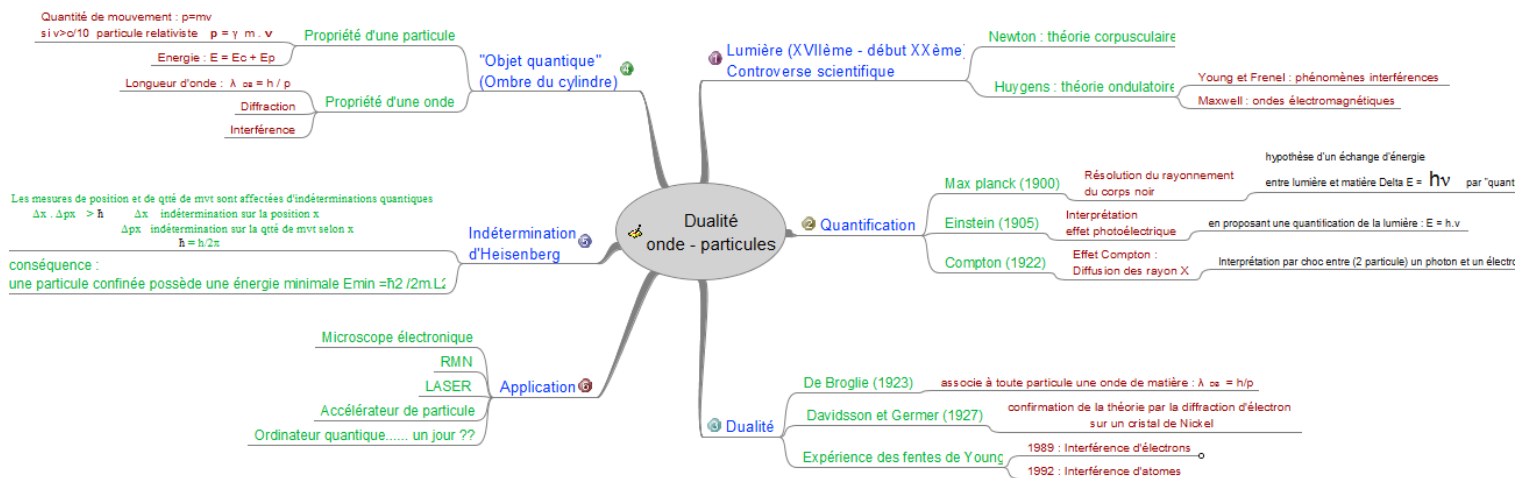


# 28e- Dualité onde - particule

## Intro : Carte Mentale



Lire « introduction au monde quantique » J'intègre 2013 (MPSI page 215)

Depuis la controverse entre **Huygens et Newton** au XVII<sup>ème</sup> s, on sait que la lumière a du mal être cataloguée par les physiciens. Puisqu'elle était vue tantôt comme une onde par Huygens, tantôt comme une particule par Newton. Avec **Young et Maxwell**, l'aspect ondulatoire devient déterminant lors du XIX<sup>ème</sup> s. En effet Young avec sa célèbre expérience des fentes d'Young montre que la lumière peut donner lieu à des interférences, phénomène caractéristique d'une onde. Maxwell quand à lui élabore une théorie complète des ondes électromagnétique dans laquelle il intègre la lumière, qui se déplace à la vitesse  $c$ .

Cependant au début du XX<sup>ème</sup> s, certaines expériences comme les spectres de raies, l'effet photoélectrique ou la "catastrophe" Ultraviolette ne peuvent pas s'expliquer par un aspect ondulatoire.

C'est en essayant de résoudre le problème du rayonnement du corps noir que **Planck** émet l'hypothèse que la lumière et la matière interagissent en échangeant de l'énergie par paquet et introduit ainsi la notion de quantification.

**Einstein** approfondit cette idée et suppose que c'est la lumière elle même qui est constituée de particules ayant une énergie quantifiée. Einstein associe donc à l'onde de lumière une particule, qu'il traduit par la relation  $E = h \nu$  cette particule est aujourd'hui appelée photon.

**Compton(1922) : Effet Compton** : En envoyant des rayons X de longueur d'onde  $\lambda = 0,071$  nm sur une cible de carbone, A. Compton observa un rayonnement diffusé de longueur d'onde *différente* de la longueur d'onde incidente, en contradiction avec la théorie classique. Il put interpréter les résultats expérimentaux en faisant hypothèse d'une collision entre les électrons contenus dans l'échantillon et des particules arrivant avec le rayonnement incident

Au cours de cette collision la particule du rayonnement perd une partie de son énergie, ce qui explique qu'elle reparte avec une énergie  $E < E_0$ , donc une fréquence  $\nu < \nu_0$  et une longueur d'onde  $\lambda > \lambda_0$ . Le calcul fondé sur les lois de la mécanique relativiste donne des résultats quantitatifs en parfait accord avec l'expérience.

