabiliste de l'onde de De Broglie (proposée en 1926 par Max Born) constitue une connaissance réellement postérieure à la formulation de la MQ⁴. Ceci a une importance pour l'enseignement de ces points pour les raisons suivantes : la MQ telle qu'elle apparaît après 1925 et 1926 diffère radicalement des modèles quantiques qui la précèdent. Elle est une théorie hautement structurée et systématique contrairement aux modèles antérieurs qui sont avant tout phénoménologiques⁵. Pour donner un exemple qui apparaît dans l'enseignement de Terminale scientifique, l'analogie entre les particules matérielles (électrons, protons) et les photons est, du point de vue du formalisme quantique, un sujet beaucoup plus délicat à traiter que du point de vue phénoménologique, dans l'expérience des fentes de Young par exemple. Dans cette expérience, les électrons et les photons semblent se comporter de la même façon. Or, selon le formalisme de la MQ, la physique des électrons non-relativistes est susceptible d'être décrite par l'équation de Schrödinger (attribution d'une fonction d'onde représentant la probabilité de trouver les électrons à différents endroits) alors que la physique des photons - ces derniers étant toujours relativistes - ne peut être décrite de manière consistante que par la théorie quantique des champs. Les rapports entre mécanique ondulatoire et théorie quantique des champs sont une des difficultés de l'enseignement de la physique quantique au niveau du master, et cette difficulté semble justement nourrie par la trop grande mise en perspective de l'analogie⁶ entre lumière et matière à un niveau plus phénoménologique. Cependant, les éléments de PQ qui sont enseignés en Terminale possèdent leur pleine pertinence même s'ils ne sont pas une introduction à un approfondissement dans l'enseignement supérieur⁷. Cette différence intrinsèque entre l'enseignement d'une PQ phénoménologique et celle de la MQ en tant que telle, a pour conséquence importante que la réponse au problème de la référence n'est pas nécessairement la même dans les deux cas (Vila Valls, article en préparation).

³ Nous appelons Mécanique Quantique (MQ), le formalisme définitif tel qu'il a été établi dans les années 1920.

⁴ Du moins en ce qui concerne les connaissances purement théoriques, les éléments technologiques présentés (pompage optique, laser, etc.) étant bien postérieurs.

⁵ On appelle ici approche phénoménologique celle qui consiste à décrire les phénomènes quantiques sans recourir au formalisme de la MQ.

⁶ Le cadre théorique dans lequel cette analogie devient entièrement consistante est la théorie quantique des champs, qui n'est souvent pas abordée avant le master dans les parcours physique.

⁷ Même parmi les étudiants qui s'orientent vers une formation de chercheur en physique, tous ne seront pas forcément confrontés à un enseignement poussé de la mécanique quantique.

Objet quantique et courants épistémologiques

Le problème de la référence s'est très vite posé aux pères fondateurs de la physique quantique. Fort heureusement, il s'est avéré dans la pratique qu'il n'était pas nécessaire de répondre de manière catégorique à la question de savoir de quelle réalité physique les théories quantiques proposaient la description. D'un point de vue historique, les liens formels très étroits qui existent entre la physique classique et la PQ ont permis aux physiciens de ne pas être pris au dépourvu. Des stratégies, consistant à faire un usage abondant des ressources conceptuelles de la physique classique, étaient en effet disponibles. Ces stratégies avaient été notamment théorisées d'un point de vue épistémologique par Bohr. Mais ce conservatisme conceptuel a cependant placé un certain nombre de physiciens dans un inconfort intellectuel. Des appels à dépasser les concepts classiques se font entendre dans les années 1960, avec l'introduction du concept de « quanton », par Mario Bunge, qui sera par la suite repris par Jean-Marc Lévy-Leblond, et auquel le présent programme de Terminale scientifique se réfère. C'est à une présentation de ces deux stratégies que la présente partie est consacrée.

