

# Ce que nous apprend l'histoire des sciences à propos du concept de fonction d'onde et impact sur l'enseignement de la physique quantique

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'introduction de la notion de fonction d'onde en mécanique quantique s'est faite de manière progressive, débutant par l'idée originelle d'« onde pilote » introduite par de Broglie et se terminant par l'interprétation de l'École de Copenhague. On revient ici aux sources historiques de ce concept afin de mieux connaître son évolution au cours de l'histoire. On estime que cette démarche permettra de mieux comprendre l'enjeu (ou les enjeux) de l'interprétation de la mécanique quantique. Cette étude a également un objectif didactique dans la mesure où elle permettra de discuter l'opportunité de l'introduction d'un enseignement de l'histoire des sciences dans le cursus universitaire des futurs physiciens, physiciens-ingénieurs et enseignants du cycle secondaire.*

## MOTS-CLÉS

*Histoire des sciences, fonction d'onde, interprétation de la mécanique quantique, épistémologie*

## ABSTRACT

*The introduction of the notion of wave function in quantum mechanics was historically done in a progressive manner, beginning with the original idea of “pilot wave” introduced by de Broglie and finishing with the interpretation of Copenhagen School. One returns here to the historical sources of this concept in order to know better its evolution along history. One believes that this method will allow understanding better the importance of the right interpretation of quantum mechanics. This study has also an educational objective in the sense that it will allow to discuss the opportunity of introducing the teaching of science history in the university programs for the future physicians, engineering physicians and teachers in high schools.*

## KEYWORDS

*Science history, wave function, interpretation of quantum mechanics, epistemology*

## INTRODUCTION

Plusieurs études en Didactique ont montré que les conceptions erronées des apprenants s'apparentaient en partie aux erreurs commises par les scientifiques au cours de l'histoire. En ce qui concerne la physique quantique, plus particulièrement, certains travaux (Fletcher, 2004; Baily, 2011; Çaliskan, Sezgin Selçuk & Erol, 2012; Pantoja, Moereira & Herscovitz, 2012) ont montré que les conceptions erronées étaient dues parfois au fait que les apprenants avaient tendance à interpréter les phénomènes quantiques sur la base de concepts classiques. On s'intéresse ici à la problématique liée au concept de « fonction d'onde » qui représente une notion clef en physique quantique.

Le concept de fonction d'onde est une notion clef en mécanique quantique. Depuis son introduction par de Broglie (1925), ce concept n'a pas cessé d'évoluer, ce qui a entraîné l'apparition de nombreuses Écoles d'interprétation de la mécanique quantique. Une étude historique s'avère nécessaire pour distinguer les différentes étapes de l'élaboration de la théorie quantique d'une part et pour mieux connaître les divers courants de pensée d'autre part. En effet, les programmes d'enseignement évoquent des notions disparates telles que l'onde pilote, le paquet d'onde et l'amplitude de probabilité. Il n'est pas toujours aisé pour l'apprenant de faire le lien entre ces différentes notions. Renvoyer chacune d'elles à l'époque de son apparition ou au courant de pensée correspondant permettrait de mieux clarifier les choses et de faciliter leur assimilation par l'étudiant.

## ÉVOLUTION DU CONCEPT DE « FONCTION D'ONDE »

En conséquence au principe d'incertitude de Heisenberg qui interdit la connaissance simultanée des variables dynamiques conjuguées, les physiciens ont renoncé à décrire l'état d'un système physique dans un cadre spatio-temporel. Selon la mécanique quantique, l'état d'un système physique doit être décrit par une fonction d'onde (ou plus généralement par un vecteur généralisé appelé « *ket* »). Ce vecteur généralisé est un élément d'un espace vectoriel appelé « *espace des états* » ayant la structure d'un espace de Hilbert. Les variables dynamiques, elles, sont représentées par des opérateurs et ce, conformément au principe de correspondance de Bohr. En effet, ce principe stipule qu'à toute variable dynamique doit correspondre un opérateur mathématique possédant certaines propriétés (linéarité, hermiticité...). Selon l'École de Copenhague, la fonction d'onde obéit à la logique suivante (Jammer, 1974) :

- i. Elle n'a pas d'autre signification physique que de représenter une amplitude de probabilité.
- ii. Elle contient toute l'information possible sur l'état du système.
- iii. Sa dynamique est régie par l'équation de Schrödinger.
- iv. Elle subit une transition brusque et acausale lorsqu'on effectue une mesure sur le système physique.

