

Modes de raisonnement des étudiants Tunisiens en Mécanique Quantique

Hassen Haddad ⁽¹⁾

Kaouther Rassaa ⁽¹⁾

Habib Batis ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Étude des Nano Matériaux et leurs Applications (EMNA)

Résumé

Il s'agit d'une recherche exploratoire de didactique universitaire qui cherche à comprendre la façon dont les étudiants articulent le formalisme mathématique de la théorie quantique et les données d'expérience lues à travers le phénomène d'interférence quantique. Le cadre théorique de la problématisation et particulièrement l'espace de contraintes et de nécessités a été utilisé pour rendre compte des raisonnements des étudiants.

Pour cela, nous avons utilisé une méthodologie fondée sur des entretiens individuels semi directifs réalisés avec des étudiants en fin de formation universitaire. Ces entretiens ont permis de constater que la mobilisation de l'image classique de l'électron et les modèles imagés qui lui sont associés pour rendre compte de son comportement ondulatoire ont empêché le développement d'un schéma de pensée adéquat avec les contraintes imposées par le formalisme de la mécanique quantique.

Mots-clés

Didactique, Mécanique quantique, Problématisation, modes de raisonnement, interférences électroniques.

Reasoning modes of Tunisian students in Quantum Mechanics

Abstract

This paper is an exploratory research of university didactics. It seeks to understand how students articulate the mathematical formalism of quantum theory as well as the experience of data of the quantum interference process. On this basis, we set out a theoretical framework of the problematization and especially the space of "constraints and necessities". They were set up to understand the reasoning of the students.

Thus, we used a methodology based on individual semi-directive interviews with students at the end of their university training. These interviews have shown that the mobilization of the classic image of the electron and the associated intuitive models have prevented the development of an adequate pattern of thinking with the constraints imposed by the formalism of quantum mechanics.

Key-words

Didactics, Quantum mechanics, Problematization, reasoning modes, electronic interference.

Introduction

La mécanique quantique apparaît comme une théorie assez singulière. Elle s'est imposée comme un outil très puissant permettant aux physiciens de mener à bien leur activité de recherche, malgré les débats acharnés qu'elle a soulevés. Parmi les questions controversées de la physique quantique, la question de la signification physique de son formalisme mathématique a fait couler le plus d'encre. En effet le formalisme mathématique de la théorie quantique n'entretenait qu'un lien indirect avec les données d'expérience, et les phénomènes quantiques. Ceci a amené Richard Feynman à déclarer : « *Je crois pouvoir dire à coup sûr que personne ne comprend la mécanique quantique* » (Feynman, 1965, p. 154).

Les difficultés conceptuelles qui ont marqué la genèse de quelques concepts du formalisme quantique, au premier rang desquels la fonction d'onde, laissent présager des difficultés de compréhension et d'apprentissage pour les étudiants de physique. Il nous semble même que la situation devient plus complexe lorsqu'on envisage le passage du savoir savant au savoir à enseigner. Il nous paraît que la manière dont les étudiants rendent raison des phénomènes quantiques et particulièrement l'articulation qu'ils établissent entre le formalisme mathématique de la théorie quantique et les données d'expérience mérite une étude didactique précise. Surtout que les travaux didactiques qui ont porté sur cette partie de la physique bien qu'elles soient assez limitées comparativement à la physique classique, ont mis en évidence l'existence de sérieuses difficultés relatives à l'apprentissage de la physique quantique dues particulièrement à l'incapacité à attribuer un sens physique aux concepts quantiques (Bélanger 2008 ; Baily 2009 ; Oldache 2015).

Dans le cadre de cet article, nous nous intéresserons à la manière dont les étudiants expliquent le phénomène d'interférence quantique que Feynman (1979) considère comme « *le point fondamental du comportement mystérieux [des objets quantiques] sous son aspect le plus étrange. C'est un phénomène qu'il est impossible, absolument impossible à expliquer de façon classique et qui contient le cœur de la mécanique quantique. En réalité, il en contient l'unique mystère* ». (Feynman, 1979).

