

CORRIGE

Objectifs :

- Extraire et exploiter des informations sur un dispositif expérimental permettant de visualiser les atomes et les molécules.
- Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule.
- Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste

1. LE MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE

Hatier p382

1.1. Documents

Le microscope à force atomique (ou AFM pour *atomic force microscope*) peut servir à visualiser la surface d'un échantillon, par contact avec celui-ci.

Une pointe en silicium (**Fig. 1**) est montée sur un levier flexible et réfléchissant, qui l'oblige à être en contact avec la surface à étudier (**Fig. 2**). À courte distance apparaissent des forces répulsives dues aux interactions entre nuages électroniques des atomes de silicium de la pointe et des atomes de la surface étudiée. La pointe balaie cette surface ; son mouvement vertical est suivi grâce à l'enregistrement par la photodiode de la déviation du faisceau laser envoyé sur le levier. Une des applications possibles est l'étude in vitro de l'ADN (**Fig. 3**).

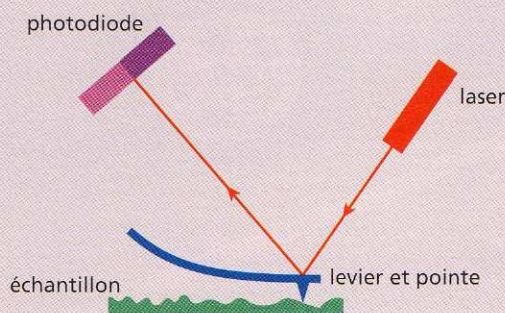


Fig. 2 Schéma de principe d'un microscope à force atomique.

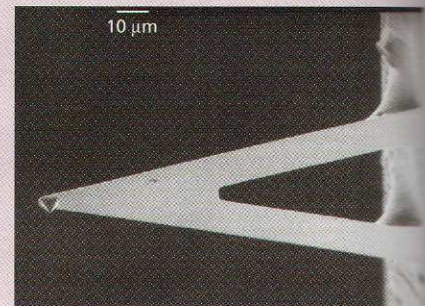


Fig. 1 Pointe d'un microscope à force atomique.

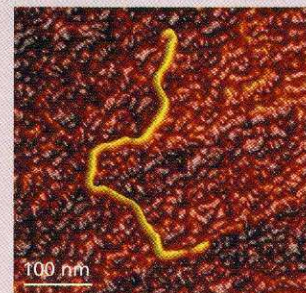


Fig. 3 Image d'un brin d'ADN observé à l'aide d'un microscope à force atomique.

1.2. Questions

a) En supposant le poids de la pointe négligeable, déterminer les deux forces qui s'exercent sur elle.

La pointe est soumise :

- à la force exercée sur elle par le levier,
- à la force exercée par la surface avec laquelle elle est en contact.

b) En utilisant la figure 1, déterminer les ordres de grandeur de la longueur de la pointe et de la largeur de sa base.

Avec la définition du document, on estime la largeur de la base de la pointe à $5 \mu\text{m}$ et la longueur de cette pointe à $5 \mu\text{m}$ aussi.

c) Les atomes de silicium sont distants les uns des autres de $2,4 \cdot 10^2 \text{ pm}$. Sachant que techniquement la pointe la plus fine réalisable possède une centaine d'atomes côte à côte à son extrémité, déterminer la largeur de l'extrémité de cette pointe.

La largeur de l'extrémité de la pointe est :

$$100 \times 2,4 \cdot 10^2 = 2,4 \cdot 10^4 \text{ pm} = 2,4 \cdot 10^4 \times 10^{-12} \text{ m} = 2,4 \times 10^{-8} \text{ m} = 24 \times 10^{-9} \text{ m} = 24 \text{ nm}$$

d) Quels autres paramètres que les dimensions de la pointe peuvent entrer en ligne de compte dans la précision de la localisation horizontale du dispositif ?

Les dimensions des objets étudiés par l'AFM entrent aussi en jeu dans la précision de la localisation : si la pointe de l'AFM est plus large qu'une des dimensions de l'objet (sa largeur, par exemple) il ne sera pas possible d'accéder à une image de qualité de cet objet.

e) Déterminer l'ordre de grandeur de la largeur d'un brin d'ADN à l'aide de la Figure 3. Cette pointe de silicium est-elle adaptée à l'étude de ce brin d'ADN ? Justifier.

L'ordre de grandeur de la largeur du brin d'ADN est 10 nm soit 10^{-8} m . C'est le même ordre de grandeur que l'extrémité de la pointe (10^{-8} m) ce qui ne permet pas une mesure de qualité ; il faudrait une pointe dont l'ordre de grandeur de la largeur soit inférieure à l'ordre de grandeur des dimensions des objets à étudier.