Ces idées entourant le concept de fonction d'onde n'ont pas été émises spontanément mais ont été le fruit des travaux menés par plusieurs physiciens dont, à leur tête, Niels Bohr. On peut distinguer trois époques principales quant à l'évolution des idées relatives à ce thème (d'Abro, 1950) :

- i. L'époque de quantification (1900-1924).
- ii. L'époque ondulatoire (1924-1927).

iii. L'interprétation de Copenhague (1927-1940).

L'époque de la quantification correspond à l'introduction de la notion de quantification de l'énergie par Planck (1901) et celle de photon par Einstein (1905). La quantification a été appliquée avec succès à l'atome d'hydrogène par Bohr et Sommerfeld et a permis d'expliquer de nombreux phénomènes se déroulant aux échelles atomique et nucléaire.

L'époque ondulatoire débute par l'attribution d'une longueur d'onde à toute particule en mouvement (aspect ondulatoire de la matière) par de Broglie et se termine par la découverte d'une « *équation d'onde* » qui n'est autre que l'équation de Schrödinger. Il est intéressant de noter que Schrödinger a commencé par chercher une équation relativiste (dite équation de Klein-Gordon) mais qu'il a dû y renoncer, se contentant d'une équation non relativiste. Ce n'est que plus tard que Dirac a trouvé une équation d'onde relativiste satisfaisante.

L'interprétation de Copenhague est venue couronner l'achèvement de la construction de la mécanique quantique mais il faut souligner que cette interprétation n'est pas la seule possible. En effet, d'autres interprétations ont été avancées très tôt (théorie de la double solution, théorie des variables cachées, etc.). Cependant, avec la tenue du 5<sup>ème</sup> congrès de Solvay, la plupart des physiciens ont adhéré à l'interprétation de Copenhague. Aujourd'hui, plusieurs Écoles d'interprétation de la mécanique quantique se concurrencent à nouveau, un des enjeux principaux étant la signification de la fonction d'onde.

## COURANTS D'INTERPRÉTATION DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Les faits expérimentaux de la physique moderne (en physique atomique et nucléaire, physique des solides, cristallographie...) ont révélé que la nature présentait un double aspect, l'un corpusculaire et l'autre ondulatoire. Selon le principe de complémentarité de Bohr, ces deux aspects, bien que s'excluant l'un l'autre, sont tous les deux nécessaires pour rendre compte de ces faits expérimentaux. Cependant, on ne peut mettre en évidence dans une expérience donnée que l'un des deux aspects. Par ailleurs, plusieurs considérations ont amené les tenants de l'école de Copenhague à renoncer à attribuer à la fonction d'onde un sens physique et à considérer celle-ci uniquement comme une simple amplitude de probabilité. Plusieurs physiciens, non satisfaits de cette attitude, ont cherché d'autres alternatives (Jammer, 1974) :

- Selon la théorie de la double solution, il existerait deux ondes, l'une réelle, accompagnant et guidant la particule dans son mouvement et l'autre représentant une amplitude de probabilité. Cette théorie, née d'une idée émise par de Broglie, a été développée ultérieurement par Bohm.
- Selon la théorie des variables cachées, la fonction d'onde ne contient pas toute l'information concernant le système. L'ajout de variables cachées peut rétablir le déterminisme en physique. Albert Einstein a été un fervent défenseur de cette thèse.
- Selon une variante de cette théorie, due à Vigier et Bohm, il existerait un milieu sub-quantique jouant le rôle d'un « *thermostat caché* ». Ce milieu exercerait des perturbations aléatoires sur le mouvement de la particule et celle-ci, au lieu de suivre une trajectoire régulière, saute constamment d'une trajectoire à une autre, ce qui justifierait le caractère aléatoire du comportement de la particule.