Epistémologie conservatrice

Le physicien qui a le plus cherché à théoriser et légitimer le maintien des concepts classiques en PQ est Niels Bohr. Pour comprendre la pensée de Bohr sur ce sujet, il faut revenir à la période qui précède les formulations définitives de la MQ. Depuis ses premiers pas dans les théories quantiques, en 1913, Bohr n'a eu de cesse d'avoir recours aux théories classiques dans la formulation de ses théories (voir son modèle atomique). Quelques années plus tard, Bohr met en place une stratégie heuristique très puissante qu'il nomme le « principe de correspondance⁸ ». Il s'agit dans les grandes lignes de se servir de toutes les informations que peuvent fournir les théories classiques pour construire les théories quantiques en se basant sur l'accord asymptotique (pour les grands nombres quantiques) des prévisions statistiques de ces deux types de théories. Le principe de correspondance a été d'une importance cruciale dans la première formulation de la MQ, la mécanique des matrices de Heisenberg. A priori, on aurait pu penser qu'une fois la nouvelle théorie quantique établie, elle prendrait son autonomie complète vis-à-vis de la physique classique. Mais Dirac fonde en partie la nouvelle MQ sur une forme de principe de correspondance quantique-classique (présentée sous une forme toutefois différente de celle de Bohr) : le processus dit de « quantification » d'une théorie classique⁹.

Même lorsque la MQ fut établie, Bohr insista encore longuement sur le fait que l'on ne pouvait toujours pas se passer des concepts classiques pour comprendre les théories quantiques¹⁰ (Bohr, 1932). Bohr systématisa ce point de vue à travers sa philosophie de la « complémentarité » à partir de 1927. Préconisant le maintien du langage classique quitte à en aménager son utilisation¹¹ (deux concepts classiques dits « complémentaires » ne peuvent jamais être utilisés simultanément¹²) celle-ci est à la base de ce qu'il deviendra courant d'appeler, après 1950, « l'interprétation de Copenhague de la physique quantique »¹³. Autre grande figure de ce qui fut appelé « l'école de Copenhague », Heisenberg la résumera de manière relativement claire dans le passage suivant :

« L'interprétation de Copenhague de la théorie quantique prend naissance dans un paradoxe. Toute expérience physique, qu'il s'agisse de phénomènes de la vie quotidienne ou de phénomènes atomiques, se décrit forcément en termes de physique classique. Les concepts de physique classique forment le langage grâce auquel nous décrivons les conditions dans lesquelles se déroulent nos expériences et communiquons leurs résultats. Il nous est impossible de remplacer ces concepts par d'autres et nous ne devrions pas le tenter. Or, l'application de ces concepts est limitée par les relations d'incertitude et, quand nous utilisons ces concepts classiques, nous ne devons jamais perdre de vue leur portée limitée, sans pour cela pouvoir ou devoir essayer de les améliorer. » (Heisenberg, 1971, p. 35)

Ce point de vue se traduit donc au niveau terminologique par un maintien du vocabulaire classique (ondes, particules, etc.), même si son usage doit être adapté en fonction des situations expérimentales. Le discours reste

⁸ Il ne s'agit cependant pas d'un « principe » clairement défini et à l'application toujours univoque.

⁹ qui consiste à faire correspondre à toutes les variables hamiltoniennes d'une théorie classique les « observables » quantiques représentés par des opérateurs

¹⁰ Voir Bachtold (Bachtold, 2008) et Saunders (Saunders, 2005) pour des présentations plus détaillées et critiques sur l'argumentation de Bohr.

¹¹ En effet, comme le montre Bachtold (Bachtold, 2008), une continuité au niveau des concepts et un maintien de la terminologie classique n'est pas forcément incompatible avec la mise en évidence des caractéristiques intrinsèques de la physique quantique.

¹² Par exemple s'il y a une continuité entre les concepts classiques et quantiques de quantité de mouvement et de position, les versions quantiques de ces deux concepts sont spécifiques dans le sens que ces deux grandeurs ne peuvent pas être mesurées simultanément avec une précision arbitraire.

