

Représentations d'apprenants relatives aux concepts quantiques

MUSTAPHA OLDACHE, CHAMS-EDDINE KHIARI

*Laboratoire de Didactique des Sciences
École Normale Supérieure de Kouba, Alger
Algérie
musoldache@gmail.com
chamsydine@yahoo.fr*

RÉSUMÉ

L'enseignement de la physique moderne se heurte inévitablement à des obstacles didactiques et épistémologiques. De nombreuses études ont mis en évidence les conceptions erronées des apprenants dans ce type d'enseignement. Dans le cas de l'enseignement de la Mécanique Quantique auquel on s'intéresse ici, les causes de difficultés sont essentiellement le formalisme mathématique d'une part et l'imprégnation des concepts classiques d'autre part. L'étude que nous avons menée vise à repérer les référents épistémologiques d'étudiants en 3^{ème} année universitaire par l'analyse de leurs représentations concernant les concepts quantiques. Les résultats ont montré des conceptions relevant d'une épistémologie réaliste et empirique.

MOTS-CLÉS

Didactique de la Physique, enseignement de la physique moderne, concepts quantiques

ABSTRACT

The teaching of modern physics inevitably faces didactic and epistemological obstacles. Many studies have highlighted the misconceptions of learners in this type of education. In the case of the teaching of quantum mechanics in which what are interested here, the causes of the difficulties are essentially the mathematical formalism on the one hand and the impregnation of the classical concepts on the other one. The goal of the study we conducted was to identify the epistemological referents of students in third academic year by the analysis of their representations of quantum concepts. The results showed conceptions relevant to a realistic and empirical epistemology.

KEYWORDS

Physics Education, modern physics teaching, quantum concepts

INTRODUCTION

Les difficultés liées à l'enseignement-apprentissage de la mécanique quantique sont généralement dues au fait que les apprenants interprètent les phénomènes quantiques sur la base de paradigmes classiques. En effet, la physique classique a par un soubassement épistémologique relevant de l'empirisme et du réalisme alors que la mécanique quantique se base sur une épistémologie positiviste. Pourtant, les apprenants ont tendance à interpréter les concepts et les phénomènes quantiques sur la base de représentations classiques, ce qui entrave leur compréhension de la mécanique quantique.

Un des tout premiers travaux sur les conceptions des étudiants et le processus d'apprentissage relatifs à la physique quantique fut celui de Fishchler et Lichtfeldt (1991). L'étude menée par ces auteurs au moyens de questionnaires et d'interviews avait pour but la mise en évidence des conceptions d'étudiants en 3^{ème} cycle relatives aux concepts « *lumière* », « *atome* », « *électron* », « *corps* » et « *particule* » ainsi que les idées de ces étudiants à propos de la philosophie des sciences. Ces auteurs ont montré que l'utilisation d'outils informatiques de simulation améliorerait la compréhension des concepts quantique de manière significative. Une autre étude fut menée par Styer (1996) afin de connaître les préconceptions des étudiants relatives à la mécanique quantique. Cet auteur s'est basé pour cela sur sa propre expérience d'enseignement de cette matière et s'est focalisé surtout sur les concepts d' « *état quantique* », de « *processus de mesure* » et de « *particules identiques* ». Après avoir recensé les conceptions erronées des apprenants entourant ces concepts, cet auteur a proposé plusieurs solutions pour y remédier. L'une d'elles consiste à renommer certains de ces concepts car il a estimé que les dénominations en vigueur prêtaient parfois à confusion. Ces travaux « *ponctuels* » n'allaient pas tarder à s'élargir à d'autres travaux plus systématiques. Ainsi, selon les travaux de Baily (2011), les étudiants américains sont imprégnés d'une épistémologie réaliste. Selon les travaux de Pantoja, Moreira & Herskovits (2012), par contre, les conceptions des étudiants brésiliens relèvent du positivisme. Enfin, selon les travaux de Çaliskan, Sezgin Selçuk et Erol (2009), les conceptions des étudiants turcs oscillent entre le réalisme et le positivisme.

Le but de notre propre étude est de mettre en évidence les conceptions erronées relatives à des notions de base de la physique quantique chez des étudiants algériens en troisième année universitaire poursuivant une formation BAC+5 en vue de devenir des enseignants des sciences physiques de lycée. Cette étude, menée au moyen d'un questionnaire de type papier-crayon, visait à connaître les conceptions de ces apprenants en ce qui concerne les rapports de la physique quantique avec la réalité physique puis à situer ces conceptions par rapport au réalisme, à l'empirisme et au positivisme. Ce qu'on entend par réalisme ici, c'est le courant épistémologique selon lequel la réalité indépendante existe et selon lequel l'objet de la physique est de décrire la nature fidèlement. L'empirisme, désigne le courant qui privilégie l'expérience comme moyen d'acquisition des connaissances. Enfin, le positivisme, c'est le courant qui s'en tient aux phénomènes sans préjuger de l'existence ou non d'une réalité indépendante. Le questionnaire est de type « *réponses fermées* » et les questions ont été formulées de telle manière à mettre en évidence les référents épistémologiques des questionnés en ce qui concerne la notion de réalité physique.

DESCRIPTION DU QUESTIONNAIRE ET DE L'ÉCHANTILLON

Le questionnaire est de type QCM semi-ouvert et comporte six questions portant sur les thèmes suivants : « *principe d'indétermination de Heisenberg* », « *quantification de l'énergie* », « *aspect ondulatoire de la matière* », « *processus de mesure* », « *interférences électroniques* » et « *photon* ». Le but du questionnaire était de connaître les conceptions des étudiants à propos de ces thèmes et, par-là, ressortir leurs idées quant au « *fonctionnement* » de la mécanique quantique. Quatre réponses possibles sont proposées dont une consiste à répondre « *je ne sais pas* ». Il a été demandé aux questionnés de ne choisir qu'une réponse parmi les quatre pour chaque question et de justifier leurs réponses dans la mesure du possible. Il leur a été également conseillé de ne choisir la réponse D (« *je ne sais pas* ») qu'au cas où ils n'avaient aucune autre réponse en tête. Il faut remarquer que les questions ont été formulées de telle manière à pouvoir déceler les référents épistémologiques des apprenants bien que cela ne soit pas toujours aisé.