2. LE MICROSCOPE ELECTRONIQUE

Hachette p380

2.1. Documents

Pour mieux comprendre le monde, les scientifiques doivent pouvoir l'observer à différentes échelles. L'invention au XXe siècle d'un nouveau type de microscope a permis de repousser les limites de l'observation de l'infiniment petit. Sur quels principes repose la microscopie électronique ?

On situe l'apparition du microscope optique au XVII^e siècle. Le Néerlandais Antonie VAN LEEUWENHOEK (1632-1723) en fabrique plusieurs centaines et réalise des observations détaillées d'insectes et même de bactéries. Un de ses microscopes encore en état de nos jours aurait permis de distinguer des détails d'un micromètre de longueur.

Au milieu du XIX^e siècle, les physiciens sont confrontés à la limite du microscope optique : son pouvoir de résolution.

Pouvoir de résolution

C'est la capacité d'un instrument d'optique à obtenir deux images séparées de deux points distincts de l'objet observé. Ce pouvoir de résolution est limité par le phénomène de diffraction de la lumière par l'ouverture circulaire du dispositif optique.

Théoriquement, deux points séparés d'une distance inférieure à la longueur d'onde de la lumière qui les éclaire ne peuvent pas être distingués.

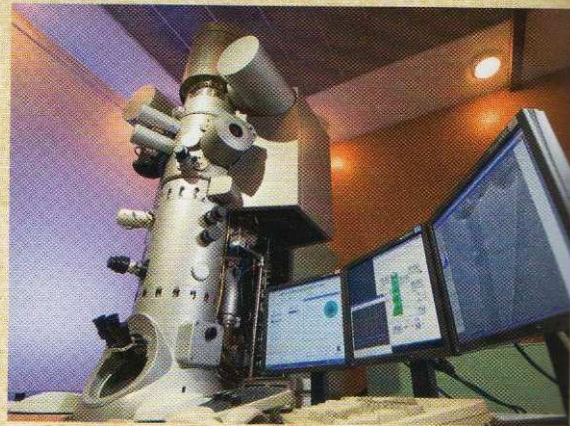
En 1931, deux ingénieurs allemands, Max KNOLL (1897-1969) et Ernst RUSKA (1906-1988), construisent le premier microscope électronique. La lumière est remplacée par un faisceau d'électrons et les lentilles par des bobines qui, traversées par un courant électrique, créent un champ magnétique.

Cinq ans auparavant, le physicien français Louis DE BROGLIE a attribué à des particules de matière une longueur d'onde λ telle que $\lambda = \frac{h}{p}$ avec p la valeur

de la quantité de mouvement de la particule et h la constante de Planck. Pour des vitesses de valeurs très inférieures à celle de la lumière dans le vide, la valeur de la quantité de mouvement s'exprime par $p = m \cdot v$.

La longueur d'onde associée aux électrons utilisés dans les microscopes électroniques est inférieure au nanomètre. Le pouvoir de résolution est donc nettement meilleur que celui d'un microscope optique. En accélérant les électrons, on améliore le pouvoir de résolution.

Dans un microscope électronique en transmission (MET), le faisceau d'électrons traverse l'objet étudié. Cela a pour contrainte de n'étudier qu'une fine coupe de cet objet. Le pouvoir de résolution est de 0,2 nm pour les meilleurs modèles.



Microscope électronique à transmission.



La dualité

Lors d'une de ses conférences, C. COHEN-TANNOUJJI, physicien français, prix Nobel de physique en 1997 à la suite de ses travaux sur « le développement de méthodes pour refroidir et piéger des atomes avec des faisceaux laser », a présenté les éléments de la diapositive ci-contre.

Claude COHEN-TANNOUJJI.

Ordre de grandeur pour un électron

À un électron accéléré par un potentiel de 10 keV*, on associe une onde de matière de longueur d'onde $\lambda = 1,2 \times 10^{-11}$ m.

Pour un atome

La masse M d'un atome est beaucoup plus élevée.