¹³ Cette appellation est assez problématique car ceux-là même qui se réclament de cette interprétation sont souvent très peu au fait de la pensée originale de Niels Bohr. Nous l'utilisons toutefois dans le sens que nous précisons ici.

au niveau des phénomènes et il n'est nullement question de caractériser la nature intrinsèquement quantique des objets en jeu. Comme l'aurait dit Bohr lui-même : « il n'y a pas de monde quantique » (Petersen, 1963, p.12) : il n'y a donc pas la nécessité (ni même la possibilité) de spécifier la nature « intrinsèquement quantique » des objets sous investigation. Cette stratégie consiste à « dissoudre » l'objet quantique en le renvoyant à des concepts classiques.

Epistémologie novatrice

Dès la fin des années 1920, quelques voix dissonantes à « l'orthodoxie bohrienne » se font entendre (Einstein, Schrödinger, Langevin, etc.) sans pourtant prendre un caractère véritablement propositionnel. Il faut attendre l'après-guerre pour que le débat prenne toute sa vitalité.

Mario Bunge, physicien et philosophe, introduit le concept de quanton à partir de 1967 (Bunge, 1967). Pour lui, le quanton est la dénomination de tout « microsysteme », c'est-à-dire de tout système obéissant aux lois de la MQ. Son but est d'évacuer l'idée de dualité « onde-corpuscule », et de considérer qu'un objet quantique n'est ni une onde, ni un corpuscule : il s'agit là d'analogies avec la physique classique qui n'ont plus lieu d'être.

Bunge considère qu'un quanton n'est pas localisé en un point de l'espace et qu'il n'a pas une impulsion précise : il lui est simplement associé une distribution bien définie des variables position et impulsion, distributions qui en général varient au cours du temps, sous l'action de l'environnement du quanton considéré (Bunge, 1975). Il faut bien voir aussi que Bunge pense surtout, dans cette réforme, à la recherche qui se fait, et assez peu à l'enseignement de la MQ. Il estime même que les analogies (comme celles d'onde ou de particule pour les objets quantiques) peuvent avoir une certaine valeur heuristique, mais qu'elles doivent être abandonnées à partir d'un certain stade¹⁴, sans quoi elles deviennent dangereuses.

Au contraire, Jean-Marc Lévy-Leblond insiste fortement pour l'abandon des concepts d'onde et de corpuscule dès le début de l'enseignement de la MQ.

Dans une lettre publiée dans la revue *Nature* le 7 juillet 1988 (Lévy-Leblond, 1988) il explique à propos de l'introduction du concept de quanton : « This would not only dispose of the cumbersome and ill-defined « wave-particle duality » but would also offer definite pedagogical help by stressing for the student the radical novelty of quantum theory and the danger of naive classical pictures ».

De fait, c'est Lévy-leblond qui, dès les années 1980, propose, avec Françoise Balibar, un manuel (Balibar & Lévy-Leblond, 1984) innovant d'initiation à la mécanique quantique, dans lequel le concept de quanton est inséré dès le départ. Lévy-Leblond spécifie ce concept de quanton de la manière suivante :

« The best way, perhaps, to stress the originality of the notion is to examine it from the point of view of the discrete/continuous dichotomy. Quanta show discreteness in that they come in units, and can be counted: an atom has an integer number of electrons, and a photographic plate registers the individual impacts of photons. Nevertheless, electrons as well as photons (and all quanta) do show continuous essence as well, since they can be subjected to interferences, superposition, etc. In fact, it should be realized that a physical object must be characterised through the consideration of two discrete/continuous dichotomies; one has to consider separately the question of the number of objects and the question of their extension (spatiotemporal properties). Within classical physics, these two questions merge. Classical particles are discrete under both aspects; they come in discontinuous counts and are discretely localised. Classical fields are continuous under both aspects; they have continuous amplitudes and continuous spatial extensions. But quanta exhibit the original combination of discreteness in number and continuity in extension, as shown by the following table» (Lévy-Leblond (2003), p. 496) :