Dans ce qui suit nous proposons tout d'abord d'exposer notre cadre théorique avant de préciser la méthode de recueils et d'analyse des données convoqués dans cette étude. La dernière partie sera consacrée à la présentation et la discussion des résultats les plus saillants.

Cadre théorique

En se basant sur le rapprochement développé par Lhoste (2008) entre l'explication et la problématisation dans les sciences expérimentales, nous avons estimé que le cadre théorique de la problématisation, développé par les travaux de l'équipe de CREN autour de M. Fabre et C. Orange (1997), peut nous fournir des outils utiles pour analyser les explications avancées par les étudiants. Le processus de problématisation selon Fabre (1999) prend forme dans un double dédoublement. Le premier dédoublement met en relation des éléments relevant du registre des modèles des constructions intellectuelles visant à expliquer avec des éléments du registre empirique, celui des phénomènes et des faits. Le second dédoublement permet de distinguer « *d'un côté ce qui relève de l'assertorique, ce qui est ainsi (les faits et les idées et les liens entre ces faits et ces théories) et sur un autre plan, ce qui relève de l'apodictique et qui fonde les idées en nécessité* ». (Lhoste & Peterfalvi, 2009). Ainsi le produit de l'activité de problématisation peut être représenté par un « *espace contraintes et nécessités* » permettant de mettre « *l'accent sur les raisonnements (ou argumentations) auxquels les élèves procèdent dans le processus de problématisation. Cet espace permet également de faire figurer les contraintes théoriques, mobilisées plus ou moins implicitement* » (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 82). Lhoste (2008) considère « *comme contrainte un déjà-là convoqué dans un raisonnement actuel, alors qu'une nécessité serait un construit nouveau, sur la base d'un raisonnement* » (Lhoste, 2008, p. 75).

Compte tenu de notre cadre théorique et de notre concentration sur la question du sens physique du formalisme quantique nous pourrions formuler précisément notre question de recherche. Il s'agit de chercher à identifier, d'une part, le cadre conceptuel et théorique dans lequel s'élabore l'activité de problématisation développée par les étudiants en lien avec la production d'explication du phénomène d'interférence quantique et d'autre part, de révéler les raisons qui contraignent l'articulation des données empiriques aux grandeurs abstraites de la mécanique quantique.

Méthodologie

Afin de faire expliciter les raisonnements des étudiants après apprentissage, notre recherche s'est fondée sur une méthodologie basée sur la technique des entretiens individuels semi-directifs avec dix étudiants de deuxième année de Mastère ayant étudié la physique quantique, durant deux ou trois années de formation universitaire. La durée de chaque entretien varie de 30 minutes à 45 minutes selon la richesse de la discussion et les thèmes évoqués.

1. Description et Justification de la situation proposée : L'expérience des fentes de Young

L'expérience d'interférence des doubles fentes de Young, consiste à émettre, un-à-un, un très grand nombre d'électrons par une source vers un interféromètre, pour observer à la fin une figure d'interférence. Cette expérience a joué un rôle déterminant dans le débat sur l'interprétation du formalisme quantique en effet elle permet d'illustrer un bon nombre de problématiques centrales de la physique quantique (Paty, 2012). Ces problèmes se rapportent à la dualité onde-corpuscule, l'interprétation probabiliste et le problème de mesure

2. Guide de l'entretien

Les étudiants sont invités à expliquer oralement ce qui s'est passé lors de ces expériences. Notre intervention consiste à poser des questions afin de faire avancer la discussion ou de réorienter les propos de l'étudiant sur des points qu'il n'a pas abordé spontanément.

Le choix des questions a été établie sur la base d'une analyse a priori, de type épistémologique, des principales interprétations quantiques du phénomène abordé (Haddad, 2017).

