

27 juin 2020

## LP39 - Aspects ondulatoires de la matière, notion de fonction d'onde

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

27 juin 2020

### Bibliographie

- Mécanique quantique, **Basdevant** tip top
- Mécanique quantique (tome I), **Aslangul** tip top
- Physique quantique (tome I), **Le Bellac** (moins bien pour cette leçon mais des choses quand même)
- Physique tout-en-un PCSI, **Salamitp** Dunod (pas mal d'AN et d'ODG)
- [http://gujegou.free.fr/quantique\\_licence.pdf](http://gujegou.free.fr/quantique_licence.pdf) version beta de l'Aslangul
- [https://cache.media.eduscol.education.fr/file/PC/88/0/Dualite\\_onde-particule\\_222880.pdf](https://cache.media.eduscol.education.fr/file/PC/88/0/Dualite_onde-particule_222880.pdf)
- BUP 1006 page 903 "Onde-corpuscule : dualité ou analogie?" Christophe LA-GOUTE pour analogie Lagrange

### Pré-requis : Niveau L3

- Optique ondulatoire : interférences, propagation d'un paquet d'onde
- Photon et dualité onde-corpuscule
- Dispersion (*suggestion*)
- Interférences (*suggestion*)

### Table des matières

<b>1 Aspect ondulatoire de la matière</b>	<b>2</b>
1.1 Expérience de Davisson et Germer (1921-1927)	2
1.2 Longueur d'onde de de Broglie (1923)	3
1.3 La notion de fonction d'onde	4

<b>2</b>	<b>Dynamique de la fonction d'onde</b>	<b>5</b>
2.1	L'équation de Schrödinger (1926)	5
2.2	Mesure	6
<b>3</b>	<b>Conséquences de l'aspect ondulatoire (à reformuler ?)</b>	<b>6</b>
3.1	Impossible notion de trajectoire	7
3.2	Comportement des solutions de l'équation de Schrödinger	7

## Commentaires du jury

**2017** Un exposé sans présentation de l'équation de Schrödinger ne paraît pas raisonnable.

**2015** Les dispositifs interférométriques avec les ondes de matière ne se résument par aux expériences du type fentes d'Young.

**2010** Cette leçon peut être l'occasion d'introduire simplement l'équation de Schrödinger. La signification physique des différents termes de l'équation de Schrödinger n'est pas toujours connue. Le jury constate qu'un nombre significatif de candidats confondent équation aux valeurs propres et équation de Schrödinger. Enfin, les candidats sont invités à s'interroger sur les aspects dimensionnels de la fonction d'onde et sur sa signification physique précise.

## Introduction

Attention on veut voir du bra-ket à un moment donné donc faut placer la niveau L2-L3 hors prépa

### 1 Aspect ondulatoire de la matière

#### 1.1 Expérience de Davisson et Germer (1921-1927)

Source : [https://en.wikipedia.org/wiki/Davisson%E2%80%93Germer\\_experiment#Early\\_experiments](https://en.wikipedia.org/wiki/Davisson%E2%80%93Germer_experiment#Early_experiments) ou bien <http://www.agregation-physique.org/images/Annales/2015/cps15.pdf> page 24

Le but était de voir la rugosité d'une surface en bombardant des électrons, ils étaient incapables de l'expliquer. Les électrons étant des particules, ils sont censés rebondir...

Sur slide on présente l'expérience

*Cagnac 1 p. 202 à lire paraît-il.*

Diffraction d'électrons sur du graphène. **Cadre non-relativiste.** On peut éventuellement montrer en parallèle la diffraction d'un faisceau laser par un trou (ou les lycopes) pour montrer les similarités. On pourra regarder cette vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=IYnU4T3jbgA> Celle-là est mieux, elle compare lumière et matière : <https://www.youtube.com/watch?v=6R3juZXNyTo>

De ce que je comprends du "pourquoi ça marche" une fois que l'échantillon a été altéré : il est devenu polycristallin, les plans n'étant plus régulièrement espacés. On a une poudre en quelque sorte, qui diffuse dans tous les sens. Et c'est carrément mieux que le métal initial qui présente des points de diffraction bien définis.