L'interprétation de Copenhague a suscité des critiques de la part d'éminents physiciens tels que Bohm, Schrödinger et Einstein. En particulier, le problème de la réduction de la fonction d'onde a amené Schrödinger à imaginer en 1935 une expérience de pensée connue sous le nom de « *paradoxe du chat de Schrödinger* » et qui met en évidence, selon son auteur, des lacunes dans l'interprétation de Copenhague. L'expérience consiste à enfermer un chat dans une boîte où on place également un dispositif de mise à mort du chat commandé par des électrons émis par une source radioactive. Selon la mécanique quantique telle qu'interprétée par l'École de Copenhague, l'atome radioactif se trouve à un instant donné dans une superposition d'un état désintégré et d'un état non désintégré. En conséquence, tant que la boîte reste fermée, le chat se trouve, selon cette interprétation, dans une combinaison d'un état « chat mort » et un état « chat vivant ». Ce n'est que lorsqu'on effectue une mesure (i.e. quand quelqu'un ouvre la boîte) que le chat sera soit mort, soit vivant.

De nombreux auteurs ont cherché à résoudre ce paradoxe du chat de Schrödinger en attribuant un rôle décisif à un facteur donné : soit une variable cachée, soit l'appareil de mesure, soit la conscience de l'observateur, soit l'existence de mondes multiples ou encore la décohérence (Paty, 2000) :

- Selon les partisans des théories des variables cachées, l'état final du chat est déterminé par un paramètre qu'on ne connaît pas mais qui détermine l'instant précis où se produit la désintégration de l'atome.
- Selon Mattuck, c'est la conscience de l'observateur qui provoque la réduction de la fonction d'onde mais, dans une variante de cette expérience de pensée, on ajoute dans la boîte une caméra et une horloge. Après une certaine durée, on ouvre la boîte et on trouve le chat mort, par exemple. Or, en visionnant le film, on s'aperçoit que la mort du chat s'est produite bien avant l'ouverture de la boîte. Dans ce cas là, la conscience de l'observateur n'a pu intervenir pour réduire la fonction d'onde. Mais Mattuck et de Beauregard répondirent à cet argument en postulant que l'interaction entre la conscience et la matière est capable de remonter le temps.
- Selon Wigner, la conscience de l'observateur n'est pas la seule en mesure de provoquer la réduction de la fonction d'onde mais celle du chat lui-même est également capable de le faire. Il avança, à l'appui de cette thèse, une expérience de pensée appelée « *l'ami de Wigner* ».
- Selon Everett, il n'y a pas de réduction de la fonction d'onde mais, à chaque mesure, tous les résultats possibles se réalisent chacun dans un univers différent. C'est la thèse des « *multi-univers* » appelée encore thèse des « *mondes parallèles* ».
- Selon une autre École de pensée, initiée par Zeh dans les années 1970 et développée par Omnès, Zurek et Griffiths dans les années 1980, la superposition des états quantiques n'a lieu que pour les objets microscopiques. Pour les objets macroscopiques, les interactions avec le milieu entraînent une décohérence de la fonction d'onde.

Il faut remarquer que les courants de pensée ci-dessus ne sont qu'un échantillon parmi une panoplie d'interprétations qu'il serait fastidieux de citer de manière exhaustive.

## DIFFICULTÉS LIÉES À L'ENSEIGNEMENT DU CONCEPT « FONCTION D'ONDE »

Les travaux cités ci-haut ont montré que dans l'enseignement-apprentissage de la physique quantique, les apprenants avaient tendance généralement à interpréter les phénomènes quantiques en se basant sur des paradigmes classiques. Ils ont beaucoup de difficultés, en particulier, à utiliser le concept de fonction d'onde pour expliquer les phénomènes quantiques, alors que c'est là un concept-clé dans ce domaine. Nous avons mené, pour notre part, une étude de terrain afin de cerner les difficultés et conceptions erronées des apprenants liées à ce concept. Cette étude a été menée sur des étudiants de troisième année de licence de l'École Normale Supérieure d'Alger ayant suivi un cours de physique quantique. L'échantillon comportait 81 étudiants dont 62% de filles et 38% de garçons et la tranche d'âge était comprise entre 20 et 24 ans. Ces étudiants étaient tous volontaires afin de ne pas forcer ceux d'entre eux qui ne désiraient pas répondre au questionnaire.