- Comment la figure d'interférence est-elle obtenue ?
- Pourquoi certaines zones seraient privilégiées et d'autres interdites aux électrons ?
- Peut-on savoir par quelle fente est passé l'électron ?
- Pourquoi deux électrons préparés, dans ce qui paraît être des conditions initiales identiques, ont des points d'impacts différents ?
- Comment expliquer la disparition de la figure d'interférence lorsqu'on place un détecteur ?

3. Grille d'analyse

Nous proposons de modéliser le raisonnement des étudiants sous la forme d'un espace de contraintes et de nécessités (Lhoste, 2008). Pour cela nous avons effectué une analyse macro suivie d'une analyse micro des transcriptions des entretiens des étudiants.

L'analyse macroscopique nous a permis d'effectuer une réduction du corpus étudié afin de ne retenir que les extraits des transcriptions qui sont en rapport avec les thèmes fixés par le guide de l'entretien. Ce nouveau corpus a été découpé en épisodes selon les questions relatives au phénomène d'interférences quantiques qui ont été discutées lors de chaque entretien. C'est à partir de ce découpage en épisodes que les analyses microscopiques fines des propositions des étudiants ont été élaborées afin de suivre, au plus près, la manière avec laquelle ils construisent des nécessités, à partir de contraintes empiriques ou théoriques.

Afin de construire l'espace de contraintes et de nécessité, nous avons essayé d'une part de distinguer dans les propos des étudiants, entre ce qui relève du registre empirique (RE), ce qui relève du registre des modèles (RM) et ce qui correspond à une mise en relation des deux registres (RE-RM), et d'autre part, le repérage des contraintes et des nécessités. Pour pouvoir catégoriser les éléments des deux registres (RE/RM) il convient de préciser ce qui permet de les distinguer. Nous considérons que :

- Le registre empirique RE comprend les événements, et des données qui proviennent de l'observation ou de la mesure.
- Le registre des modèles RM comprend les tentatives explicatives des éléments du registre empirique : des concepts physiques, des lois, des principes, des formules ou des équations mathématiques.

L'attribution du statut de contrainte ou de nécessité aux éléments de chaque registre n'est pas évidente. Il convient alors de préciser ce qui permet de les distinguer. Pour cela, nous adoptons la proposition de Lhoste (2008) qui considère comme contrainte un déjà-là convoqué dans un raisonnement actuel. Il distingue entre contraintes empiriques CE qui sont des « données » retenues dans un raisonnement qui vise à établir une nécessité et les contraintes théoriques CT qui sont des éléments théoriques admis comme tels sans discussion et sur lesquels on s'appuie dans le raisonnement. Lhoste renvoie le terme nécessité sur les modèles explicatifs à un construit nouveau, sur la

base d'un raisonnement. Pour notre part, nous considérons que le terme nécessité peut s'entendre comme un construit, sur la base d'un raisonnement actuel. Nous n'exigeons pas que le savoir construit soit nouveau, il peut appartenir déjà au champ conceptuel de l'étudiant et se reconstruit dans le raisonnement.