L'échantillon consistait en 81 étudiants en troisième année de licence de physique (il s'agit en fait d'une licence d'enseignement de cinq ans après le baccalauréat) à l'École Normale Supérieure de Kouba (Alger) avec une proportion de 62% de filles et 38% de garçons dont la tranche d'âge était comprise entre 20 et 24 ans. Il faut préciser que la filière en question n'est ouverte qu'aux candidats remplissant certains critères (une moyenne suffisante au baccalauréat et en troisième année de lycée ainsi que les aptitudes nécessaires pour exercer le métier d'enseignant). Le questionnaire a été passé juste après le cours de « *Mécanique Quantique* » dispensé l'année-même, sachant que ces étudiants ont aussi été initiés à des éléments de mécanique quantique inclus dans le cours de chimie de première année universitaire. Il a été accordé aux étudiants une durée de 30 minutes pour répondre au questionnaire, durée estimée nécessaire et suffisante compte tenu du fait que des justifications aux réponses ont été requises.

RÉSULTATS DU QUESTIONNAIRE ET ANALYSE

On donne ci-après les résultats obtenus ainsi que quelques justifications formulées par les étudiants questionnés. Ces résultats sont comparés avec ceux d'études antérieures.

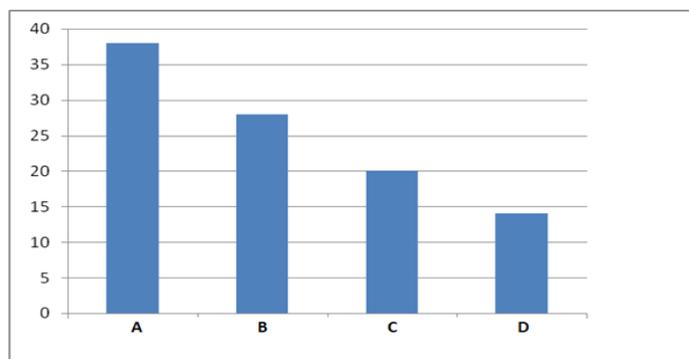
Question 1 : Le principe d'indétermination.

Le principe d'incertitude (ou d'indétermination) de Heisenberg stipule que la position et le moment linéaire d'une particule ne peuvent être déterminées que dans les limites fixées par l'inégalité : $\Delta X \cdot \Delta P \geq \frac{\hbar}{2}$. Ce principe est du, selon vous, à :

- A- Une imperfection des instruments de mesure*
- B- Une limite de la connaissance humaine*
- C- Une propriété fondamentale de la Nature*
- D- Je ne sais pas*

Le but de cette question est de connaître les conceptions des étudiants sur les propriétés cinématiques des objets microscopiques. La figure 1 montre les résultats suivants : 20% seulement des étudiants questionnés pensent que ce principe représente une propriété intrinsèque de la nature (réponse C) contre 68% qui pensent qu'il est du soit à une imperfection des instruments de mesure (38% de réponse A), soit à une limitation de la connaissance humaine (28% de réponse B).

FIGURE 1



Réponses des étudiants concernant le principe d'indétermination de Heisenberg

Les étudiants ayant donné la réponse A ont justifié celle-ci par des arguments tels que :

- « Les incertitudes Δx et Δp sont dues aux instruments de mesure car ceux-ci sont imparfaits
- « Le processus de mesure perturbe le système sur lequel on effectue cette mesure »).

Quant aux étudiants ayant donné la réponse B, ils ont justifié leur réponse en disant que la connaissance humaine est limitée. Un des étudiants appartenant à cette catégorie a fait le raisonnement suivant : « Lorsque Δx tend vers zéro, Δp tend vers l'infini. Mais puisque nous ne pouvons pas appréhender l'infini, alors cela implique une limitation de la connaissance humaine ». Cette réponse montre que l'étudiant en question attribue à la notion d'infini une signification métaphysique et non pas mathématique.

Enfin, les étudiants ayant donné la réponse C ont justifié leur réponse en attribuant à la nature une certaine complexité telle que l'attestent les commentaires suivants :

- « La vitesse de l'électron est grande et son mouvement est aléatoire. C'est pour cela que la détermination d'une des grandeurs (position ou impulsion) entraîne une grande incertitude sur l'autre ».
- « C'est une propriété de la nature car de nombreux facteurs influent la particule ».

On remarque à travers les réponses des étudiants que ceux-ci interprètent le principe d'indétermination (ou d'incertitude) en se basant exclusivement sur l'aspect corpusculaire de la matière alors qu'en fait ce principe relève de l'aspect ondulatoire. Selon les résultats obtenus par l'équipe de Çaliskan, Sezgin Selçuk et Erol (2009), les étudiants sont en fort désaccord avec le fait que « la position d'un électron dans un atome est exactement déterminée ». Ils sont, par contre d'accord avec la proposition : « La position des électrons ne peut être déterminée exactement ». La forme des questions posées par cette équipe ne permet pas toutefois de savoir à quoi les étudiants attribuent cette indétermination. Les résultats obtenus avec les étudiants turcs laissent penser que leurs conceptions relèvent d'une épistémologie hybride qui serait un mélange de réalisme et de positivisme.

En ce qui concerne les travaux de Baily (2011), une des questions du test utilisé portait sur la localisation de l'électron au sein de l'atome: est-ce que l'électron est bien localisé ou non ? La majorité des étudiants ont répondu que l'électron était bien localisé (« il se trouve à une position précise à un instant donné ») mais que cette position est inconnue. Ce résultat qui relève d'une épistémologie réaliste concorde avec les résultats obtenus avec les étudiants algériens.