L'étude part des questionnements suivants :

- Les apprenants utilisent-ils correctement le concept de fonction d'onde ?
- Les raisonnements des apprenants se basent-ils sur la physique classique ou la physique quantique ?
- Le mode de raisonnement des apprenants s'apparente-t-il à une épistémologie réaliste, à une épistémologie positiviste ou à une autre épistémologie ?

L'étude a été menée au moyen d'un questionnaire semi-ouvert (voir annexe) comportant dix questions qui portaient sur des notions liées au concept de fonction d'onde (telles que la quantification des grandeurs physiques, la superposition des états physiques, le principe d'incertitude...). Le questionnaire a été élaboré par nos soins mais certains items ressemblent à ceux de questionnaires utilisés dans des études antérieures. La passation du questionnaire s'est faite en classe après un cours de chimie mais seuls des étudiants volontaires ont participé. La supervision a été assurée par un autre enseignant que celui qui enseigne la mécanique quantique et ce, afin d'éviter toute influence sur les étudiants questionnés. Les résultats de notre étude ont été comparés à ceux obtenus dans des travaux antérieurs et concernant des apprenants américains (Baily, 2011), turcs (Çaliskan, Sezgin Selçuk & Erol, 2009) et brésiliens (Pantoja, Moereira & Herscovitz, 2012). Ces résultats peuvent être synthétisés comme suit.

Seuls 20% des étudiants questionnés estiment que le principe d'indétermination est une propriété fondamentale de la nature. Les compléments de réponses formulés par les étudiants montrent 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. En ce qui concerne les travaux de Baily, 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 américains 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.

38% des étudiants pensent que la quantification de l'énergie est « *une propriété intrinsèque de la nature* ». Dans le travail de l'équipe de Pantoja, le test utilisé ne comportait pas de question sur la quantification de l'énergie proprement dite mais un item 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 de l'équipe de Pantoja concordent avec ceux obtenus avec les étudiants algériens.

85% des étudiants estiment que l'onde attribuée par de Broglie à toute particule en mouvement est une vraie onde physique. L'École de Copenhague enseigne, par contre, que c'est une entité mathématique sans signification physique. Selon les résultats obtenus par l'équipe de Çaliskan, les étudiants ont exprimé leur désaccord avec le fait que « *l'électron se comporte toujours comme une particule* ». On peut dire que les représentations des étudiants algériens vis-à-vis de ce thème relèvent d'une épistémologie réaliste tandis que celles des étudiants turcs sont apparentées à une épistémologie positiviste.

71% pensent que, dans l'expérience d'interférence des électrons par un mécanisme de trous d'Young, « *chaque électron passe forcément par un trou donné* ». La physique quantique enseigne, par contre, que ce phénomène relève de l'aspect ondulatoire de la matière et qu'il ne peut être expliqué par l'aspect corpusculaire. Selon les travaux de Baily, 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 avec ceux obtenus avec leurs collègues américains.

On peut tirer de ces résultats les conclusions suivantes en ce qui concerne les étudiants algériens questionnés :

- Le principe d'indétermination est interprété en termes d'incertitudes qui seraient dues aux instruments de mesure.
- En ce qui concerne la quantification, il n'est pas clair pour les apprenants questionnés si c'est une propriété de la nature ou si elle représente une limitation des appareils de mesure.
- La dualité onde-corpuscule est admise par les étudiants mais ils sont incapables de l'utiliser convenablement pour interpréter les phénomènes.
- Enfin, l'aspect aléatoire de la physique quantique est perçu comme un probabilisme classique, c'est-à-dire dû à un manque d'information et non à un probabilisme intrinsèque à la nature.