Résultats et discussions

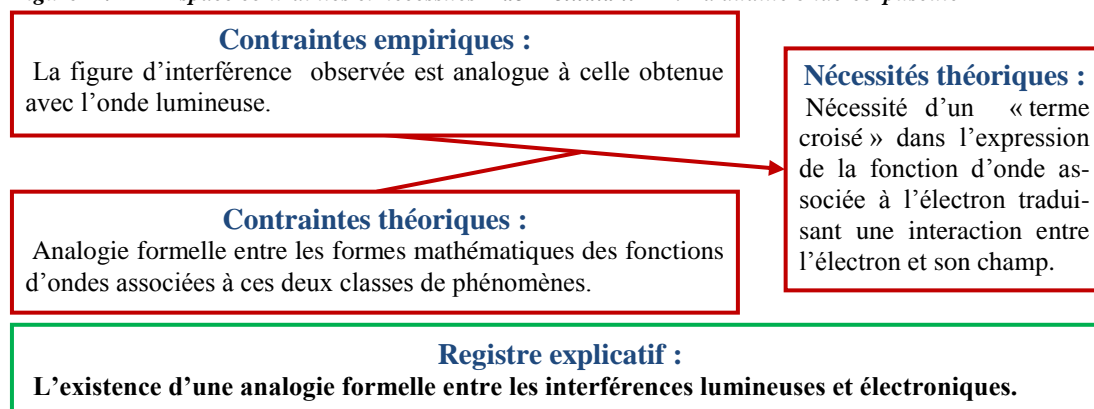
Dans le cadre restreint de cette communication, nous avons choisi de présenter les résultats des trois premiers étudiants parmi les dix étudiants interrogés.

LA DUALITE ONDE-CORPUSCULE :

Les trois étudiants (E1), (E2) et (E3) se basent sur la donnée empirique, similitude entrevue entre le patron d'interférence observé et celui obtenu lors des interférences lumineuses, pour inférer un caractère ondulatoire à l'électron. Cependant l'explication de ce caractère ondulatoire diffère d'un étudiant à un autre :

Pour le premier étudiant (E1), ce caractère est purement formel. Il infère de la similitude des figures d'interférences l'existence d'une analogie formelle entre les formes mathématiques des fonctions d'ondes associées à l'onde lumineuse et l'électron. Cet étudiant (E1) construit la nécessité de l'existence d'un « terme croisé », typique de l'interférence lumineuse, dans l'expression de la fonction d'onde associée à l'électron. L'attribution d'une signification physique à ce terme commun a été élaborée sous l'insistance du chercheur. Cela conduit l'étudiant à une hypothèse ad-hoc stipulant que ce « terme croisé » est entendu physiquement comme l'expression d'une interaction entre l'électron et son propre champ électrique

Figure 1 : L'« Espace contraintes et nécessités » de L'étudiant E1 : La dualité onde-corpuscule



En ce qui concerne les étudiants (E2) et (E3), le caractère ondulatoire est inféré à partir de la traduction de la similitude des patrons d'interférences en une analogie substantialiste entre les deux phénomènes. Ce qui leur permet d'associer le principe de superposition des ondes à l'interférence électronique. Cependant pour justifier l'origine des ondes à superposer, (E2) a bâti la nécessité d'envisager une « transformation de l'électron en une onde » au niveau des deux fentes. La transformation inverse, de l'onde au corpuscule a été associée à la donnée empirique relative à l'apparition d'impact sur l'écran.

Figure 2 : L'« Espace contraintes et nécessités » de L'étudiant E2 : La dualité onde-corpuscule