C'est l'hypothèse inverse que fera quelques années plus tard le jeune **louis De Broglie** en supposant que l'on peut associer à toute particule en mouvement une onde de matière.

Cette onde ne possède donc plus de masse, de trajectoire ni de quantité de mouvement mais est caractérisée par une longueur d'onde appelée depuis longueur d'onde de De Broglie :  $\lambda_{DB} = h / p$

Ces deux relations  $E = h \nu$  et  $\lambda_{DB} = h / p$  jettent les bases de la dualité onde-corpuscule et de manière plus générale celles de la physique quantique.

En 1927, les américains **C.J. Davisson et L. Germer** apportent la première preuve expérimentale de l'idée de de Broglie, en observant la diffraction d'un faisceau d'électrons par un monocristal de nickel.  
La diffraction est un phénomène caractéristique des ondes. Si un faisceau d'électrons est diffracté, c'est la preuve qu'il possède un caractère ondulatoire.

1989-1992 : Expérience des fentes de Young avec des électrons et des atomes (montrer une image)

On enchaîne sur la partie 4 pour faire le bilan de toute cette partie historique.

Conclusion : Il faut bien comprendre que la nature réelle des "objets quantiques" dont nous avons parlé ne sont ni des ondes, ni des particules. Ils sont vus comme l'un ou comme l'autre selon l'interprétation qui nous convient le mieux.

Comparaison : Ombre du cylindre, vu tantôt comme un cercle, tantôt comme un rectangle alors qu'il n'est ni l'un ni l'autre.

Dans la partie post bac nous définirons ce que l'on entend par « objet quantique » (petit et de faible masse)  
Et comment relier l'aspect ondulatoire d'une particule au principe d'Heisenberg.

Remarque : Nature probabiliste de la physique.

La physique quantique est probabiliste par essence

La physique classique est probabiliste par ignorance

## Post Bac : J'intègre tout en un (MPSI – introduction à la physique quantique page 220)

- On a vu que la dualité onde-corpuscule introduisait des différences / à la méca classique. En effet sur l'expérience des fentes de Young avec des électrons la 1<sup>ère</sup> image correspond à la méca classique (les électrons bombarde la plaque de manière un peu aléatoire) et dès qu'on envoie beaucoup d'électron on se retrouve avec une figure d'interférence qui s'explique avec la mécanique quantique. Nous allons développer ce point.
- Mais avant cela, il faut comprendre l'intérêt de l'hypothèse de De Broglie et être capable de voir pourquoi on ne décèle pas d'onde associée aux particules macroscopiques comme vous ou moi et qu'est ce que l'on appelle un « objet quantique »

### **A - Dans quel cas le caractère ondulatoire de la matière est-il significatif ?**

- Rappel que signifie  $\lambda_{DB} = h / p$  ?  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

A quelle condition le caractère ondulatoire significatif si  $\lambda_{DB}$  OGD des dimensions caractéristiques du système

- Application à une personne  $m = 50 \text{ kg}$  qui passe une porte à la vitesse  $v = 1 \text{ m/s}$   $\lambda_{DB} = 1,3 \cdot 10^{-35} \text{ m}$  :

Quelle est la longueur pertinente ici, à laquelle on peut comparer  $\lambda_{DB}$  ?

Que ce soit la taille de l'individu ou la largeur d'une porte on aura toujours  $\lambda_{DB} \ll L$

On n'observera jamais de phénomène ondulatoire :

--> le caractère ondulatoire d'une personne ou de tout objet macro n'est jamais observé.

- application à un neutron  $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$   $v = 1,2 \text{ km/s}$   $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

$\lambda_{DB} = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 310 \text{ pm}$  . Or  $D_{\text{neutron}} = 10^{-15} \text{ m}$

Grandeur caractéristique, différente de  $\lambda_{DB}$

$\lambda_{DB}$  correspond au pas du réseau cristallin, permet d'étudier les cristaux par diffraction des rayons neutroniques.

Caractère ondulatoire observable.

**Conclusion**

Du fait de la faible valeur de  $h$ , le caractère ondulatoire n'est significatif que pour des particules atomiques. « Object quantique »

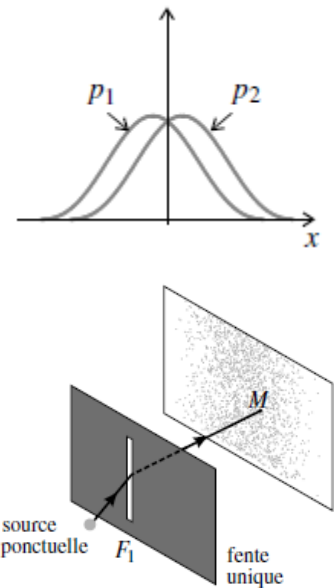
## B - interprétation expérience de Young

En classique on devrait avoir une probabilité de trouvé l'électron sur la plaque au point  $M$  de la manière suivante :  $P(M) = P_1(M) + P_2(M)$