Pour que $\lambda = \frac{h}{M \cdot v}$ reste appréciable,

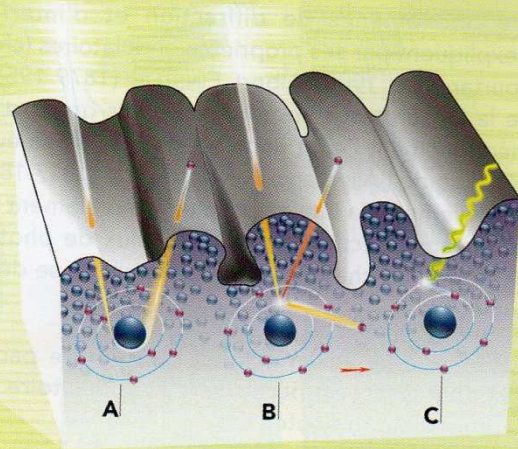
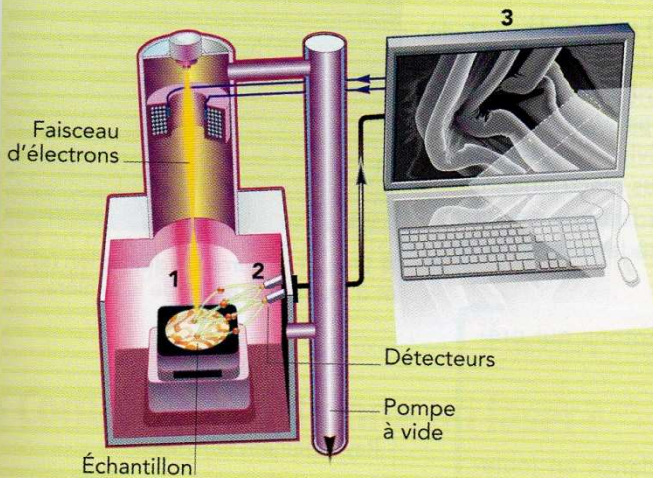
il faut que l'atome ait une vitesse v très faible.

Le comportement ondulatoire des atomes n'est donc visible qu'à très basse température.

* Cet électron possède alors une énergie cinétique égale à 10 keV.

Le microscope électronique à balayage

En exploitant les interactions des électrons avec la matière, le microscope électronique à balayage (MEB) peut restituer une vision directe de la surface d'un objet avec une résolution nanométrique. Il s'agit de balayer cette surface avec un flux focalisé d'électrons et de détecter les particules émises lors de cette interaction.



1. Balayage électronique

L'objet à étudier (mesurant du micron au centimètre) est placé sous vide dans la chambre du microscope. Le canon à électrons et le système d'optique électronique du MEB produisent un faisceau d'électrons primaire qui bombarde point par point la surface de l'objet. L'interaction des électrons avec les atomes rencontrés induit principalement trois types de particules : l'électron rétrodiffusé, l'électron secondaire et le rayon X.

2. Détection des interactions

Les particules émises dans la proche surface de l'objet sont analysées par des détecteurs du MEB. Elles permettent de former différents types d'images : les électrons rétrodiffusés et les rayons X renseignent sur la nature chimique des atomes rencontrés, les électrons secondaires donnent des images en relief permettant de caractériser la morphologie de la surface (topographie).

3. Formation de l'image

Les images résultent du balayage point par point de l'objet et de la détection synchronisée des particules réémises. Plus la zone balayée est petite, plus sa représentation est grossie, jusqu'à un million de fois. En pratique, ce grandissement maximum est limité par la résolution du MEB (environ 1 nm). Un intérêt du MEB est la très grande profondeur de champ, liée à la faible convergence du faisceau d'électrons, qui permet d'obtenir une image nette, même lorsque l'objet présente un relief important.

A. Électron rétrodiffusé

Il s'agit d'un électron du faisceau primaire qui, après avoir interagi avec le champ électrique du noyau d'un atome, change de direction. En fonction de cette nouvelle direction, il peut ressortir de l'objet.

B. Électron secondaire

Il s'agit d'un électron « arraché » à l'orbite d'un atome par un électron primaire. Cet atome devient ionisé et l'électron arraché de faible énergie, peut ressortir s'il provient de la proche surface de l'objet.

C. Rayon X

Il s'agit d'un photon de haute énergie, libéré lors du retour à l'état stable de l'atome ionisé.

D'après « Le microscope électronique à balayage », *Défis du CEA*, n° 144, octobre 2009.

2.2. Questions

a) Quel phénomène physique limite la résolution ?

La diffraction est le phénomène limitant la résolution d'un instrument d'optique.

b) Pourquoi le pouvoir de résolution d'un microscope électronique est-il meilleur que celui d'un microscope optique? Justifier.

La longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron dans un microscope électronique est plus faible que les longueurs d'onde des radiations appartenant au domaine du visible. Or, le pouvoir de résolution est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde utilisée dans un microscope. Celui du microscope électronique sera donc meilleur que celui d'un microscope optique.

c) Retrouver par le calcul la longueur d'onde évoquée par C. Cohen-Tannoudji sachant que

1 eV = $1,60 \cdot 10^{-19}$ J et que la masse d'un électron est $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg.