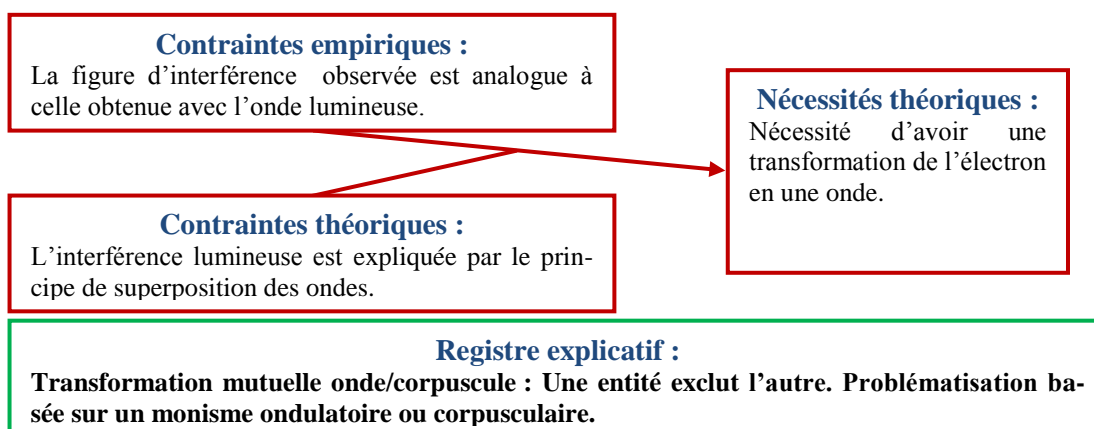
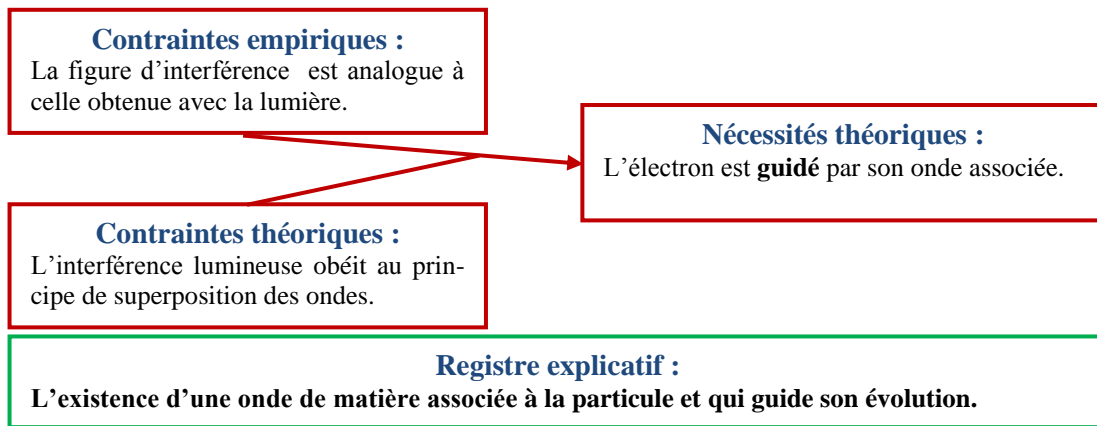


Figure 3 : L' « Espace contraintes et nécessités » de L'étudiant E3 : La dualité onde-corpuscule



Pour l'étudiant (E3) l'existence d'une superposition d'ondes, l'amène à construire la nécessité d'associer une onde à chaque électron. Cette onde se décompose lors du passage par les fentes en deux ondes partielles cohérentes pour interférer au niveau de l'écran. L'existence d'une sorte de « guidage » du mouvement de l'électron par la propagation de l'onde associée est établie de manière ad-hoc et aucune nécessité, concernant la façon dont doit être assurée ce guidage, n'est établie.

La conciliation du caractère ondulatoire mis en évidence par la figure d'interférence et le caractère corpusculaire révélé par la matérialisation des points d'impacts, sur l'écran, sont différents pour les trois étudiants. Tandis que le premier étudiant résolvait la question de la dualité onde-corpuscule en faveur d'un monisme corpusculaire en renvoyant l'interférence à une interaction entre l'électron et son champ, les deux autres essayent, quant à eux, de raccorder les notions d'onde et de corpuscule soit par l'image de la particule guidée par l'onde soit par l'idée d'une transformation mutuelle. Ce constat rejoint les conclusions d'Olsen (2002) qu'il est plus facile d'appréhender la dualité onde-corpuscule pour la lumière que pour un électron qui demeure souvent conçu comme une particule.

Bien que ces trois étudiants associent à l'électron une fonction d'onde en stipulant qu'elle décrit son état, celle-ci n'a pas été directement assignée à la description du phénomène. En effet la propriété mathématique imposée par la linéarité de l'équation de Schrödinger de la fonction d'onde qui est le « principe de superposition » n'a été mobilisée par aucun étudiant. Ce principe, qui génère une contrainte mathématique imposant l'existence d'un état du système qui est superposition de plusieurs états possibles pour ce système, gouverne la description quantique du phénomène d'interférence et indépassable dans l'explication du phénomène d'interférence véhiculée par les manuels de la mécanique quantique.