Les réponses des apprenants questionnés, en ce qui concerne la plupart des questions, relèvent de représentations classiques et empiristes, à l'exception des questions sur la quantification et le photon qui relèvent d'une représentation positiviste. 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 et empiriste. 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'École algérienne a une tradition d'enseignement basée sur l'observation, l'expérimentation et l'induction tandis que l'École brésilienne, comme l'a expliqué Braga, a une tradition basée sur une approche positiviste. 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. Enfin, ces résultats illustrent le fait que les conceptions erronées des apprenants relatives à la physique quantique

sont dues en bonne partie à des difficultés de compréhension des notions de base telle que la quantification, le principe d'indétermination, la superposition des états, la dualité onde-corpuscule... Une étude préliminaire (Ladj, Oldache & Khiari, 2010) a montré que l'inclusion d'éléments d'épistémologie dans l'enseignement de la physique quantique au niveau universitaire permettrait de réduire le taux des conceptions erronées de manière significative dans ce domaine. D'autres études sont cependant nécessaires afin de confirmer cette assertion.

## CONCLUSION

Un retour aux origines historiques de la mécanique quantique est susceptible de mieux nous faire comprendre le débat épistémologique entourant cette théorie à l'heure actuelle. Il peut nous aider également à améliorer notre enseignement de cette matière en ramenant chaque concept à l'époque où il a été formulé ou à l'École de pensée correspondante. L'interprétation de la mécanique quantique et, en particulier, la signification de la fonction d'onde restent des questions ouvertes puisqu'à l'heure actuelle de nombreuses interprétations se concurrencent. Les travaux menés jusqu'ici semblent toutefois mettre en évidence plusieurs avancées conceptuelles telles que : la non localité, le rôle de la conscience, la décohérence quantique, les processus relationnels, etc. En plus de leur intérêt théorique (voire philosophique), ces travaux ouvrent des perspectives technologiques inédites telles que l'information quantique, la cryptographie quantique, la téléportation, l'ordinateur quantique... Enfin, l'intérêt de l'introduction de l'aspect historique dans l'enseignement des concepts de la physique de façon générale a été souligné par plusieurs auteurs (Audigier & Fillon, 1991; Merle, 2005; Lounis, 2012). Il en est de même pour le concept de fonction d'onde en physique quantique (Oldache & Khiari, 2007, 2010, 2015). Les résultats de l'étude empirique présente renforce encore plus l'opportunité de l'utilisation de l'épistémologie et l'histoire des sciences dans l'enseignement de la physique quantique à l'université.

## RÉFÉRENCES

- Abro, A. d' (1950). *The evolution of scientific thought from Newton to Einstein*. New York: Dover Publications Inc.
- Audigier, F., & Fillon, P. (1991). *Enseigner l'Histoire des sciences et des techniques*. Paris: INRP.
- 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, USA.
- Broglie, L. de (1925). Recherches sur la théorie des quanta. *Annales de Physique*, 3, 22-128.
- Çalışkan, S., Sezgin Selçuk, G., & Erol, M. (2009). Student understanding of some Quantum Physical concepts. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 3, 202-205.
- Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. (Trad. : Un point de vue heuristique concernant la conception et la transformation de la lumière). *Annalen der Physik*, 17, 132-148.