*Transition* : Cette expérience trouvera son interprétation quelques années plus tard

## 1.2 Longueur d'onde de de Broglie (1923)

*Source* : Aslangul chapitre 9 paragraphe 3 (page 273)

Hamilton à partir de 1827 : il y a des analogies entre le principe de moindre action en optique et en mécanique, c'est rigolo mais on peut pas aller plus loin.

pas forcément besoin de détailler, juste dire que c'est l'analogie optique-mécanique qui a poussé de Broglie à faire son hypothèse. Pour ça, j'utiliserais le graphe du Aslangul p. 276 et je zappe les maths.

La relation de Planck-Einstein (1905) pour expliquer l'effet photo-électrique est le point de départ. Cette relation montre le lien entre l'optique et la mécanique  $E = \hbar\omega$ , doit alors avoir son équivalent pour l'impulsion et le vecteur d'onde  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ . En effet on a  $S = \int \mathcal{L}dt = \int p\dot{q} - \mathcal{H}dt = \int pdq - \mathcal{H}t$ , donc on a  $\partial_t S = -E$  et  $\text{grad}S = \vec{p}$ , à comparer avec  $\phi = \vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t$

Donc à partir de ça on pose

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

C'est cette relation qui exprime la dualité onde-corpuscule. Cette longueur d'onde est à comparer aux échelles typiques d'une expérience, comme en optique ! Si la longueur d'onde est petite devant l'échelle de variation spatiale alors on peut faire de l'optique géométrique et oublier le comportement ondulatoire. j'ai du mal à interpréter dans ce cadre "une onde ne voit pas ce qui est plus petit que sa longueur d'onde".

ODG : pour des particules non relativistes on trouve les odg suivants

- Joueur de rugby courant pour marquer l'essai entre les deux poteaux ( $m = 100\text{kg}$  et  $v = 6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) :  $\lambda_{dB} = 10^{-36}\text{m}$ . Les effets ondulatoires ne sont donc pas à prendre en compte
- Électron pour l'expérience de Davisson et Germer (conservation de l'énergie mécanique  $eU = \frac{p^2}{2m}$  donc  $p = \sqrt{2meU}$ ,  $U = 1\text{kV}$  étant le potentiel appliqué) :

$\lambda_{dB} = 40\text{pm}$ . Les effets ondulatoires sont effectivement à prendre en compte dans cette expérience, et de plus cette longueur d'onde est plus petite que le motif diffractant donc il y a bien de la diffraction

On en profite pour faire un retour sur l'expérience de Davisson et Germer pour donner un ordre de grandeur des paramètres de maille du graphène, et montrer que ça colle bien. La relation de Bragg s'écrit  $\lambda = 2d \sin \theta$ , on en déduit  $\frac{1}{D} = \frac{d\sqrt{2meU}}{2hL}$  ( $D$  diamètre du cercle,  $L$  distance entre le graphène et le plan des cercles).

**Regarde BDD :** <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/BDD/job/BDD/Notices/N093-006.pdf>

*Transition :* On a donc vu le caractère ondulatoire de la matière, comment peut-on alors décrire formellement la matière comme une onde ?

### 1.3 La notion de fonction d'onde

*Source :* Basdevant (chapitre 2)

**Postulat I : existence de la fonction d'onde.** L'état d'une particule est décrit par une fonction d'onde complexe, qui donne la densité de probabilité de présence de la particule en  $\vec{r}$  selon  $|\psi(\vec{r}, t)|^2 = \frac{dP}{d\tau}$ . Cette fonction d'onde suit le principe de superposition. définir "état d'une particule" ?

- L'interprétation probabiliste donne de suite la condition de normalisation de la fonction d'onde.
- Seul le module au carré de la fonction d'onde a un sens physique, les états physiques équivalents ont la même fonction d'onde à un facteur de phase constant près, cf. Aslangul p. 503
- Pour interpréter "classiquement" la notion de probabilité il faut considérer qu'on mesure un très grand nombre de fois la même chose et que la fréquence est donnée par l'amplitude de probabilité. (F) Je ne parlerais pas si tôt de mesure, mais je dirais : "on a une onde avec une certaine répartition spatiale. Il est alors impossible de localiser la particule, elle est partout à la fois."