Enfin, l'équipe de Pantoja, Moreira & Herskovits (2012) a obtenu les résultats suivants:

- Les variables dynamiques incompatibles ne sont pas susceptibles d'une détermination simultanée. Il est possible seulement d'obtenir de l'information sur l'une d'elles.
- L'indétermination est due à une superposition d'états.

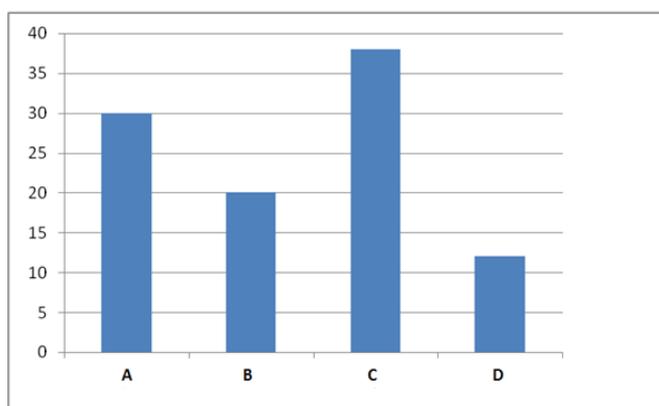
Ces résultats montrent que les conceptions des étudiants brésiliens relèvent du positivisme, ce qui met en évidence un écart notable par rapport aux conceptions des étudiants algériens qui relèvent, elles, d'une épistémologie réaliste. Précisons que ces résultats ne viennent pas, dans les deux cas, de l'enseignement de la mécanique quantique d'une manière particulière mais ils sont dus plutôt aux traditions pédagogiques des pays respectifs. En effet, l'école brésilienne est imprégnée du positivisme, alors que l'école algérienne a une tradition empiriste et réaliste.

Question 2 : La quantification de l'énergie.

Les recherches menées par Planck sur le rayonnement du corps noir l'ont amené à postuler la quantification de l'énergie. Cette quantification est, selon vous :

- A- Une hypothèse sans signification physique*
- B- Due aux instruments de mesure*
- C- Une propriété inhérente à la Nature*
- D- Je ne sais pas*

La problématique du rayonnement du corps noir n'a pu être résolue qu'en postulant l'existence de grains d'énergie appelés « *quanta* ». Le but de cette question est de savoir comment les apprenants conçoivent ce concept. La figure 2 montre que 38% des étudiants questionnés ont répondu que cette quantification est une propriété de la nature (réponse C) contre 50% qui ont répondu qu'elle est soit une hypothèse sans signification physique (30% de réponse A), soit due aux instruments de mesure (réponse B).

FIGURE 2*Réponses des étudiants concernant la quantification de l'énergie*

Les étudiants ayant donné la réponse A ont justifié leur réponse par le fait que la quantification « *n'a pas été démontrée* » ou qu'elle « *n'a pas été déduite de l'expérience* ». Un étudiant appartenant à cette catégorie a argumenté sa réponse en disant que « *le corps noir auquel est lié la quantification de l'énergie n'existe pas et la quantification de l'énergie est donc une hypothèse* ».

Les étudiants ayant donné la réponse B ont justifiée celle-ci par des considérations du genre : « *La quantification de l'énergie est due aux instruments de mesure mais on ne peut pas dire que l'énergie est vraiment quantifiée* ».

Selon les étudiants ayant donné la réponse C, c'est la compatibilité de la loi de Planck avec les données expérimentales qui permet de dire que la quantification de l'énergie est une propriété de la nature : « *La quantification de l'énergie est une propriété de la nature car la loi basée sur cette hypothèse est compatible avec les données expérimentales* ».

On déduit de ces réponses que les étudiants, dans leur majorité, se méfient des hypothèses qu'ils assimilent à des énoncés arbitraires, non vérifiables et donc douteux. Dans le cas de la quantification de l'énergie, on sait que cette hypothèse a été corroborée par l'expérience puisque la loi de Planck s'est révélée en parfait accord avec les données expérimentales et a permis de lever toutes les contradictions concernant le rayonnement du corps noir. Il faut remarquer, par ailleurs, que le corps noir bien qu'il désigne un objet idéal et fictif est en même temps un modèle qui convient particulièrement pour l'étude

thermodynamique de nombreux objets physiques bien réels. Les résultats relatifs à la quantification de l'énergie montrent que la majorité des étudiants considèrent cette notion comme un énoncé hypothétique et à caractère arbitraire. Un pourcentage significatif d'entre eux, par contre, la considèrent comme une hypothèse qui peut être tenue pour vraie car elle permet de faire des prévisions correctes.

Selon les résultats obtenus par l'équipe de Çaliskan, Sezgin Selçuk et Erol (2009), les étudiants turcs estiment que la quantification de l'énergie est une propriété de la nature. En effet, à la question de savoir si « *la lumière se comporte toujours comme une onde* », la plupart de ces étudiants ont exprimé un fort désaccord. Dans le travail de l'équipe de Pantoja, Moreira & Herskovits (2012), le test utilisé ne portait pas sur la quantification de l'énergie proprement dite mais une question du test portait sur l'expérience de Stern et Gerlach. Or cette expérience est liée à la quantification du spin. La majorité des étudiants brésiliens ont répondu que « *le faisceau se divise toujours en deux faisceaux d'égale intensité* ». Cette réponse implique que le spin est une variable dynamique quantifiée. Les résultats obtenus avec les étudiants algériens, en ce qui concerne la notion de quantification, relèvent d'une représentation classique et contrastent donc avec les résultats obtenus par l'équipe turque et l'équipe brésilienne.