		Nombre	Extension
Champ	Particule	Discret	Discret
	Quanton	Discret	Continu

Tableau n°1 *Concept de quanton*

En résumé, ici, la physique quantique doit être pensée en ses propres termes, et elle porte sur un nouveau type d'objet inconnu des théories classiques : le quanton. Le principal intérêt de cette approche est de remplacer l'usage de deux concepts incompatibles (onde et corpuscule) par l'usage d'un concept unique remplissant de manière cohérente le rôle des deux précédents.

¹⁴ A partir d'un certain stade historique mais aussi à partir d'un certain stade de l'enseignement, semble-t-il.

Question et protocole de recherche

Les idées qui ont été forgées par ces deux courants de pensée, et le vocabulaire qui leur est associé, se sont largement diffusés. Les présupposés épistémologiques sur lesquels reposent ces idées et ce vocabulaire convenus peuvent cependant être méconnus. On peut s'attendre à ce qu'une utilisation plus ou moins bien informée de ceux-ci pose un certain nombre de problèmes au niveau de l'enseignement.

En étudiant les manuels sur la base des deux postures épistémologiques distinguées, nous engageons une démarche d'analyse critique qui, au-delà du cadre des manuels, pourrait être reprise et étendue par l'enseignant à ses propres activités de classe.

A travers cette présentation, nous étudierons la manière dont les rédacteurs des ouvrages scolaires s'emparent implicitement de ces épistémologies, en nous interrogeant sur la cohérence interne à chaque manuel et entre les différents manuels.

Le cadre d'analyse mobilisé pour cette étude est celui des deux postures épistémologiques, conservatrice et novatrice, de la physique quantique.

Le corpus utilisé est constitué des cinq manuels de Terminale scientifique française : Editions Belin (2012), Editions Bordas (2012), Editions Hachette (2012), Editions Hatier (2012), et Editions Nathan (2012). La sélection des parties des manuels qui traitent de « quantique » constituera notre corpus secondaire.

Du point de vue méthodologique, une première étape de notre travail fera ressortir les éléments de vocabulaire relatif à chacune des deux épistémologies considérées. Nous chercherons ensuite à dégager des cohérences dans l'utilisation de ce vocabulaire dans les différents manuels analysés. Une discussion plus qualitative sur la mise en œuvre de ces deux positions épistémologiques s'ensuivra.

Méthodologie d'analyse des manuels et recueil de données

Nous avons étudié les cinq manuels de Terminale scientifique édités en 2012, correspondant aux programmes en vigueur. Nous avons répertorié les différents termes utilisés dans la partie « quantique » de chaque manuel qui semblent caractéristiques de chaque posture (épistémologie conservatrice ou épistémologie novatrice), et nous avons indiqué dans deux tableaux l'utilisation de ces termes pour chacun des manuels.

Les termes du tableau 2 correspondent à l'épistémologie novatrice. Le terme de quanton est le prototype même des termes qui ont pour vocation de dépasser la terminologie classique. L'utilisation de l'expression « objet quantique » est également un moyen de ne pas se compromettre avec une dénomination trop apparentée à l'ontologie classique. Ceci peut d'ailleurs être explicité, en utilisant directement l'expression « ni onde, ni corpuscule (ou ni particule) ».

Les termes du tableau 3, qui correspondent à l'épistémologie conservatrice, constituent un vocabulaire utilisé par les physiciens qui se revendiquent de l'école de Copenhague. Les termes classiques sont conservés et on parle alors de « particule » (quantique ou de matière) et « d'onde » (de matière) pour désigner les objets auxquels on se réfère. L'expression « dualité onde – corpuscule », d'usage très courant, dénote le fait que les phénomènes quantiques sont appréhendés à travers la grille de ces deux concepts.