Principe de superposition : Toute combinaison linéaire de fonctions d'onde est également une fonction d'onde possible. en gros la fonction d'onde du système appartient à un espace de Hilbert d'états de base

**Sur slide :** faire le lien avec la chimie orbitale ?

**ODG :** Pour l'orbitale 1s  $\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}$ , on peut faire l'odg du rayon le plus probable  $\frac{d}{dr} r^2 e^{-2r/a_0} = 0$  ( $r_{max} = a_0$ ), mais on montre que la proba que l'électron soit entre  $0,9r_{max}$  et  $1,1r_{max}$  est  $P = \int_{0,9a_0}^{1,1a_0} \frac{1}{\pi a_0^3} e^{-2r/a_0} 4\pi r^2 dr \simeq 20\%$ . On sent bien que la notion de présence perd un son sens.

(F) Peut-être que c'est à préciser lors de la mesure? Paragraphe 2.2. **Sur slide :** Pour appuyer l'interprétation probabiliste et ondulatoire de la fonction d'onde on présente l'expérience des fentes d'Young (**Python, aspects\_corpusculaires**, <http://cdrom2016>).

---

[agregation-physique.org/index.php/programmes-informatiques/programme-python/details/15/2031](http://agregation-physique.org/index.php/programmes-informatiques/programme-python/details/15/2031) + il existe une vidéo expérimentale, Shimuzu 1992, portail d'Ulm). On n'oublie pas de rappeler que les sources doivent être cohérentes comme en optique qu'est ce que ça veut dire concrètement?. Le Basdevant est très bien là-dessus (page 20). Expérience et des détails sur la vidéo et des ODG ici : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/15/3/033018/meta>

*Transition* : Voyons comment cette onde évolue au cours du temps

## 2 Dynamique de la fonction d'onde

Attention à bien garder la thématique "caractère ondulatoire de la matière". Les applications doivent être tournées autour de ça. (F) On ne pose jamais l'équation spatiale, avec l'énergie comme valeur propre. Peut-être qu'il faut réfléchir pour l'inclure.

### 2.1 L'équation de Schrödinger (1926)

*Source* : Basdevant (chapitre 2) et Aslangul (chapitre 9.4)

**Postulat II : équation de Schrödinger.** L'évolution temporelle d'une fonction d'onde est donnée par l'équation aux dérivées partielles  $i\hbar\partial_t\psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + V\psi$ .

Elle a le bon goût d'être linéaire, donc c'est cohérent avec le principe de superposition.

**Conservation de la norme + déterminisme.**

Il faut décrire les conditions aux limites : la fonction d'onde est continue et sa dérivée aussi partout où le potentiel est borné.

Cette équation a été écrite par analogie avec l'équation de d'Alembert, où la célérité est définie par  $v_\phi = E/p$  et prenant la notation complexe d'une onde. C'est un postulat qui fut rapidement accepté car donne les résultats connus pour l'atome d'hydrogène (série de Balmer) quand on prend les bonnes CL. (F) je ne m'aventurerais pas là-dessus.

On a en fait un équation de diffusion, qui diffère par la présence du facteur  $i$  qui change tout. Déjà il y a réversibilité lorsque le potentiel l'est (cf page Aslangul 284) et surtout cela montre que la fonction doit être complexe.

(F) **Le paragraphe suivant est important dans la leçon et j'ai peur qu'il ne rentre pas dans le timing (fait au 3.2). Je propose de le mettre ici si besoin, sinon go dans le 3.2.** Je parlerais bien de la solution stationnaire et l'équation aux vp. Pour bien discuter l'hypothèse stationnaire, se référer au Sanz. Ensuite, pour établir l'équation, on écrit  $\psi = f(x)g(t)$ . Alors dans l'équation de Schrödinger, on obtient facilement

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{f''(x)}{f(x)} + V(x) = i\hbar \frac{g'(t)}{g(t)}$$

On égalise ces deux équations à une constante  $E$ , alors  $\psi(x, t) = g(0)e^{i\frac{E}{\hbar}t} f(x)$ . Alors les solutions de l'équation sont des combinaisons linéaires de ces solutions stationnaires. Le terme en exponentiel complexe rend la proba de présence stationnaire en effet.