La situation peut être considérée comme la superposition des deux situations :

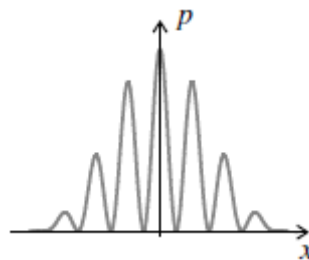
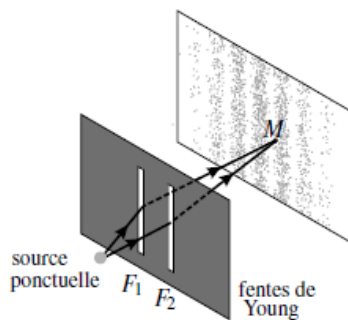
- situation 1 : il n'y a que la fente  $F_1$ , la particule peut parvenir en  $M$  en passant par la fente  $F_1$  (situation représentée sur la figure) ( $P_1(M)$ )
- situation 2 : il n'y a que la fente  $F_2$ , la particule peut parvenir en  $M$  en passant par la fente  $F_2$ . ( $P_2(M)$ )

On appelle  $p_1(M)$  et  $p_2(M)$  les probabilités de détection de la particule en  $M$  dans ces deux situations.



Seulement lorsque l'on fait l'expérience il n'en n'est rien :

$$p(M) \neq p_1(M) + p_2(M).$$



Ce résultat paradoxal s'interprète par l'*interférence* entre les deux ondes associées à la particule dans les situations 1 et 2.

## Physique quantique

La grandeur qui s'additionne lorsqu'on superpose les situations 1 et 2 n'est pas la probabilité de détection en  $M$  mais la *fonction d'onde* en  $M$ . On peut associer à une particule quantique une **fonction d'onde**,  $\psi(M, t)$ , fonction du point  $M$  et du temps, à valeurs complexes. Cette fonction caractérise l'état de la particule.

En particulier la *probabilité* de trouver la particule au point  $M$  et à l'instant  $t$  est proportionnelle au *module au carré de la fonction d'onde*,  $|\psi(M, t)|^2$ .

Si on note  $\psi_1(M,t)$  la fonction d'onde de la particule dans la situation 1 et  $\psi_2(M,t)$  la fonction d'onde de la particule dans la situation 2, dans l'expérience des fentes de Young qui est la superposition des situations 1 et 2, la fonction d'onde est :

$$\psi(M,t) = \psi_1(M,t) + \psi_2(M,t).$$

La probabilité de détection de la particule est proportionnelle au module au carré de la fonction d'onde. Or, on peut écrire (en omettant la mention de  $M$  et de  $t$  pour alléger les écritures) :

$$\begin{aligned} |\psi_1 + \psi_2|^2 &= (\psi_1 + \psi_2)(\psi_1^* + \psi_2^*) \\ &= \psi_1\psi_1^* + \psi_2\psi_2^* + \psi_1\psi_2^* + \psi_1^*\psi_2 \\ &= |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + \underbrace{\psi_1\psi_2^* + \psi_1^*\psi_2}_{\text{terme d'interférences}}. \end{aligned}$$

Ainsi :  $|\psi(M,t)|^2 \neq |\psi_1(M,t)|^2 + |\psi_2(M,t)|^2$  donc  $p(M) \neq p_1(M) + p_2(M)$ . La différence est due au terme d'interférences.

#### Transition :

En méca classique on peut connaître précisément la position et trajectoire d'une particule, plus le cas en méca quantique. L'inégalité d'Heisenberg traduit cette impossibilité.

#### C - L'inégalité de Heisenberg.

Les mesures de position et de qtté de mvt sont affectées d'indéterminations quantiques :  $\Delta x \cdot \Delta p_x > \hbar$

$\Delta x$  indétermination sur la position  $x$

$\Delta p_x$  indétermination sur la qtté de mvt selon  $x$

$$\hbar = h/2\pi$$

Lorsque  $\Delta x$  diminue,  $\Delta p_x$  augmente. On ne peut pas avoir de renseignement plus précis sur la quantité de mouvement et donc la vitesse de la particule. Cela signifie que la notion de trajectoire n'est plus adaptée pour caractériser l'objet quantique.

Ce qui justifie d'introduire une fonction d'onde  $\Psi(x,y,z,t)$  dont le carré de la norme nous renseigne sur la probabilité de trouver la particule dans un volume  $dv$ .

On traduit cette probabilité de présence par la relation

$$dP = |\Psi(x,y,z,t)|^2 \cdot dv$$

Précisons un point essentiel, l'incertitude n'est pas liée à un défaut de mesure ou à l'imprécision d'un appareil, mais représente une propriété fondamentale de la mécanique quantique.