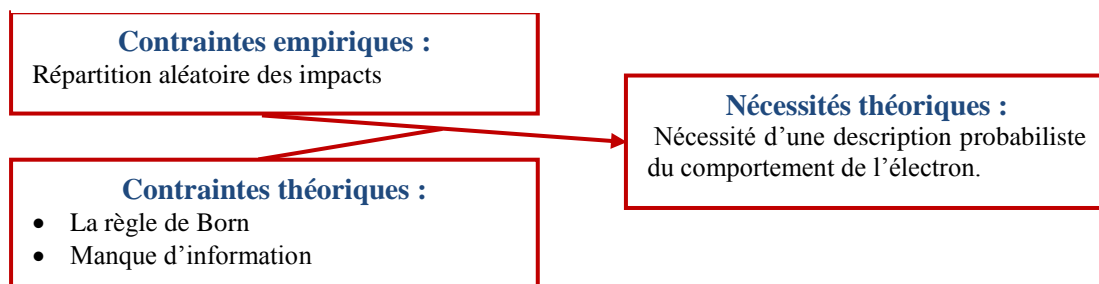
1. Le recours à la probabilité :

Pour les trois étudiants, la nécessité de faire appel à la probabilité a été construite en corrélant la contrainte empirique, correspondant à la répartition aléatoire des impacts observés sur l'écran aux contraintes théoriques : La règle de M. Born et le manque d'information sur le système.

Ce manque d'information est relatif à :

- ✓ Un manque d'information sur les conditions initiales. (E1)
- ✓ Un manque d'information sur la manière avec laquelle se fait la transformation (E2)
- ✓ Un manque d'information sur la manière avec laquelle l'onde guide l'électron. (E3).

Figure 4 : L' « Espace contraintes et nécessités » des étudiants : Le recours à la probabilité



Pour les trois étudiants il n'y a pas d'aléa fondamental dans le comportement de l'électron. Le caractère aléatoire, qui semble régir son mouvement, est associé à un manque d'informations sur le système étudié. Ces informations se rapportent soit aux conditions initiales du mouvement (positions des électrons à la sortie du canon) pour (E1) soit au mécanisme de guidage pour (E3) ou de transformation mutuelle pour (E2).

Le recours à une description probabiliste du comportement de l'électron était entendu comme un palliatif à ce manque d'informations. Ceci explique que la signification probabiliste attachée à la fonction d'onde est conçue, dans une perspective opératoire, comme simple outil pour le calcul des probabilités et non directement représentative des phénomènes quantiques.

2. L'effet perturbateur de la mesure :

En ce qui concerne le constat empirique de la disparition du patron d'interférence lors de l'opération de détection a induit chez les étudiants trois interprétations différentes :

- L'étudiant (E1) a associé ce constat empirique à la disparition du terme croisé dans l'expression de la fonction d'onde. Ce qui l'amène à affirmer l'existence nécessaire d'une perturbation produite par le détecteur sur l'électron lors de cet acte de mesure. Cependant il n'arrive pas à associer la perturbation à une base physique plausible, il se contente d'une description purement formelle.
- L'étudiant (E2) a mis en relation la disparition de la figure d'interférence avec la contrainte théorique selon laquelle la mesure perturbe le système. Cette perturbation a été reliée à la nécessaire disparition de la transformation mutuelle électron-onde lors de l'acte de mesure.
- L'étudiant (E3) n'a pas pu intégrer le résultat observé dans la construction d'une explication.