On a une équation d'onde, on aime bien avoir une relation de dispersion. Tout ça est fait dans le Sanz p. 1200. Dans le cas d'une particule libre cela s'écrit  $\omega = \frac{\hbar k^2}{2m}$ , la propagation est donc dispersive, il y a étalement de la fonction d'onde (**Python?** exercice 2 page 53 Basdevant pour étalement du paquet d'onde). On peut alors calculer une vitesse de groupe  $v_g = v$  qui s'apparente à la vitesse de la particule et une vitesse phase  $v_\phi = v/2$ .

Ça serait bien de discuter ici les états stationnaires si le temps le permet, cf ???

*Transition* : On ne peut se rendre compte de ses évolutions qu'une fois qu'on mesure, voyons comment cette action est décrite dans ce formalisme

## 2.2 Mesure

*Source* : Basdevant chapitre 3

(F) Les détails calculatoires sont peut-être de trop, je me placerais en L2 et je ne le ferais pas. Du coup l'idée de cette sous-partie est juste de dire "la mesure introduit le caractère aléatoire de la quantique et lie aspect corpusculaire et ondulatoire". Alors je présenterais l'expérience des fentes d'Young avec des films et tout ça.

**Postulat III : les observables.** À chaque grandeur physique on associe un opérateur linéaire hermitien agissant sur l'espace des fonctions d'onde. La valeur moyenne d'un opérateur  $\hat{A}$  est donnée par  $\langle A \rangle = \int \psi^* \hat{A} \psi$ .

Le principe d'équivalence donne certains de ces observables.

Les valeurs propres de l'opérateur sont les valeurs accessibles. Ainsi la valeur moyenne correspond à l'espérance des valeurs prises  $\int \psi^* \hat{A} \psi = \sum_{\alpha, \alpha'} c_{\alpha'}^* \psi_{\alpha'}^* \hat{A} c_{\alpha} \psi_{\alpha} = \sum_{\alpha} c_{\alpha}^* \psi_{\alpha}^* a_{\alpha} c_{\alpha} \psi_{\alpha} = \sum_{\alpha} a_{\alpha} \int |c_{\alpha}^* \psi_{\alpha}^*|^2 = \sum_{\alpha} a_{\alpha} p_{\alpha}$  l'orthogonalité des fonctions propres est donnée par l'hermiticité de l'opérateur

On peut faire ici l'exercice 2 page 53 du Basdevant pour étalement du paquet d'onde pour faire le lien avec les ondes.

**Postulat IV : la réduction du paquet d'onde.** Une mesure projette l'état du système dans le sous-espace donnant la valeur propre mesurée.

On peut reparler des fentes d'Young et du brouillage qui intervient quand on mesure de quelle côté est venue la particule. C'est un peu comme si on avait tué le caractère ondulatoire et en opposant le caractère particulaire

*Transition* : Ces principes font déjà sentir que c'est différent de ce qu'il se passe en mécanique classique, on va voir qu'il y a en fait pire : une limite fondamentale à la détermination d'une mesure.

## 3 Conséquences de l'aspect ondulatoire (à reformuler ?)

essayer d'interpréter au maximum avec une vision ondulatoire : se limiter au cas des ondes stationnaires ?

### 3.1 Impossible notion de trajectoire

*Source* : Aslangul 10.3 et Basdevant page 49

L'inégalité de Heisenberg interdit la notion de trajectoire : odg pour un électron sur une orbite et pour le rugbyman (trajectoire a un sens ici, le principe de correspondance de Bohr nous dit que les équations quantiques dans la limite classique nous donne les résultats de la méca classique).