#### Exemple : diffraction d'une particule par une fente

On considère une particule de quantité de mouvement  $\vec{p} = p\vec{u}_z$  arrivant orthogonalement sur une fente de largeur  $a$  parallèle à  $(Oy)$  (voir figure 6.14). L'onde associée à la particule est diffractée par la fente exactement comme une onde lumineuse l'est.

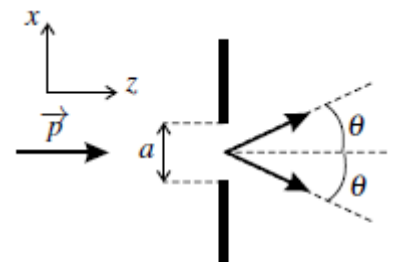


Figure 6.14 – Diffraction d'une particule par une fente.

Le demi-angle d'ouverture  $\theta$  du faisceau diffracté est donné par :

$$\sin \theta = \frac{\lambda_{DB}}{a}$$

Si l'on fait une mesure de la coordonnée  $x$  de la particule immédiatement après la fente, le résultat de la mesure est compris entre  $(-a/2$  et  $a/2)$  donc l'indétermination quantique est du même ordre de grandeur que  $a$  :  $\Delta x \approx a$ .

De même d'après la figure Si l'on fait la mesure de sa quantité de mouvement  $px$  selon (Ox) immédiatement après la fente,  $\Delta p_x = p \sin \theta = p \frac{\lambda_{DB}}{a} = \frac{h}{\lambda_{DB}} \frac{\lambda_{DB}}{a} = \frac{h}{a}$

Soit  $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$

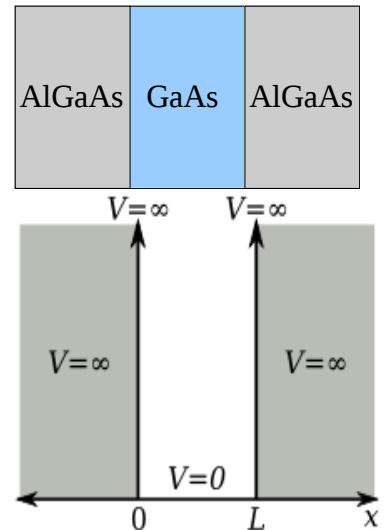
### D - Energie d'une particule confinée dans un puits de potentiel infini

On considère maintenant une particule quantique confinée dans un puits de potentiel, que l'on prend infini pour simplifier les calculs. C'est typiquement le cas d'un électron dans un semi-conducteur.

Que signifie puits de potentiel infini ? La particule ne peut pas sortir  $E_p(x) = 0$  si  $0 < x < L$  en dehors  $E_p(x)$  tend vers l'infini

En pratique, ces genres de puits quantiques sont réalisées en superposant des couches d'Arsenic de Gallium GaAs et d'Aluminium d'arsenic de Gallium AlGaAs. Ces puits quantiques sont à la base des lasers qui équipent la plupart des CD et DVD.

(Sur le tableau il vaut mieux faire comme le livre et plutôt noter  $E_p = 0$  à la place de  $V=0$ )



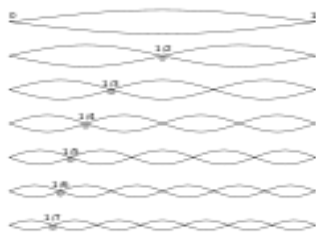
Déterminons l'énergie d'une telle particule (l'électron ici) par **analogie avec la corde de Melde**.

Si la particule est confinée elle peut être considérée comme étant dans une boîte sur laquelle elle rebondit, l'onde associée à cette particule fait donc des allers- retours, ces ondes se superposent de manières constructives et font apparaître un phénomène d'onde stationnaire.

On sait que la particularité des ondes stationnaires correspond à une séparation des variables d'espace et de temps  $x$  et  $t$  dans la fonction d'onde, que l'on peut écrire  $\Psi(x,t) = \sin(kx) \sin(\omega t)$

Or les conditions aux limites imposent que  $\Psi(0,t) = 0$  et  $\Psi(L,t) = 0$  puisque l'onde s'annule sur les 2 bords.

$\Psi(L,t) = \sin(kL) \cdot \sin(\omega t) = 0$  *qde soit t*, implique que  $\sin(kL) = 0$  et  $kL = n\pi$  donc  $2\pi \cdot L / \lambda = n$



$\pi$  on a donc

$\lambda = 2L / n$  le confinement d'une onde entraîne une quantification de sa longueur d'onde proportionnelle

à la longueur du confinement.

en mécanique classique ou quantique.

Qu'en est-il de son énergie ?

En mécanique quantique l'hypothèse de De Broglie associe à toute particule une onde et on peut exprimer l'énergie de cette particule en fonction de  $\lambda$ .

En effet  $E = E_c + E_p$  or  $E_p = 0$  à l'intérieur du puits de potentiel donc  $E = E_c = p^2 / 2m = h^2 / \lambda^2 2m$ .