	Nathan	Belin	Bordas	Hatier	Hachette
Quanton	Oui	Oui	Non	Non	Non
Objet quantique	Oui	Non	Non	Non	Oui
Ni onde ni corpuscule	Oui	Oui	Non	Non	Oui

Tableau n°2 vocabulaire correspondant à l'épistémologie novatrice

	Nathan	Belin	Bordas	Hatier	Hachette
Dualité onde-corpuscule	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Particule quantique	Non	Non	Oui	Non	Non
Particule de matière	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Onde de matière	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Onde et corpuscule	Non	Oui	Non	Oui	Oui

Tableau n°3 vocabulaire correspondant à l'épistémologie conservatrice

L'exploitation des données des deux tableaux peut maintenant être réalisée, ce que nous allons développer dans la partie suivante.

Discussion des données recueillies

La première constatation qu'indique la lecture des deux tableaux est qu'aucun manuel n'utilise un vocabulaire lié à une épistémologie strictement novatrice. Par exemple, « Nathan » qui utilise les items cohérents avec l'épistémologie novatrice (voir tableau 2), utilise également certains items de l'épistémologie conservatrice (voir tableau 3). En revanche, deux manuels utilisent un vocabulaire cohérent avec une épistémologie conservatrice : en effet, « Hatier » et « Bordas » n'emploient aucun item correspondant à une épistémologie novatrice.

Une lecture plus détaillée nous permet de constater que l'épistémologie conservatrice reste bien ancrée dans les manuels de Terminale scientifique de 2012, avec l'item « dualité onde-corpuscule » présent dans tous les manuels. De même tous les manuels utilisent les items de particule (quantique ou de matière) et/ou d'onde (de matière). Il semble donc bien difficile de changer radicalement de paradigme car même les rédacteurs de manuels influencés par les idées novatrices (dans la continuité du Bulletin officiel) introduisent simultanément des concepts classiques et des concepts quantiques.

Par ailleurs, il y a des degrés dans la percée de l'épistémologie novatrice (Editions Belin, 2012 ; Editions Hachette, 2012 ; Editions Nathan, 2012). Deux manuels utilisent explicitement le terme de « quanton » (Editions Belin, 2012 ; Editions Nathan, 2012). Si « Nathan » ne fait qu'évoquer ce terme, « Belin » en revanche, l'introduit et en fait usage dans la partie « cours ». De son côté, « Hachette » utilise le terme d'« objet quantique », sans citer celui de « quanton ». Ces trois manuels sont également ceux qui écrivent explicitement « ni onde ni corpuscule » (voir tableau 2), créant ainsi une cohérence relative dans leur approche novatrice. Cette affirmation est immédiatement nuancée par le fait que ces trois manuels continuent à se référer aux objets par les termes de « particule » et « d'onde » (voir tableau 3).

Dans cet esprit, « Belin » est assez caractéristique d'une démarche médiane entre les deux épistémologies. Réservant la qualification de « dualité onde-corpuscule » aux « manifestations » des objets quantiques (et non pas à leur nature intrinsèque), il qualifie dans un premier temps ces derniers par le terme « quanton », précisant qu'il ne s'agit là ni de particule, ni d'onde. Mais cette mise à distance de l'ontologie classique disparaît presque entièrement dans la suite du cours. Ainsi, quelques lignes en dessous de l'introduction du terme « quanton », les énoncés suivants apparaissent :

« A toute particule de quantité de mouvement p est associée une « onde de matière ... Cette particule peut être utilisée par son onde associée. » (Editions Belin, 2012, p. 240)

Au final, dans les deux manuels qui l'utilisent, le terme de quanton n'est aucunement conceptualisé et ne joue qu'un rôle terminologique ; les fonctions de référents sont réservées aux concepts d'onde et de particule à chaque fois que l'on présente effectivement les caractéristiques physiques des objets.