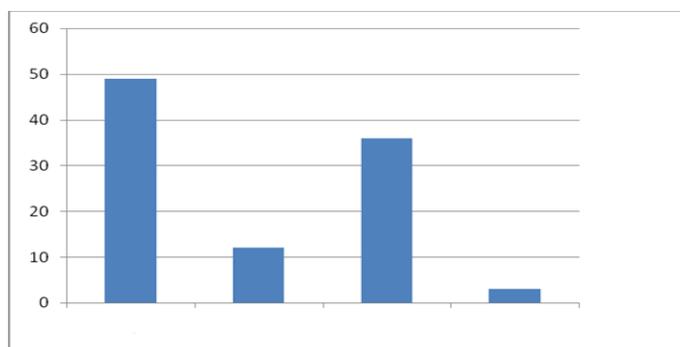
Question 3 : l'aspect ondulatoire de la matière.

De Broglie a été amené à attribuer à toute particule en mouvement une longueur d'onde donnée par : $\lambda = \frac{h}{p}$. De quel type d'onde s'agit-il selon vous ?

- A- Une onde physique accompagnant la particule dans son mouvement*
- B- Une entité mathématique sans réalité physique*
- C- Une onde émise par la particule*
- D- Je ne sais pas*

Le but de cette question est de connaître les représentations des étudiants concernant l'aspect ondulatoire de la matière. La figure 3 montre qu'une forte majorité des étudiants (85%) considèrent l'onde de Broglie comme étant une onde physique qui accompagne la particule dans son mouvement (49% pour la réponse A) ou qui est émise par la particule (36% pour la réponse C). Seuls 12% d'entre eux estiment qu'il s'agit d'une entité mathématique sans réalité physique (réponse B).

FIGURE 3



Réponses des étudiants concernant l'aspect ondulatoire de la matière

Les étudiants ayant donné la réponse A ont justifié leur réponse comme suit :

- « *C'est une onde qui accompagne la particule dans son mouvement tout en la guidant* ».
- « *C'est une onde qui accompagne la particule dans son mouvement car, comme l'a prouvé de Broglie, le mouvement de la particule est ondulatoire* ».

Comme on le constate, ces réponses relèvent de l'idée originelle de Broglie qui concevait l'onde attribuée à toute particule en mouvement comme étant une onde physique (qu'il appelait onde-pilote) dont le rôle est de guider la particule.

Concernant les étudiants ayant donné la réponse C, il semble qu'ils confondent l'onde de Broglie avec l'onde électromagnétique émise par une charge accélérée. Un des étudiants a, en effet, argumenté par : « *C'est une onde qu'émet l'électron durant son mouvement et cette onde porte de l'énergie* ».

Pour la troisième catégorie d'étudiants enfin, bien qu'ils aient choisi la bonne réponse, leur argumentation n'est pas toujours adéquate. Ainsi, l'un d'eux, a justifié sa réponse en disant : « *L'onde associée à l'électron est reliée à sa probabilité de présence et n'a pas de relation avec la description de son mouvement.* ».

Ces réponses mettent en évidence des conceptions des étudiants questionnés basées sur une représentation particulière de la matière. Pour ces étudiants, la matière c'est avant tout des particules et l'onde associée à ces particules (même si elle est une vraie onde physique) n'est qu'un épiphénomène du au mouvement de la particule. Cette onde est, selon la majorité des étudiants, soit « émise » par la particule, soit elle l'accompagne pour lui « *montrer son chemin* ».

Selon les résultats obtenus par l'équipe de Çaliskan, Sezgin Selçuk et Erol (2009), les étudiants ont exprimé leur désaccord avec le fait que « *l'électron se comporte toujours comme une particule* ». Ils sont, par contre :

- Indécis sur la proposition selon laquelle « *l'électron se déplaçant autour du noyau se comporte comme une onde* ».
- En accord avec l'analogie du mouvement de l'électron et celui des planètes autour du soleil : « *le mouvement de l'électron dans l'atome est similaire au mouvement des planètes autour du soleil* ».
- En désaccord avec : « *Le module au carré de la fonction d'onde n'a pas de signification physique* ».

Ces résultats mettent en évidence une hésitation des étudiants turcs entre une représentation réaliste et une représentation positiviste en ce qui concerne l'aspect ondulatoire de la matière. Selon les travaux de Bailly (2011), les représentations des étudiants américains relèvent d'une épistémologie réaliste. En effet, à une question portant sur l'expérience des doubles fentes, la majorité des étudiants ont donné des réponses laissant entendre que la fonction d'onde est une onde de matière. Cela montre que les résultats obtenus avec les étudiants algériens concordent bien ceux obtenus avec leurs collègues américains et concordent partiellement avec ceux de leurs collègues turcs.

Question 4 : Le processus de la mesure en mécanique quantique.

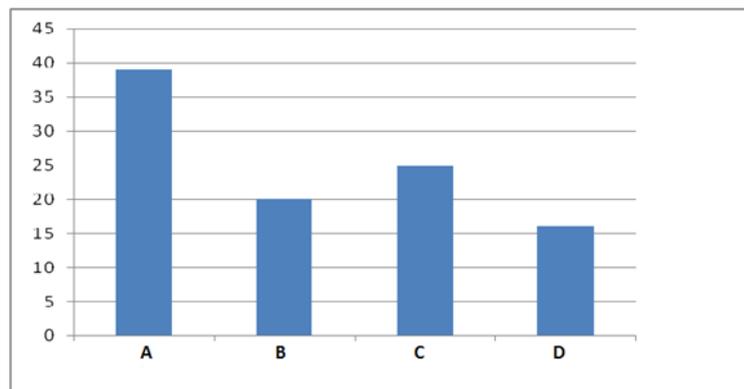
Il est postulé en physique quantique que le résultat d'une mesure effectuée sur une grandeur physique est régi par des probabilités. Cela veut dire, selon vous, que :

- A-** *La Mécanique Quantique est une théorie incomplète*
- B-** *La Nature est elle-même probabiliste*
- C-** *La connaissance humaine est limitée*
- D-** *Je ne sais pas*

Selon la mécanique quantique, on ne peut pas prévoir le résultat d'une mesure avant d'effectuer celle-ci. Ceci implique que la détermination des grandeurs physiques est gouvernée par les probabilités. Il s'agit, à travers cette question, de savoir à quoi les étudiants attribuent cela ?