- Fletcher, P. R. (2004). *How tertiary level Physics students learn and conceptualise Quantum Mechanics*. PhD Thesis, School of Physics, University of Sydney, Australia.
- Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics: the interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York: Wiley.
- Ladj, R., Oldache, M., Khiari, C.E., & Belarbi, T. (2010). On students' misunderstanding of the basic concepts of Quantum Mechanics: the case of Algerian Universities. *Latin American Journal of Physics Education*, 4(2), 286-293.
- Lounis, A. (2012). *Culture scientifique et difficultés d'étudiants en physique : éclairage de l'histoire des sciences*. Paper presented at Congrès International de Pédagogie Universitaire AIPU 2012, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada.
- Merle, H. (2005). Histoire des sciences et sphéricité de la Terre : compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, 22, 115-135.
- Oldache, M. & Khiari C. E. (2007). Concepts et principes de base en mécanique quantique. *Revue Algérienne de Physique*, 2, 29-43.
- Oldache, M., & Khiari, C. E. (2010). Problèmes didactiques liés à l'enseignement de la physique moderne à l'université. *Revue Africaine de Didactique des Sciences et des Mathématiques*, 5, <http://www.radisma.info/document.php?id=916>. ISSN 1990-3219.
- Oldache, M. & Khiari, C. E. (2015). Représentations d'apprenants relatives aux concepts quantiques. *Educational Journal of the University of Patras UNESCO Chair*, 2(1), 184-197.
- Pantoja, C. C., Moereira, M. A., & Herscovitz, 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.
- Paty, M. (2000). On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Revue Internationale de Philosophie*, 212(2), 199-242.
- Planck, M. (1901). Ueber das Gesets der Energieverteilung in Normalspectrum (Trad. : Sur la théorie de la loi de la distribution d'énergie du spectre normal). *Verh. De Deutsh. Physik Gesellscaff*, 4, 553-558.

## ANNEXE

### QUESTIONNAIRE RELATIF AUX CONCEPTS DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

**Note :** ce questionnaire n'est pas un examen (n'écrivez pas votre nom sur la feuille) mais un moyen d'évaluation de l'enseignement du cours de mécanique quantique (vos réponses peuvent contribuer à améliorer cet enseignement). Veuillez répondre aux questions en mettant une croix devant la réponse choisie. Si vous avez un doute, vous pouvez choisir la réponse « pas d'idée précise ». Vous avez également la possibilité d'apporter des précisions complémentaires pour votre réponse à chaque question. Merci pour votre participation.

#### Question 1 :

La quantification de l'énergie est selon vous :

- Une réalité imposée par les données expérimentales
- Une astuce artificielle pour établir la loi de rayonnement du corps noir
- Une hypothèse théorique sans preuve expérimentale
- Pas d'idée précise

#### Question 2 :

La quantification du moment cinétique représente :

- Une hypothèse théorique sans preuve expérimentale
- Une astuce artificielle pour retrouver les spectres des atomes
- Une réalité imposée par les données expérimentales
- Pas d'idée précise

#### Question 3 :

D'après vous, que représente la fonction d'onde ?

- Une vraie onde physique
- Une fonction liée à la distribution de charge de l'électron au sein de l'atome
- Un artifice mathématique pour décrire le mouvement de la particule
- Pas d'idée précise

#### Question 4 :

Le mouvement d'une particule libre est décrit par :

- Une onde plane monochromatique
- Un paquet d'onde
- Parfois une onde monochromatique et parfois un paquet d'onde
- Pas d'idée précise

#### Question 5 :

D'après le principe d'incertitude de Heisenberg,

- Il est possible de déterminer à la fois la position et l'impulsion d'une particule
- Impossible de les déterminer simultanément
- Possible de le faire à condition de connaître les variables cachées
- Pas d'idée précise

#### Question 6 :

Le principe d'incertitude est relié à :

- L'aspect ondulatoire
- L'aspect corpusculaire
- Parfois à l'aspect ondulatoire et parfois à l'aspect corpusculaire
- Pas d'idée précise

**Question 7 :**

D'après le principe de superposition, la particule se trouve généralement, avant la mesure, dans :

- Un état bien défini
- Une superposition d'états
- Aucun état
- Pas d'idée précise

**Question 8 :**

D'après le même principe, la particule se trouve, après une mesure, dans :

- Un état bien défini
- Une superposition d'états
- Aucun état
- Pas d'idée précise

**Question 9 :**

Selon le principe de complémentarité, l'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire :

- Peuvent se manifester simultanément lors d'une même expérience
- La mise en évidence de l'un exclut celle de l'autre
- N'ont aucune relation l'un avec l'autre
- Pas d'idée précise

**Question 10 :**

Toujours selon ce principe, l'électron se comporte :

- Comme une onde et comme une particule simultanément
- Parfois comme une onde et parfois comme une particule
- Ni comme une onde ni comme une particule
- Pas d'idée précise