Avec  $\lambda = 2L / n$   $E = n^2 \cdot h^2 / 8 \cdot L^2 m$

$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2} \text{ où } n \text{ est un entier}$$

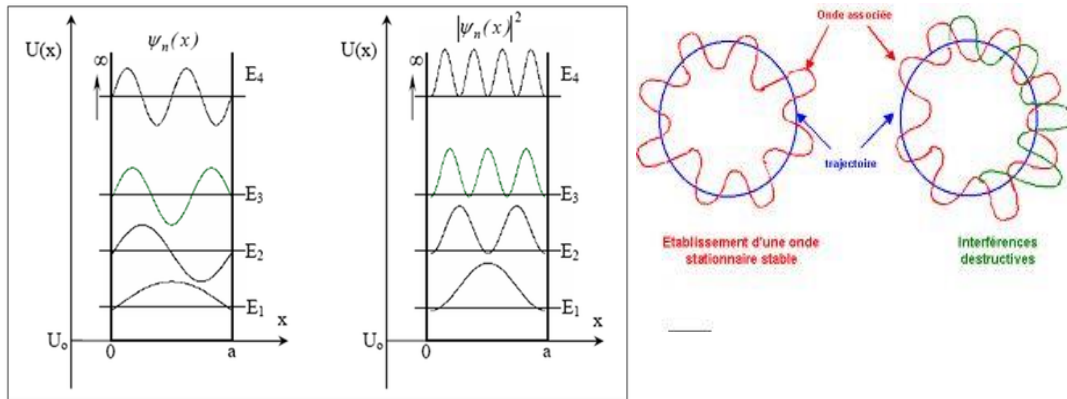
L'énergie de la particule confinée est **quantifiée**, où  $n$  représente un nombre quantique entier 1,2,3,... lié aux niveaux d'énergie de l'atome. avec  $h^2 = \hbar^2 \cdot 4\pi^2$

Pour  $n = 1$  on a notamment  $E_1 = 1 \cdot \hbar^2 \pi^2 / 2m \cdot L^2$

Pour  $n = 2$  on aura  $E_2 = 4 \cdot \hbar^2 \pi^2 / 2m \cdot L^2 = 4 \cdot E_1$

On voit donc que l'énergie d'une particule confinée en mécanique quantique ne peut pas prendre n'importe quelle valeur mais qu'elle est quantifiée. Ce qui n'est pas vrai en méca classique. L'analogie avec la corde de Melde nous a permis de déterminer assez simplement ces valeurs.

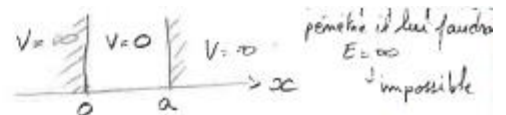
On peut d'ailleurs représenter ces différents niveaux d'énergie en gardant cette analogie qui nous permet d'avoir un double regard.



#### Chapitre 14, j'intègre PC-PC\*- Evolution d'une particule quantique dans un puit de potentiel

##### (4) Atomistique 1

##### Etude de l'EqS pour un système simple Le puit infini



Particule de masse  $m$ , astreinte à se déplacer sur un segment de droite et soumise au potentiel  $V$ .  
 Région où  $V = \infty$ ,  $\Psi(x) = 0$  fonction d'onde nul car la particule ne peut pas s'y trouver (pour  $x \leq 0$  et  $x \geq a$ )

Région où  $V = 0$  ( $0 < x < a$ )  $\rightarrow$  EdS indépendant du temps.

Equation de Schrödinger:  $\hat{H} \Psi(x) = E \Psi(x)$  or  $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$   
 $\Rightarrow -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = E \Psi(x) \Rightarrow \boxed{\Psi''(x) + \frac{2mE}{\hbar^2} \Psi(x) = 0}$  Equa diff du 2<sup>ème</sup> ordre sans 2<sup>nd</sup> membre.

La solut<sup>o</sup> générale de cette équa diff est  $\Psi(x) = A \sin Kx + B \cos Kx$ .

D'après les conditions aux limites  $\Psi(x=0) = 0 \Rightarrow \Psi(0) = B = 0$

$K_0$  non acceptable car  $a=0$   $\Psi(x=a) = 0 \Rightarrow \Psi(a) = A \sin Ka = 0 \Rightarrow Ka = n\pi$  ( $n=1,2,3,\dots$ )

Soit  $\boxed{K_n = \frac{n\pi}{a}}$   $\Rightarrow \frac{2mE_n}{\hbar^2} = \frac{n^2\pi^2}{a^2} \Rightarrow \boxed{E_n = \frac{(\hbar n\pi)^2}{2ma^2}}$  Energie quantifiée dans le puit de potentiel et  $\Psi(x) = A \sin \frac{n\pi x}{a}$