Application à l'énergie minimale d'une particule confinée (vu en première année) ou à la stabilité de l'atome ne pas être trop ambitieux ici, ce que fait le Basdevant est volontairement simpliste et peut amener des questions difficiles

Cet exemple est pas mal (page 32) attention le cosinus de l'angle est pris à l'ordre 0 au dénominateur [http://olivier.granier.free.fr/PC-Montesquieu445072/cariboost\\_files/MQ-1516-1.pdf](http://olivier.granier.free.fr/PC-Montesquieu445072/cariboost_files/MQ-1516-1.pdf)

*Transition* : Le seul outil pertinent est donc bel et bien la fonction d'onde, voyons comment ces ondes se comportent

### 3.2 Comportement des solutions de l'équation de Schrödinger

*Source* : Basdevant page 64

On ne regarde que les ondes stationnaires de la forme  $\psi(x, t) = f(t)\phi(x)$ . On peut montrer que  $f(t) \propto e^{-Et/\hbar}$  et que  $\frac{\hbar^2}{2m}\partial_{xx}\phi + (E - V)\phi = 0$

On a alors des ondes soit évanescences soit OPPH. On explique alors la démarche à suivre quand une onde arrive sur une barrière de potentiel (réflexion, transmission), et on suggère l'effet tunnel (sans prononcer !)

Application potentielle au quantum dot.

on a le droit de regarder les ondes stationnaires car elles forment une base des solutions puisque associées à une valeur propre du Hamiltonien hermitique. Le seul problème c'est que les coefficients dépendent a priori du temps.

## Conclusion

*Ouvertures possibles* : Effet tunnel, systèmes à plusieurs niveaux

## Commentaires pendant la prépa aux oraux

- Pour Heisenberg temporelle, se référer au Basdevant p. 367 (ch. 17)
- est-ce que l'épaisseur des rayons d'interférences est due au facteur de forme pour le I.1 ?
- Renversabilité de l'équation ? Ça suffit de dire que prendre  $-t$  équivaut à prendre le complexe conjugué, qui représente la même physique ? Visiblement... Le Bellac p. 126 le fait bien (4.2. Evolution temporelle) mais c'est pas très clair.

- attention pour des particules relativistes il faut prendre l'équation de Dirac (fermions) ou de Klein-Gordon (bosons)
- J'avais un exercice qui montrait que si on arrive à mesurer l'impulsion à l'impact des électrons sur l'expérience des fentes d'Young alors il y a brouillage. C'est une conséquence de Heisenberg
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Postulats\\_de\\_la\\_m%C3%A9canique\\_quantique#Postulat\\_I](https://fr.wikipedia.org/wiki/Postulats_de_la_m%C3%A9canique_quantique#Postulat_I)
- se renseigner sur des expériences plus modernes : neutrons froids 1988 (Bellac page 20) et Hélium 1991 (Dunod page 240)
- Basdevant page 127 pour mesure
- Pour orienter la leçon : "Après l'introduction de la dualité onde corpuscule pour le rayonnement lors de la leçon précédente, cette leçon doit réellement présenter les concepts de la mécanique quantique.", il ne faut pas aller dans l'exhaustif mais bien mettre en avant certaines propriétés fondamentales de la MQ.
- Préciser que la longueur d'onde est définie dans le vide
- Préciser dans quelle base on définit la fonction d'onde (dire qu'on se restreint à l'espace des positions, mais que ce n'est pas la forme la plus générale).
- savoir décrire le modèle de Bohr de l'atome
- Attention, l'interprétation du caractère quantique via la longueur d'onde de de Broglie n'est pas suffisante. Pour être plus rigoureux, il faut regarder l'action.

## Questions

**Retour sur le calcul de la vitesse de groupe : bornes intégrale, condition sur fonction d'onde (continuité et continuité de la dérivée),**

**Pourquoi dans fentes d'Young, si on bouche une fente on retrouve figure classique ?**

**Définition des moyennes ?**

**Vous avez parlé de  $\psi_1$  et  $\psi_2$  comme étant les fonctions d'onde des particules passées par chacune des fentes. Pourtant vous avez indiqué qu'on ne pouvait pas savoir par où étaient passées les particules. Est-ce correct de parler de  $\psi_1$  et  $\psi_2$  ? Faut-il sommer ces deux fonctions d'onde pour avoir des interférences sur l'écran ?**

**Comment expliquez-vous à un élève que lorsqu'on ajoute un détecteur de position les interférences disparaissent ? Quel est l'impact sur la fonction d'onde ? Après la mesure de position, dans quel état se trouve le système ?**

**Comment expliquez-vous à un élève que la particule n'a pas de trajectoire propre contrairement à la mécanique classique ? - Pouvez-vous me parler de la loi de Malus avec des ondes de matière ?**

Qu'est-ce qu'une particule libre? Que devient l'équation de Schrödinger pour une telle particule?