La figure 4 montre que seuls 20% des étudiants questionnés estiment que la nature est probabiliste (réponse B) contre 54% qui ont répondu soit que la mécanique quantique est une théorie incomplète (39% pour la réponse A), soit que la connaissance humaine est limitée (25% pour la réponse C). Ces résultats sont pratiquement les mêmes que pour la question 1 dont le thème est assez proche de celui de la question présente.

Figure 4



Réponses des étudiants concernant le problème de la mesure en mécanique quantique

Les étudiants ayant donné la réponse A ont argumenté leur réponse par le fait que, selon eux, la mécanique quantique est basée sur des hypothèses et des expériences de pensée et, de plus, ses prévisions sont probabilistes et non exactes:

- « *La mécanique quantique est une théorie incomplète car elle est basée sur des hypothèses et ses prévisions sont probabilistes* ».
- « *La mécanique quantique est une théorie incomplète car elle étudie les phénomènes à l'échelle microscopique et elle est donc obligée d'utiliser les probabilités* ».
- « *La mécanique quantique est une théorie incomplète car elle se base sur des expériences de pensée (qui n'ont pas été réalisées) et, de ce fait, elle peut donner des résultats justes comme elle peut donner des résultats faux* ».

Les étudiants ayant donné la réponse B ont argumenté leur réponse par la complexité de la nature ou par la limitation des appareils de mesure :

- « *La nature interagit avec les observateurs et les dispositifs de mesure et cette interaction est aléatoire, donc régie par les probabilités* ».
- « *La nature est composée au niveau microscopique par des objets ayant une dualité corpusculaire-ondulatoire. C'est pour ça qu'elle est probabiliste* ».

Enfin, les étudiants ayant donné la réponse C ont justifié leur réponse par le caractère limité des sens de l'homme et le pouvoir de résolution limité des appareils de mesure :

- « *La connaissance humaine est limitée car toute mesure est limitée et l'homme n'est pas encore parvenu à faire une mesure infiniment précise* ».

- « *La connaissance humaine est limitée pour plusieurs raisons : l'œil a un pouvoir de résolution limité, la précision des instruments de mesure est limitée, les incertitudes de calcul, etc* ».

Ces résultats illustrent les difficultés de l'enseignement des concepts de la mécanique quantique. Les apprenants restent, en effet, prisonniers du paradigme classique selon lequel les résultats de mesure effectués sous des conditions identiques sont forcément les mêmes. Le caractère foncièrement probabiliste des prévisions de la mécanique quantique demeure un mystère pour ces apprenants puisque seule une petite minorité d'entre eux admet que le problème de la mesure relève d'une propriété intrinsèque de la nature.

Selon les résultats obtenus par l'équipe de Çaliskan, Sezgin Selçuk et Erol (2009), les étudiants turcs sont en accord avec la proposition selon laquelle « *Toute mesure a des limitations naturelles* » et sont en désaccord avec la proposition selon laquelle « *La mesure de la position d'un électron avec le même appareil donne toujours le même résultat* ». Ces résultats semblent relever d'une épistémologie positiviste.

De même, selon les résultats obtenus par Baily (2011), les représentations des étudiants américains en ce qui concerne le problème de la mesure relèvent d'une épistémologie positiviste. En effet, pour la plupart d'entre eux, « *il est possible pour les physiciens de faire avec soin la même expérience et qu'ils obtiennent deux résultats différents qui soient tous les deux corrects* ».

Enfin, selon les résultats obtenus par Pantoja, Moreira & Herskovits (2012), les étudiants brésiliens estiment que le processus de mesure est probabiliste puisque selon eux, « *il y a une probabilité associée à la mesure des variables dynamiques* ».

Les résultats obtenus avec les étudiants algériens montrent que seuls 20% d'entre eux ont une représentation positiviste. On peut expliquer ce contraste avec les résultats des travaux cités ci-dessus par la tradition fortement réaliste du système d'éducation algérien.

Question 5 : les interférences électroniques.

Selon l'expérience de pensée consistant à faire passer des électrons par des trous d'Young, on obtient une figure d'interférence. Dans cette expérience, selon vous :

A- Un électron donné passe par un trou unique

B- Un électron passe par les deux trous en même temps

C- Les ondes associées à deux électrons passant chacun d'eux par un trou interfèrent

D- Je ne sais pas

Ce phénomène a été confirmé par plusieurs expériences dont, en particulier, l'expérience de Davisson et Germer. La question présente consiste à préciser le comportement individuel de chaque électron lorsqu'il passe à travers le dispositif des trous d'Young.

La figure 5 montre les résultats suivants : La majorité des étudiants (66%) ont choisi la réponse C selon laquelle « *les ondes associées à deux électrons passant chacun d'eux par un trou interfèrent* ». 15% d'entre eux pensent qu'un électron passe forcément par un seul trou (réponse A) et 15% estiment qu'un électron peut passer par deux trous simultanément (réponse B).

Les étudiants ayant donné la réponse A ont justifié leur réponse en disant que l'électron est forcément bien localisé puisque c'est une particule:

- « *L'électron passe par un seul trou car, ayant une masse, il ne peut pas passer par deux trous à la fois* ».
- « *L'électron passe par un seul trou et on peut très bien observer par quel trou il passe en l'éclairant avec une lumière* ».