On peut remarquer par ailleurs que les manuels qui semblent s'inspirer davantage d'une démarche conservatrice (Editions Bordas, 2012 ; Editions Hatier, 2012) restent souvent prudents sur leur engagement ontologique. Tout en utilisant sans restriction les concepts d'onde et de particule, ils soulignent parfois qu'il ne s'agit que d'« aspects », de « comportements » ou de « modèles » :

« le fait que certains phénomènes [...] ne puissent s'expliquer par un modèle ondulatoire, rend nécessaire l'existence d'un modèle corpusculaire pour la lumière. » (Editions Hatier, 2012, p. 412)

Cette prudence nous semble en cohérence avec les positions épistémologiques d'inspiration Bohrienne marquées par un refus de porter le discours au niveau ontologique. Reste que l'existence d'une plus grande cohérence dans les manuels de tendance « conservatrice » n'est pas synonyme d'absence de difficultés didactiques. La « complémentarité » des descriptions ondulatoires et particulaires implique qu'il n'y a aucun modèle unifié permettant de rendre compte des diverses situations présentées (par exemple, dans les différentes versions de l'expérience des fentes de Young). Au sein de cette posture, le jonglage entre les différents modèles (ondulatoire et corpusculaire) reste un défi indiscutable pour les élèves et les enseignants. A l'inverse, comme nous venons de

le voir, le rôle joué par le terme de « quanton » dans les manuels l'utilisant, se cantonne à proposer un nom à un objet dont la description continue de se faire à travers les concepts d'onde et de particule (voir Frege, 1892, pour la distinction entre objet et concept). Cette utilisation n'est donc pas complètement conforme aux idées directrices de Bunge et Lévy-Leblond, qui, rappelons-le, étaient de proposer une description unifiée de l'objet quantique qui ne soit pas assujettie aux concepts classiques. Cela ne la rend pas pour autant incohérente : si elle n'a pas de fonction descriptive, elle permet en revanche de se référer à un objet qui ne se comporte pas de la même façon que les entités classiques habituellement présentées aux élèves.

Notons pour terminer, que les choix des enseignants concernant l'enseignement de cette partie du programme, peuvent évidemment être guidés par des points de vue autres qu'épistémologiques : contraintes matérielles, continuité des démarches d'enseignement et des formes d'activités proposées aux élèves avec les enseignements précédents, mobilisation des connaissances préalables des élèves, modalités d'évaluation... L'enseignant peut également proposer d'étudier ce domaine en rupture avec les modalités d'études précédentes, notamment en adoptant une terminologie différente, sans nécessairement avoir pris conscience de la relation existant entre les termes utilisés et les postures épistémologiques associées. Ce choix pourrait éventuellement être guidé par une volonté d'aider les élèves à entrer dans un nouveau domaine de la physique.

Conclusion

Cette recherche, qui s'inscrit dans un cadre plus général d'études de pratiques d'enseignement relatives à l'approche dont la dénomination anglophone est « IBSE »¹⁵, repose sur un cadre d'analyse épistémologique de ressources à disposition des enseignants. Cette mise en perspective épistémologique des manuels permet de dégager deux types de stratégies didactiques adoptées quant au problème de la référence en physique quantique : l'une en cohérence avec une épistémologie conservatrice d'inspiration Bohrienne et l'autre, qui, sans totalement abandonner cette dernière, intègre les éléments de l'épistémologie novatrice. Une perspective à notre recherche serait d'étudier si l'introduction du terme « quanton », permettant de marquer une rupture entre physique classique et physique quantique, pourrait aider les élèves à appréhender ce domaine de la physique ?

Références bibliographiques

Bachtold, M. (2008). Are all measurement outcomes "classical"? In *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39 (2008) 620–633.

Balibar, F. & Lévy-Leblond, J.M. (1984). *Quantique, rudiments*. Paris : Masson/CNRS.

Bohr, N. (1932). *La théorie atomique et la description des phénomènes*. Paris : Gauthier-Villars.

Bulletin officielspécial n° 8 du 13 octobre 2011, Annexe Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de physique-chimie. Classe Terminale de la série scientifique.