Comment expliquer que la particule « passe par les deux fentes »? Que pouvez vous me dire des problèmes de cohérence spatiale et temporelle si on poursuit l'analogie avec l'optique?

si je place une fente et que je la rétrécis autant que je veux j'ai un  $\Delta x$  tout petit si je place ensuite une seconde fente très fermée je sélectionne un  $\Delta x$  très petit, est ce que ça contredit Heisenberg?

Comment faire interférer des atomes (refroidir)? Quelles sont les plus grosses particules que l'on a fait interférer? (il faut les refroidir, écrire la longueur d'onde de de Broglie et dire qu'il faut  $mv$  faible, refroidissement laser)

Avec quelles autres particules a-t-on déjà fait l'expérience des fentes d'Young?

C'est quoi le facteur limitant qui historiquement a fait qu'on a mis longtemps avant de voir des interférences en optique?

Pour l'ODG de la longueur d'onde de De Broglie pour un humain, s'il reste immobile, alors elle devient infinie et il devient quantique; comment lever ce paradoxe?

En optique, on a des objets pour manipuler les ondes (miroirs, lentilles ...) y a-t-il des équivalents pour les ondes de matières et comment les réalisent-on?

Pouvez vous écrire une équation de diffusion? Pourquoi est-elle irréversible? Mais alors Schrödinger aussi est irréversible?

Qu'est ce qu'apporte Heisenberg dans le cas d'une particule dans un puits de potentiel comparé à la méca classique?

Si l'évolution de la fonction d'onde est entièrement donnée par Schrödinger, est-on sûr qu'elle restera toujours normée? Comment peut-on le montrer?

Vous avez montré Heisenberg à partir des propriétés des TF, comment peut-on le montrer autrement?

Equation de Schrödinger : est-ce toujours une équation d'onde? ça peut être un hamiltonien qui décrit un spin

Dans quels cas peut-on considérer une énergie négative? En choisissant l'origine des énergies.

**Schéma interférences des électrons : où sont les interférences ? Quelle est la direction des franges ?**

**Message à transmettre/ écueil ?**

**Deux minutes pour expliquer la MQ à quelqu'un dans la rue ?** Comportement des corps infiniment petits. Modèle que l'expérience n'a pas mis en défaut.

**C'est quoi un laplacien ? Sens physique ?** Anomalie locale, écart à la moyenne locale.

**La longueur d'onde d'un photon est modifiée avec l'indice du milieu, comment ça se passe pour un électron ?**

**Tu as dit que la longueur d'onde du neutron est bien plus grande que son rayon, comment on mesure son rayon alors ?** Par diffusion. Il faut préciser dans quelle situation car la taille d'une particule est définie par la taille de son paquet d'onde qui dépend de nombreux paramètres. A priori, on cherche à connaître la taille du neutron dans un noyau.

**Pourquoi plusieurs anneaux pour la figure de diffraction des électrons ? Pourquoi des anneaux ?** Si on prend un cristal anisotrope, qu'est-ce qu'on voit ?

**Tu as décrit la fonction d'onde comme une fonction de l'espace et du temps, est-ce qu'on pourrait choisir d'autres paramètres ?**

**Définition impulsion ?**

**Est-ce que la définition d'un état stationnaire est vraiment un produit d'une fonction de l'espace et d'une fonction du temps ?**

**Manips avec paquets d'onde ?**

**Que se passe-t-il pour le paquet d'onde avec des photons ?** pas de masse pour le photon donc pas d'étalement dans le vide.

- Quelques questions concernant les notations, qui étaient floues à plusieurs endroits.