Pour trouver A: Condition de normalisation.  $\int_0^a |\Psi(x)|^2 dx = 1$

$\Rightarrow \int_0^a |\Psi(x)|^2 dx = 1 \Rightarrow \int_0^a A^2 \sin^2(K_n x) dx = 1$

$\Rightarrow A^2 \int_0^a \frac{1}{2} (1 - \cos 2K_n x) dx = 1$

$\sin a \times \sin b = \frac{\cos(a-b) - \cos(a+b)}{2}$   
 $\sin^2 a = \frac{1 - \cos(2a)}{2}$

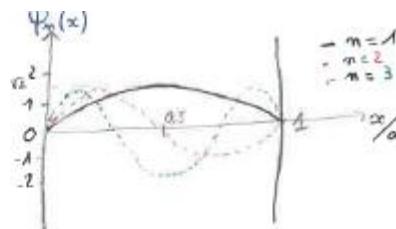
$\Rightarrow \frac{A^2}{2} \left[ x - \frac{1}{2K_n} \sin(2K_n x) \right]_0^a = 1 \Rightarrow \frac{A^2}{2} \left[ a - \frac{1}{2K_n} \sin\left(2 \frac{n\pi}{a} \times a\right) - 0 + \frac{1}{2K_n} \sin(0) \right] = 1$

$\Rightarrow \frac{A^2}{2} (a - 0) = 1 \Rightarrow A = \sqrt{\frac{2}{a}}$

Série discrète de solution  
d'énergie quantifiée

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi x}{a}$$

$$E_n = \frac{(n\pi\hbar)^2}{2ma^2}$$



Interprétation avec exemple de la corde de violon :

\* En classique, on pince une corde de violon fixée aux 2 extrémités. La corde vibre ds une combinaison / superposition de plusieurs modes propres impairs dont le mode n°1 (fondamental) est plus dominant que les autres. Les sons entendus correspondent alors aux valeurs propres des différents modes en jeu (fondamentale + harmoniques) et l'intensité dépend des amplitudes.

\* En quantique : une telle corde ne pourrait qu'être "observée" oscillant dans un seul mode (sans superposition). L'unique note entendue serait choisie aléatoirement dont la probabilité dépendrait de l'amplitude de chaque mode dans l'état vibrationnel de la fonction d'onde quantique.

## Partie Péda : Terminale S (Il existe un document eduscol – Dualité onde particule)

Extrait du BO :

### Énergie, matière et rayonnement

| Notions et contenus                                                                                                                                                                                                        | Compétences exigibles                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Dualité onde-particule</b><br>Photon et onde lumineuse.<br><br>Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie.<br><br>Interférences photon par photon, particule de matière par particule de matière. | Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.<br><br>Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule.<br>Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$ .<br>Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.<br><br>Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste. |

### Transition :

On a vu dans la carte mentale l'importance de l'histoire des sciences pour comprendre la dualité onde-corpuscule. C'est dans cet esprit que l'on va aborder cette partie du programme de TS

- 1- Etude de doc (histoire de la lumière) Etude de doc et faire une CM (20 min) (p420 Bordas)
- 2- De Broglie (DI : canon à électron) demander aux élèves de dessiner sur un brouillon (p 421 Bordas)  
Investigation « Le comportement ondulatoire des objets peut-ils être observé à notre échelle ? ( Utilisation de la formule de De Broglie)  
Pour aller plus loin : Expérience de 1992 : Une équipe japonaise a observé des franges d'interférence avec des atomes « refroidis » par un laser. Pourquoi ils ont fait ça et pourquoi ralentir les atomes ?
- 3- Retour sur la lumière (Activité 3 p 402 nathan)

## Activité 1 : La lumière onde ou particule ? (p 420 Bordas)

### Pré-requis :

- lier les phénomènes d'interférences et de diffraction a un aspect ondulatoire.

### Compétences

- Extraire une information utile
- Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.

**Description de l'activité :** Donner le texte aux élèves et leur demander de réaliser une carte mentale afin de répondre au titre de l'activité. On peut ensuite demander à un des élèves de présenter sa carte mentale au reste de la classe. Possibilité de débat si les élèves ne sont pas d'accord.

### Théories sur la lumière dans l'histoire des sciences

Dans son *Traité de la lumière*, Christian Huygens (1629-1695) compare la lumière au son. Il interprète la propagation de la lumière comme celle d'une onde et postule l'existence d'un milieu éther pour expliquer cette propagation.

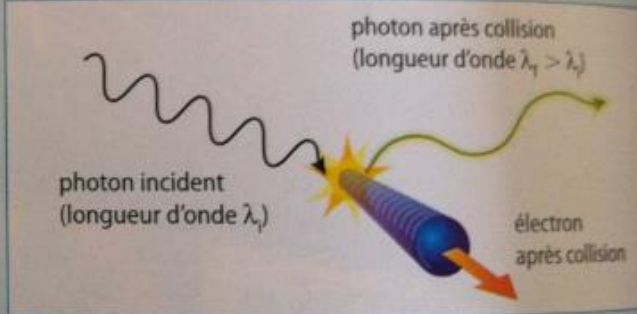
Peu de temps après, Isaac Newton (1642-1727) émet l'hypothèse que la lumière est composée de particules extrêmement rapides. Les couleurs seraient alors expliquées par les masses différentes de ces corpuscules.

Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) prédit, quant à lui, l'existence d'ondes électromagnétiques constituées d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires. La lumière devient alors un cas particulier d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm.

Albert Einstein (1879-1955) propose un modèle particulier de la lumière. Pour le célèbre savant, l'onde électromagnétique de fréquence  $\nu$  est composée de « grains d'énergie »  $E = h \cdot \nu$ . Ce retour à l'aspect granulaire de la lumière est, pour lui, le seul moyen d'interpréter l'effet photoélectrique (émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière).



**Fig. 1** Figure de diffraction observée lors du passage d'un faisceau laser à travers un trou (sa première observation date de 1665).



**Fig. 2** Effet Compton (découvert en 1917) : un photon voit sa longueur d'onde modifiée après collision avec un électron.

## Activité 2 : Dualité onde-corpuscule de l'électron (p 421 Bordas)

### Pré-requis :

- Avoir préalablement étudié le phénomène de diffraction *écart angulaire* :  $\theta = \frac{a}{\lambda}$  avec  $a$  : taille de l'ouverture.
- Avoir étudié le phénomène d'interférence.

### Compétences :

- Valider ou invalider des hypothèses
- Extraire des informations d'un document
- effectuer un calcul numérique, vérifier les unités
- interpréter des résultats (valider si le caractère ondulatoire est significatif)

**Description de l'activité :** Les élèves viennent de se rappeler le phénomène d'interférence pour la lumière. Question posé « Que se passe-t-il si je prend une balle et que je la jette entre deux fentes (fentes de Young)? » (Débat à l'oral tout le monde est d'accord pour parler de dispersion c'est-à-dire qu'on va avoir plusieurs points un peu partout).

Maintenant leur demander ce qu'il va se passer si au lieu d'une balle on prend un électron. Demander aux élèves de dessiner sur un brouillon la figure que l'on va obtenir sur l'écran.

Leur passer la vidéo « [test together Fresnel](#) »

**Tache complexe :** « Le comportement ondulatoire des objets peut-ils être observé à notre échelle ? » (Utilisation de la formule de De Broglie)

**Doc 1 :** En 1923, le physicien français Louis de Broglie, l'un des pionniers de la mécanique quantique, a formulé l'hypothèse suivante : à toute particule animée d'une quantité de mouvement  $p$  est associée une longueur d'onde  $\lambda = h/p$ , où  $h$  est la constante de Planck  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ . Autrement dit, tout corpuscule matériel possède des propriétés ondulatoires caractérisées par une longueur d'onde  $\lambda$  inversement proportionnelle à sa masse  $m$  et à sa vitesse  $v$ . Cette hypothèse généralisait aux particules dotées d'une masse la « dualité onde-corpuscule » que l'on constatait pour les photons. Cette hypothèse fut confirmée la première fois en 1927 par Davisson et Germer lors de l'observation du phénomène de diffraction pour des électrons lancés sur la surface d'un cristal de nickel.

**Doc 2 :** photo présentant une figure de **diffraction de particules** sur un cristal.

+ La distance entre les atomes est caractéristique du réseau atomique, ici elle vaut environ 200 pm.

+ Le caractère ondulatoire d'un système matériel est d'autant plus important que la longueur d'onde de de Broglie associée est proche des dimensions du système et de son environnement.

**Doc 3 :** Leur donner le tableau (Bordas p421)

Ne pas donner la dernière colonne mais plutôt la proposer comme une aide.

| Ensemble d'objets            | Masse de l'objet (kg)  | Vitesse ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | Taille de l'ouverture $a$ | $a/\lambda$ |
|------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|-------------|
| Nuage de papillons           | $1,0 \times 10^{-3}$   | 2,0                                        | 1,0 m                     |             |
| Foule de manifestants        | 70                     | 1,0                                        | 5,0 m                     |             |
| Nuage d'atomes « refroidis » | $3,34 \times 10^{-26}$ | 2,0                                        | 5,0 nm                    |             |
| Nuage d'électrons            | $9,0 \times 10^{-31}$  | 500                                        | 1,0 $\mu\text{m}$         |             |

#### **Aide et piste pour le développement :**

- Rappeler les conditions de diffraction de la lumière (schéma + formule) (Doc 2)
- Comment calculer la longueur d'onde de différents objets (Formule de De Broglie) (Doc1)
- Utiliser la remarque (Doc2) « Le caractère ondulatoire d'un système matériel est d'autant plus important que la longueur d'onde de De Broglie associée est proche des dimensions du système et de son environnement »
- Classer l'ensemble des objets proposé dans le tableau pour savoir si aspect ondulatoire (si besoin donner la dernière case du tableau et la formule de la diffraction)

**Pour aller plus loin :** En 1992, une équipe japonaise a observé des franges d'interférences avec des atomes « refroidis », c'est-à-dire ralentis par un laser.