Les étudiants ayant donné la réponse B n'ont pas pu argumenter leur réponse, si ce n'est par des réponses du genre :

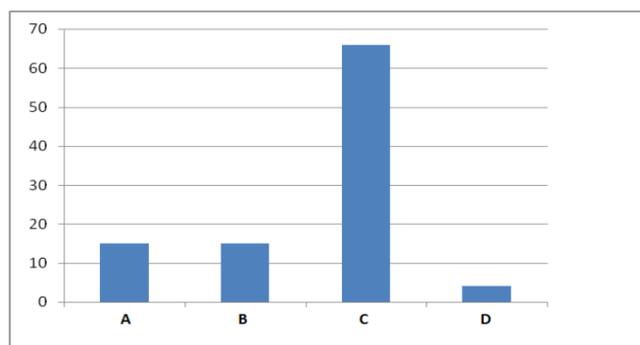
- « *Puisque l'appareillage d'Young comporte deux trous, alors l'électron passe par les deux trous à la fois* ».
- « *L'électron passe par les deux trous à la fois parce qu'il présente deux aspects (corpusculaire et ondulatoire)* ».

Enfin, les étudiants ayant donné la réponse C ont argumenté leur réponse en faisant appel à l'aspect ondulatoire des électrons :

- « *Les ondes associées à deux électrons interfèrent car leur mouvement est ondulatoire* ».
- « *Dans cette expérience, une partie des électrons passe par un trou et une autre partie passe par l'autre trou. Tous ces électrons émettent des ondes qui vont interférer* ».

Il apparaît, d'après ces réponses, que les étudiants font une analogie entre les interférences électroniques et les interférences lumineuses, ce qui est parfaitement légitime. On constate aussi que beaucoup d'étudiants essaient d'expliquer le phénomène d'interférences électroniques en se basant sur l'aspect corpusculaire de l'électron.

FIGURE 5



Réponses des étudiants concernant les interférences électroniques

Comme il a été déjà vu, suite à une question portant sur l'expérience des doubles fentes, Bailly (2011) a constaté que la majorité des étudiants américains sont réalistes et pensent que la fonction d'onde est une onde de matière.

Les résultats obtenus par l'équipe de Pantoja, Moreira & Herskovits (2012), par contre, ont mis en évidence des représentations franchement positivistes des étudiants brésiliens puisque selon ceux-ci :

- *Les interférences des électrons sont dues à une superposition d'états.*
- *La superposition des états consiste en la coexistence de variables dynamiques à propos desquels on peut obtenir une connaissance.*

Cela montre que les résultats obtenus avec les étudiants algériens concordent avec leurs collègues américains mais contrastent avec les résultats des étudiants brésiliens.

Question 6 : Le photon.

Einstein a expliqué l'effet photoélectrique en postulant que la lumière, en tombant sur le métal, se comporte comme étant composée d'entités discrètes (les photons). Le photon est, selon vous :

A- Un être physique existant réellement

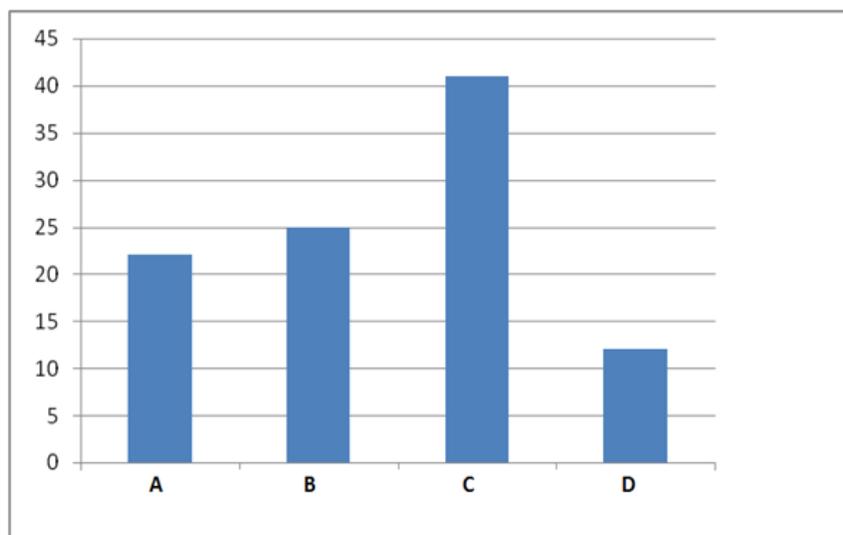
B- Un concept abstrait sans réalité physique

C- La plus petite quantité d'énergie lumineuse qu'on puisse mesurer

D- Je ne sais pas

Le photon introduit par Einstein pour expliquer l'effet photoélectrique est commode, voire nécessaire, pour expliquer l'effet photoélectrique. Le but de cette question est de savoir comment les étudiants se représentent ce concept.

La figure 6 montre les résultats relatifs au concept « photon ». Seul un pourcentage de 22% des étudiants attribue au photon une existence réelle (réponse A) contre 25% d'entre eux qui estiment que c'est un concept abstrait sans réalité physique (réponse B) et 41% qui donnent une signification opératoire à ce concept.

FIGURE 6

Réponses des étudiants concernant le concept « photon »

Les étudiants ayant donné la réponse A ont argumenté leur réponse par des considérations vagues ou tautologiques :

- « *Le photon existe réellement car la lumière a un comportement corpusculaire* ».
- « *Le photon existe réellement car ce que nous observons dans la nature confirme son existence* ».
- « *Le photon est un être physique très petit, quasi-ponctuel* ».

Les étudiants ayant donné la réponse B ont argumenté leur réponse en disant que le photon est une hypothèse et qu'il n'est pas observable :

- « *L'explication d'Einstein de l'effet photoélectrique reposait sur une hypothèse et non sur la mesure ou l'expérience* ».
- « *Le photon est un concept abstrait car il n'a pas de masse et, de ce fait, il n'est pas observable* ».

- « *Le photon est un concept abstrait car personne n'a pu l'observer* ».