- La fonction d'onde est au carré dans le calcul de la position moyenne, attention aux erreurs!!

- Définir clairement les notations intervenant dans l'inégalité d'Heisenberg, les  $\Delta p$ ,  $\Delta x$  sont à définir (soit on le dérive de la TF quand on parle de paquets d'onde, soit directement avec les valeurs moyennes d'opérateurs). Dans tous les cas, faire attention à la représentation choisie : écrire  $p_x$  en représentation position est faux ! Si vous voulez, vous pouvez aussi prendre la TF de la fonction d'onde et écrire l'ensemble en représentation impulsion.

- Ecrire la formule de l'impulsion moyenne et de la position moyenne (par exemple, la réponse attendue n'est pas  $\langle p \rangle = mv$ , mais une écriture à partir de l'opérateur impulsion et de la fonction d'onde).

- L'inégalité est-elle liée au caractère quantique ? Cette inégalité se "ressent" si on attribue un comportement ondulatoire à la matière. En effet, si on pense en terme optique avec les relations de TF entre  $(x,p)$  ou  $(\omega,t)$ , on "sature" l'inégalité de Heisenberg. Cependant, cette inégalité est valable pour tout couple d'opérateurs conjoints qui ne commutent pas. Cette inégalité reflète le fait que pour deux observables conjoints, les vecteurs propres de l'un ne sont pas vecteurs propres de l'autre (quand on fait une mesure de l'une des grandeurs selon une certaine "grille", celle -ci ne permet pas de bien décrire l'autre grandeur, cette propriété est inhérente à la mécanique quantique, c'est comme si on se plaçait dans un espace 2D, avec pour axes chacun des observables, et que celui -ci était discret, on a un cadrillage de cellules de taille  $h/2$ ). Cependant, il n'est pas nécessaire d'avoir une relation de TF pour dériver cette propriété, par exemple, on a cette inégalité entre le nombre de particules d'un état de Fock et la phase ce celles-ci qui s'observe expérimentalement avec un isolant de Mott.

- Quand les spectres de raie ont -ils été observés. 1885 pour la série de Balmer de l'Hydrogène. Le modèle de Bohr date de 1913 (30 ans plus tard), il n'a pas observé le phénomène.

- Qu'est -ce que l'expérience de Davisson et Germer. (si vous présentez la manip de diffraction des électrons, il est indispensable de donner les noms des scientifiques qui l'ont présentés historiquement.)

- Quelle serait la fréquence d'un photon de même longueur d'onde que celle des électrons dans l'expérience montrée. Rayons X.

- Quelle est la formule de la longueur d'onde de de Broglie thermique. Ordre de grandeur pour des atomes à la température  $T=300$  K. Comment faire interférer "grosses particules" assimilées à des atomes lourds (voir doc eduscol). Il faut refroidir les atomes.

- pour l'expérience des fentes d'Young, il y a t -il une condition sur la distance  $d$  entre les deux fentes ? Oui, il faut qu'elle soit du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de de Broglie des particules considérées (pour que la particule "sente" la présence des deux fentes)

- Quelle est l'unité du potentiel dans l'équation de Schrödinger ? (des Joules, c'est une énergie potentielle). On parle de potentiel en mécanique quantique, mais c'est un abus de langage.

Quelques imprécisions, oubliées lors de la discussion, pouvant conduire à une discussion désagréable :

- Dans l'expérience, le tube est recouvert d'un matériau phosphorescent. Ce n'est pas un "truc photoélectrique".

- L'énergie d'une particule peut aussi varier continuellement en mécanique quantique. C'est le cas pour une particule libre franchissant une marche de potentiel par exemple, dont on peut changer continuellement la longueur d'onde.

- Lors de l'énoncé des postulats, il a été mentionné le second principe (au lieu de postulat). C'est un lapsus, mais attention au vocabulaire.

- 'la mesure perturbe durablement l'état de la particule', c'est vraiment très imprécis, voire faux si on pousse un peu : l'état de la particule continue d'évoluer après la mesure de celui-ci mais lors de la mesure, l'état de la particule s'effondre sur l'un des vecteurs propres de l'observable.