Figure 5 : L'« Espace contraintes et nécessités » de l'étudiant E1 : L'effet de la mesure

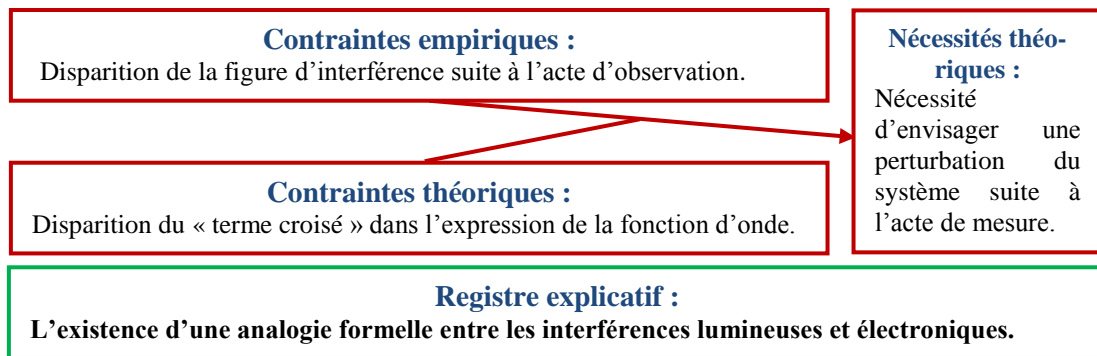
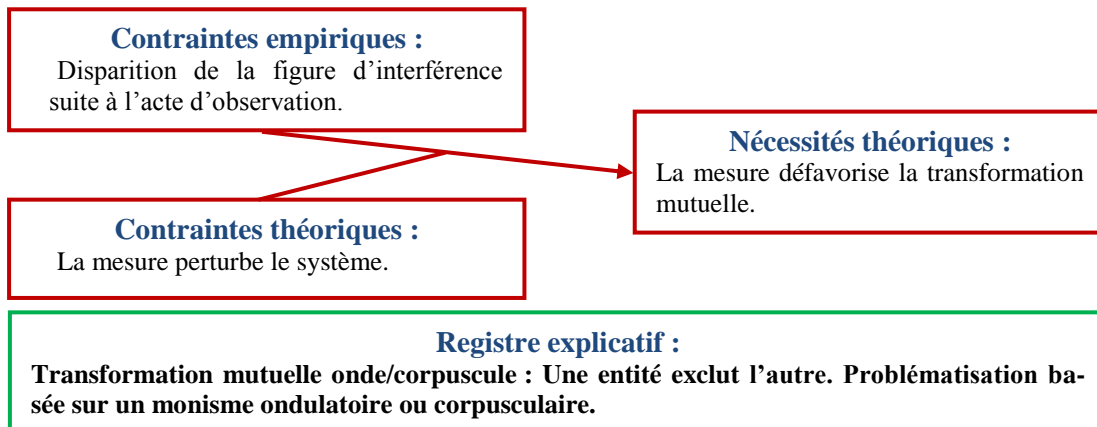


Figure 6 : L'« Espace contraintes et nécessités » de l'étudiant E2 : L'effet de la mesure



La disparition de la figure d'interférence lors de la mesure a suscité des réactions différentes de la part des trois étudiants. Cependant, aucun étudiant ne s'est référé à la nécessité de la réduction de la fonction d'onde de l'électron d'une combinaison d'états à un seul état : réduction du paquet d'ondes. Ce qui a induit des difficultés pour appréhender l'interaction entre le système et l'appareil de mesure.