Explique la nécessité de ralentir les atomes pour observer leur comportement ondulatoire.

Faire le point avec eux pour clarifier les choses et leur parler de la métaphore du cylindre.

### Activité 3 : Interférences photon par photon

#### Doc 4 :

En 2007, Vincent Jaques, chercheur français à l'ENS de Cachan a réalisé une expérience dont on propose ci –après une description simplifiée.

- La source utilisée émet la lumière photon par photon.
- Un système équivalent aux fentes d'Young est placé derrière cette source. (En réalité l'expérience se fait avec le biprisme de Fresnel)
- Une caméra CCD enregistre en temps réel la figure obtenue à la sortie du système. Chaque point représente l'impact d'un photon.
- Les premiers impact semblent être désordonnés et aléatoires (photo a,b ), puis lorsque leur nombre augmente, ils se répartissent de manière plus organisée (photo c,d ) pour former une figure d'interférence .

Formation de la figure d'interférence observée à travers un dispositif équivalent aux fentes d'Young.

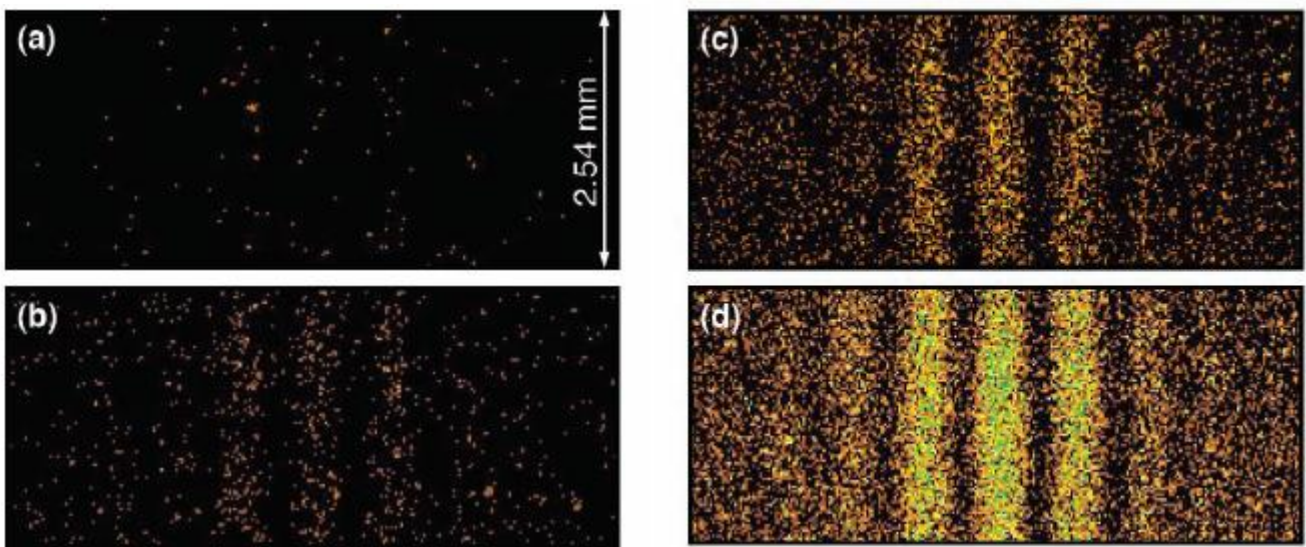


FIG. 1.9 – Observation de la construction des franges d'interférence photon par photon au moyen de la caméra CCD intensifiée. Les images (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement à l'accumulation de 10, 100, 500 et 2000 clichés, chacun des clichés étant associé à un temps d'ouverture de 1 s de la caméra. Le nombre de photons détecté par cliché est en moyenne égal à 10.

## Interférences à un photon avec un biprisme de Fresnel<sup>12</sup>

#### Questions :communiquer

##### 1. Analyse d'une expérience

Exploiter les documents ci-dessus pour expliquer en quoi l'expérience décrite est une preuve expérimentale de la dualité onde-particule de la lumière.

Un paragraphe argumenté de 5 à 10 lignes est attendu.

##### 2. Expliquez pourquoi cette expérience illustre le caractère probabiliste de la physique quantique.

Remarque : Il y'a peut-être quelque chose à faire avec l'interfrange et la formule  $i = \frac{\lambda D}{a}$  et leur demander à partir de l'échelle de calculer  $\lambda$  puis d'essayer de remonter au type de lumière utilisé pour l'expérience mais .... Je ne sais pas trop si c'est probant (Peut-être en travail supplémentaire pour ceux qui ont finis en avance).