Enfin, les étudiants ayant donné la réponse C n'ont pas su argumenter leur réponse. L'un d'eux, en essayant de justifier sa réponse, est tombé dans une contradiction puisque, d'une part, il donne une définition opératoire au concept photon et, d'autre part, il le considère comme particule possédant de l'énergie : « *Le photon est la plus petite énergie qu'on peut mesurer. Il a de l'énergie mais il n'a pas de masse* ».

Ces résultats montrent que la plupart des étudiants n'attribuent pas au photon une existence réelle mais le considèrent soit comme une hypothèse, soit comme un concept traduisant une limite de résolution des appareils de mesure.

Parmi les travaux de référence cités, seul celui de l'équipe de Çaliskan, Sezgin Selçuk et Erol (2009) a abordé la question de la nature de la lumière. La question posée par cette équipe consistait à dire si « *la lumière se comporte toujours comme une onde* ». La majorité des étudiants turcs ont exprimé leur désaccord avec cette proposition. La tournure de la question telle qu'elle a été posée ne permet pas, cependant, de connaître les représentations des étudiants questionnés quant au statut du photon : est-ce une entité réelle ou bien un concept opératoire ou alors une hypothèse de calcul ?

Les réponses des étudiants algériens relatives au statut du photon relèvent d'une épistémologie positiviste et ce, en contraste avec les réponses données aux autres questions qui relèvent, elles, d'une représentation réaliste dans l'ensemble.

En contraste, on constate que les résultats obtenus avec les étudiants algériens mettent en évidence des représentations réalistes et classiques. Ces étudiants ont tendance à interpréter les phénomènes quantiques à travers des paradigmes relevant de la physique classique. Les questions de notre test portaient essentiellement sur les thèmes suivants :

- le principe d'indétermination
- la dualité onde-corpuscule
- le caractère probabiliste des prévisions de la mécanique quantique.

La première de ces notions est interprétée par les apprenants testés en termes d'incertitudes qui seraient dues aux instruments de mesure. La seconde notion est admise par ces apprenants mais ils sont incapables de l'utiliser convenablement pour interpréter les phénomènes. Enfin, l'aspect aléatoire de la physique est perçu comme un probabilisme classique, c'est-à-dire dû à un manque d'information et non pas comme un probabilisme intrinsèque à la nature. De plus, les notions de « *superposition d'états* », de « *non localité* » et de « *processus de mesure* » demeurent des mystères pour les apprenants testés.

Les résultats obtenus avec les étudiants algériens concordent en bonne partie avec ceux obtenus avec les étudiants américains qui semblent imprégnés d'une épistémologie réaliste, empiriste et pragmatique. Un écart notable existe, par contre, entre les réponses des étudiants algériens et celles des étudiants brésiliens puisque les premières révèlent des conceptions basées sur l'empirisme et le réalisme alors que les secondes relèvent d'une conception franchement positiviste. Cet écart s'explique par les approches très différentes des systèmes d'éducation en vigueur dans les deux pays respectifs. En effet, l'Ecole algérienne a une tradition d'enseignement basée sur l'observation, l'expérimentation et l'induction (Oldache, Khiari & Belarbi, 2013, 2014) tandis que l'Ecole brésilienne a une tradition basée sur une approche positiviste (Braga, Guerra & Reis, 2012). En ce qui concerne les étudiants turcs, leurs représentations semblent relever d'une épistémologie hybride qui serait un mélange de réalisme et de positivisme. Les résultats obtenus avec ces derniers se sont révélés en accord partiel avec ceux des étudiants algériens.

CONCLUSION ET PROPOSITIONS DE REMÉDIATION

Notre étude avait pour objet de connaître les postures épistémologiques des apprenants en ce qui concerne la mécanique quantique. La Mécanique Quantique est basée sur la quantification des grandeurs physiques et la description des systèmes physiques au moyen d'une fonction d'onde. De plus, une dualité d'aspects est nécessaire pour rendre compte des phénomènes et le processus de mesure est de nature probabiliste. Notre étude montre que ce changement de concepts, loin d'être évident pour les étudiants, nécessite une certaine phase d'adaptation aux "logiques" de ces théories. Elle montre aussi que les référents épistémologiques des apprenants relèvent essentiellement du réalisme, ce qui entrave leur compréhension des concepts de base de la mécanique quantique.

Les conceptions erronées des apprenants relatives aux concepts quantiques ont amené certains auteurs à proposer différentes approches pédagogiques d'enseignement de la physique quantique. Ainsi, Henry (1990) montre comment la mécanique quantique peut être présentée aux étudiants de manière à voir en cette théorie une description naturelle du monde physique. Les idées de base de la mécanique quantique ne sont pas introduites d'une manière dogmatique mais selon une approche se basant sur le questionnement et la discussion avec les apprenants. Une autre approche consiste à présenter aux apprenants des appareillages expérimentaux utilisés dans l'étude des phénomènes quantiques. L'enseignant, utilisant ces appareillages à titre de démonstration, en fait leur description, explique leur utilisation et introduit alors les concepts permettant de rendre compte des phénomènes observés. Une méthode alternative, apparue dans les années 70 à la faveur de l'essor de l'informatique, consiste à utiliser l'ordinateur et les moyens audio-visuels pour visualiser les phénomènes quantiques et les étudier soit qualitativement soit quantitativement (Summers, 1976; Wise & Kelley, 1977).

L'utilisation d'outils d'enseignement approprié à la physique quantique a été préconisée par plusieurs auteurs. Ainsi le projet CAL (Computer Assisted Learning) a été introduit dans les universités américaines dès les années 70 afin d'améliorer l'enseignement de la physique quantique. Depuis, plusieurs projets furent lancés avec cet objectif, notamment le projet « *Visual Quantum Mechanics* » développé par l'équipe de Zollman (1999). Le but de ces projets n'est pas d'inculquer aux apprenants une conception épistémologique bien précise mais plutôt de remplacer leurs représentations naïves par d'autres plus élaborées.