Discussion et conclusion

D'une manière générale, ces constats montrent que la description et l'explication de ce phénomène n'ont pas été directement assurées par le formalisme mathématique quantique. Pour penser ce phénomène quantique et agir sur lui, il était nécessaire soit de se limiter à une analogie formelle entre les expressions mathématiques des fonctions d'ondes (Registre explicatif de l'étudiant E1: Existence d'une analogie formelle entre les interférences lumineuses et électroniques), soit de passer par des modèles imagés, tels que la transformation mutuelle électron-onde (Registre explicatif de l'étudiant E2: Transformation mutuelle onde/corpuscule : Une entité exclut l'autre. Problématisation basée sur un monisme ondulatoire ou corpusculaire) soit encore par le guidage de l'électron par son onde associée (registre explicatif de l'étudiant E3 : Existence d'une onde de matière associée à la particule et qui guide son évolution). Ces modes de raisonnement ont permis aux étudiants de conserver l'image classique de l'électron, comme corpuscule localisable doté d'une identité permanente possédant des propriétés en soi indépendamment des instruments de mesure, et la réconcilier avec les caractéristiques d'un phénomène ondulatoire observé. Ces raisonnements sont inaptes à concevoir la possibilité pour un électron de se trouver dans une superposition d'états. Ils sont aussi à l'origine de la prohibition des probabilités comme signe d'un hasard fondamental et de la difficulté à admettre l'interaction entre l'appareil de mesure et l'électron. La manière de concevoir l'électron et les modèles imagés qui lui sont associés ont empêché le développement d'un schéma de pensée adéquat avec les contraintes imposées par le formalisme de la mécanique quantique. Il nous semble qu'ils peuvent constituer un obstacle épistémologique au sens de Bachelard à l'apprentissage de la mécanique quantique.

Cette recherche a été engagée avec l'ambition d'examiner la manière dont les concepts de la mécanique quantique, après apprentissage, sont opérationnalisés dans l'explication du phénomène d'interférence quantique. Cette étude nous a montré que la mise en tension entre le registre empirique et le registre des modèles a été assurée soit par une analogie formelle avec le formalisme ondulatoire classique, soit à l'aide de modèles imagés hybrides en absence du formalisme quantique. Il faut cependant souligner que la portée de nos constatations est par nature limitée étant donné le faible nombre d'étudiants que nous avons interviewés. Il faut donc se garder d'une généralisation rapide. Des recherches complémentaires en perspectives sur un échantillon plus large permettront d'accéder à un niveau de généralité plus grand.

Bibliographie

- Baily, C., & Finkelstein, N. (2009). Development of quantum perspectives in modern physics. *PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS* .
- Bélangier, M. (2008). *Du changement conceptuel à la complexification conceptuelle dans l'apprentissage des sciences. Thèse de doctorat en sciences de l'éducation. Université de Montréal.*
- Fabre, M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris: PUF.
- Fabre, M., & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *aster* (24).
- Feynman, R. (1979). *Cours de physique de Feynman- Tome III - Mécanique quantique*. Paris : Interédition.
- Feynman, R. (1965). *La nature de la physique*. tr.fr. Paris 1980: Le Seuil.
- Haddad, H. (2017). *Modes de raisonnement des étudiants Tunisiens en Mécanique Quantique. Mémoire de mastère en Didactique des Sciences Physiques et Techniques*. Tunis. I.S.E.F.C., Université de Tunis.
- Lhost, Y., & Peterfalvi, B. (2009). Problématisation et perspective curriculaire en SVT : l'exemple du concept de nutrition. *aster* (49), 82.
- Lhoste, Y. (2008). *Problématisation, activités langagières et apprentissage dans les sciences de la vie*. Thèse de doctorat en didactique des sciences, université de Nantes, France.
- Oldache, M., & Khiari, C.-e. (2015). Représentations d'apprenants relatives aux concepts quantiques. *Educational Journal of the University of Patras UNESCO Chair* , 184-197.
- Olsen, R. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school. *International Journal of Science Education* .
- Orange, C. (2000). *Idées et raisons : Construction de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en sciences de la vie et de la Terre*. Nantes: Mémoire d'habilitation à diriger des recherches en sciences de l'Éducation.
- Paty, M. (2012). *Le concept d'état quantique :un nouveau regard sur d'anciens phénomènes*. Paris: Matériologiques.