Bunge, M. (1967). Analogy in Quantum Mechanics : From Insight to Nonsense, in *The British Journal for Philosophy of Science* 18, 265-286.

Bunge, M. (1975). *Philosophie de la Physique*, Paris, Editions du Seuil (ou édition originale : M.

Bunge (1973), *Philosophy of Physics*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company.

Concours externe du CAPES - Section sciences physiques et chimiques. Programme de la session 2013

http://media.education.gouv.fr/file/capes_externe/23/7/p2013_capes_ext_sc_phys_chim_202237.pdf. Consulté le 4 novembre 2013.

Editions Belin,(2012). Physique Term S Spécifique, Manuel élève (grand format), Collection : Physique – Chimie, Editeur : Belin.

Editions Bordas, (2012). E.S.P.A.C.E. Tle S, Manuel de l'élève Physique – Chimie Grand Format, Collection E.S.P.A.C.E. Lycée, Editeur : Bordas.

Editions Hachette (2012). Physique-Chimie T S spécifique - Livre élève Format compact - Edition 2012, Collection Dulaurans Durupthy, Editeur : Hachette.

Editions Hatier, (2012). Microméga Physique-Chimie Tle S enseignement spécifique éd. 2012 - Manuel de l'élève format compact, Collection Microméga, Editeur : Hatier.

¹⁵ IBSE : Inquiry Based Science Education. Par ailleurs, une étude didactique sur les séances de classe relatives à la physique quantique va être entreprise dans l'année 2013-2014 à Lausanne en Suisse (collaboration Ph. Lobello, K. Bécu-Robinault, P. Lautesse) : contribution présentée lors de la conférence ESERA 2013, du 3 au 7 septembre à Chypre : « Do we need to introduce the word Quanton to promote understanding of quantum physics ? »

- Editions Nathan, (2012). Physique-Chimie Term S spécifique - Livre de l'élève, Collection Sirius, Editeur : Nathan.
- Frege, G. (1892). « Über Begriff und Gegenstand », *Vierteljahresschrift für wissenschaftliche Philosophie*, vol. 16, 1892, p. 192-205 (traduit en Français dans Frege, G. (1971) ; *Écrits logiques et philosophiques*, Paris : Éditions du Seuil.
- Heisenberg, W. (1971). *Physique et Philosophie*. Paris : Albin Michel, 1971, p. 35.
- Levy-Leblond, J.M. (1988). Neither waves, nor particles, but quantons, in *Nature* 334, 19 – 20.
- Levy-Leblond, J.M. (1999). Mots et maux de la physique quantique. Critique épistémologique et problème terminologiques, in *Bulletin de l'union des physiciens*, Vol. 93, N° 816, juillet-août-septembre 1999, p1129-1147.
- Levy-Leblond, J.M. (2003). « On the Nature of Quantons », in *Science & Education*, 12, 495 – 502.
- Michelini, M., Ragazzoni, R., Santi, L., & Stefanel, A. (2004). Discussion of a didactic proposal on quantummechanics with secondary school students, in *Il Nuovo Cimento*, 27 C, 5,555-567, and references therein.
- Saunders, S. (2005). Complementarity and scientific rationality, in *Foundations of Physics*, 25, 417–447.
- Stefanel, A., & Michelini, M. (2011). Upper secondary school students Learning pathways through quantum concepts and basic formalism, in *E-Book Proceedings Of The Esera 2011 Conference*, Lyon France. (http://lsg.ucy.ac.cy/esera/e_book/base/ebook/strand1/ebook-esera2011_STEFANEL-01.pdf). Consulté le 4 novembre, 2013.
- Petersen, A. (1963). The Philosophy of Niels Bohr, in *Bulletin of the Atomic Scientists*, 1963, 19, p. 12.
- Vila Valls, A. (en préparation). Onde, corpuscule ou quanton : de quoi la mécanique quantique est-elle la théorie ? Points de vue heuristiques et didactiques sur la question de la référence en mécanique quantique.