En ce qui concerne les étudiants algériens, nous pensons qu'une cause principale des difficultés de l'enseignement de la physique quantique est que les concepteurs des programmes ont trop favorisé le formalisme mathématique et négligé la discussion des idées de base. L'introduction d'éléments d'épistémologie et d'histoire de la physique moderne pourrait aider à renforcer la compréhension chez les étudiants. Par ailleurs, un exposé clair et précis des objectifs du cours de physique moderne ne peut être que bénéfique pour l'étudiant. Dans cet ordre d'idée, on estime que le fait d'insister sur les retombées technologiques de cette discipline serait susceptible de motiver encore plus l'étudiant et l'aider à surmonter l'idée que cette matière est rébarbative et trop théorique.

La mécanique quantique est une théorie physique permettant d'expliquer des phénomènes auxquels la physique classique n'a pas accès (notamment ceux intervenant à l'échelle microscopique). En principe, la physique classique est une approximation de la physique quantique (Schiff, 1968). Aussi, il serait instructif pour l'étudiant de connaître les ponts permettant de passer de l'une à l'autre. On suggère, à ce titre, de donner l'importance qu'ils méritent à des thèmes tels que les relations d'Ehrenfest, les approximations semi-classiques, les conditions de validité des lois de la physique classique, etc.

Le principe d'incertitude de Heisenberg est évidemment un principe fondamental de la théorie à tel point que ce physicien a affirmé que si ce principe était mis en défaut, ce serait

toute la théorie qui s'écroulerait. On pense que l'enseignant devrait revenir sur ce principe à plusieurs niveaux de son cours. Celui-ci pourrait être introduit une première fois de manière intuitive en s'appuyant sur l'expérience du microscope de Heisenberg puis des exemples pourraient être donnés et des exercices seraient résolus pour montrer comment utiliser ce principe, notamment pour calculer des ordres de grandeurs (énergie des électrons atomiques, énergie des nucléons, etc.). En dernière étape, après avoir abordé la notion d'observable, le sens exact de Δx et Δp (voir question 1) sera précisé.

Pour ce qui est de la problématique de la fonction d'onde, il faut remarquer que les différentes notions qui lui sont relatives relèvent de différentes époques de l'élaboration de la mécanique quantique. On sait, par exemple que la notion de paquet d'ondes est liée à l'interprétation purement ondulatoire adoptée par Schrödinger. Aussi, il serait judicieux, pour lever l'amalgame, d'attribuer chaque notion enseignée à l'époque où elle a été introduite ou à l'école de pensée correspondante.

Il est vrai que l'interprétation de la fonction d'onde est un problème ouvert. L'étudiant pourrait être conforté de le savoir et de connaître les différentes opinions à ce sujet. Il est vrai qu'une telle initiative nécessite un détour du côté de l'histoire de la physique et de l'épistémologie (Khiari & Oldache, 2000).

Par ailleurs, il se pose la question de savoir s'il est opportun de soulever auprès des étudiants les questions ouvertes, sachant que ce genre de questions ne manque pas en mécanique quantique. Feynman (1965) est d'avis que des notions modernes et avancées peuvent être enseignées aux étudiants très tôt, le tout étant de savoir comment les présenter. On est entièrement de cet avis car on pense que cela stimule l'étudiant et éveille sa curiosité.

RÉFÉRENCES

- Baily, C. R. (2011). *Perspectives in Quantum Physics: Epistemological, Ontological and Pedagogical, an investigation into student and expert perspectives on the physical interpretation of quantum mechanics, with implications for modern physics instruction*. PhD. thesis, University of Colorado at Boulder, Department of Physics.
- Braga, M., Guerra, A., & Reis, J. C. (2012). The nature of Science in the Laboratory: the problem of realism. *Proceedings of IOSTE XV (Science and Technology Education for Development, Citizenship and Social Justice)*, Tunisia, 23 October - 3 November 2012.
- Çaliskan, S., Sezgin Selçuk, G., & Erol, M., (2009). Student understanding of some Quantum Physical concepts. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 3, 202-205.
- Feynman, R. (1965). *The Feynman Lectures on Physics*. California: California Institute of Technology.
- Fishchler, H., & Lichtfeldt, M. (1991). Learning Quantum Mechanics. In *International Workshop for Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. University of Bremen, March 4-8, 1991.
- Henry, R. C. (1990). Quantum Mechanics made transparent. *American Journal of Physics*, 58(11), 1087-1100.
- Khiari, C. E., & Oldache, M. (2000). The problem of concepts in physics. In *Quatrième Congrès National de la Physique et ses Applications*, Sidi Fredj (Algérie), non édité.
- Oldache, M., Khiari C. E. & Belarbi, T. (2013). Student's representations about the role of experiment, law, model and theory in physics. *Lat. Am. Phys. Educ.*, 7(2), 175-180.
- Oldache, M., Khiari C. E., & Belarbi, T. (2014). Conceptions de futurs enseignants de sciences physiques de lycée à propos de la démarche scientifique. *Skholé*, 18(1), 481-490.

- Pantoja, C. C., Moreira, M. A., & Herskovits, V. E. (2012). Implementation of a didactic proposal on fundamental concepts of quantum mechanics with students of a professional master's degree in physics teaching. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 6(4), 519-529.
- Schiff, L. I. (1968). *Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill Inc.
- Styer, D. F. (1996). Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 64(1), 31-34.
- Summers, M. K. (1976). The analogue computer as an aid to teaching elementary quantum mechanics. *Physics Education* 11(4), 296-302.
- Wise, M. N., & Kelley, T. G. (1977). Fundamental quantum mechanics – a graphic representation. *American Journal of Physics*, 54(4), 384-394.
- Zollman, D. (1999). Visual Quantum Mechanics. In *Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching*. Kansas State University, Manhattan, March 1999.