D'après la relation de de Broglie appliquée à un électron non relativiste, on a $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \cdot v}$

De plus, l'énergie cinétique de cet électron est $E_c = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}$

On en déduit :

$$\lambda = \frac{h}{m_e \cdot \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_c}}$$

$$\text{A.N. } \lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9,11 \cdot 10^{-31} \times 10 \times 10^3 \times 1,60 \cdot 10^{-19}}} = 1,23 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 12,3 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 12,3 \text{ pm}$$

d) Comparer les avantages et les inconvénients d'un microscope électronique à balayage à ceux d'un microscope électronique à transmission.

Le MET possède un meilleur pouvoir de résolution que le MEB, mais ne permet d'observer qu'une coupe de l'échantillon. Le MEB permet d'observer des surfaces, même avec un relief prononcé, contrairement au MET.

e) Sur quels comportements des électrons et des rayons X le schéma illustrant les interactions électron-matière insiste-t-il?

Dans ce schéma, les électrons sont représentés par de petites sphères. Cela fait penser à leur aspect particulaire. En revanche, les rayons X sont représentés sous forme de petites ondulations, ce qui met l'accent sur leur aspect ondulatoire.

f) Le terme d'« orbite » est-il approprié pour le mouvement d'un électron dans un atome?

Le terme « orbite », synonyme de trajectoire, n'est pas approprié, car, à l'échelle microscopique, on ne peut que prévoir la probabilité de présence d'un électron (les phénomènes quantiques ont un caractère probabiliste) en un lieu donné.

g) Comment le comportement ondulatoire des atomes peut-il être mis en évidence? Quelles conditions, sur la longueur d'onde de l'onde associée à des atomes et sur la valeur de leur vitesse, cela entraîne-t-il?

Un comportement ondulatoire, celui des atomes par exemple, peut être mis en évidence grâce à l'observation de figures d'interférences ou de diffraction. Pour observer le phénomène de diffraction, il faut qu'il existe une ouverture ou un obstacle dont les dimensions sont de l'ordre de celle de la longueur d'onde de l'onde étudiée.

D'après la relation de de Broglie, pour un atome de quantité de mouvement de valeur $M \cdot v$:

$$\lambda = \frac{h}{M \cdot v}$$

λ ne doit pas être trop petite, donc v ne doit pas être trop élevée.

h) Quelle grandeur permet d'affirmer qu'à l'échelle macroscopique le comportement ondulatoire de la matière n'est pas perceptible?

À l'échelle macroscopique, un échantillon de matière possède une masse beaucoup trop grande pour que le caractère ondulatoire de la matière soit perceptible.

3. LA LUMIERE : ONDE OU PARTICULE ?

Le comportement de la lumière a conduit les scientifiques à la modéliser parfois comme une onde, parfois comme une particule.

4.1. Documents

Bordas p 420

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 particulaire de la lumière. Pour le célèbre savant, l'onde électromagnétique de fréquence ν 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).

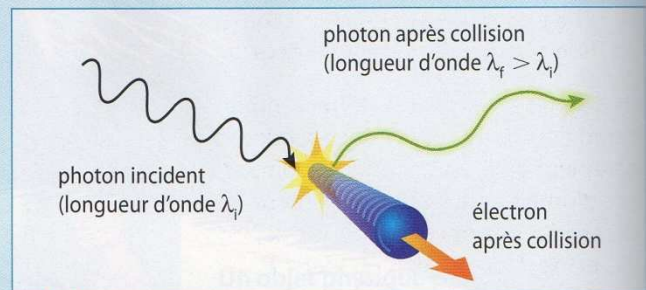


Fig. 2 Effet Compton (découvert en 1917) : un photon voit sa longueur d'onde modifiée après collision avec un électron.

3.2. Questions

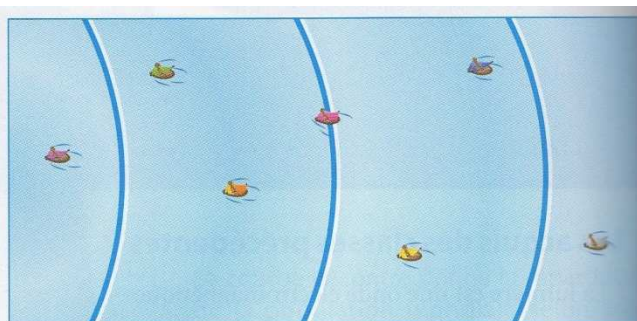
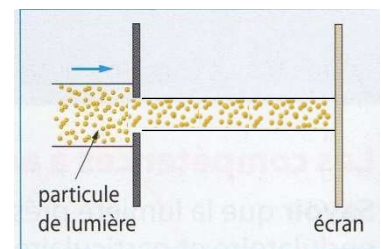
a) Reproduire et compléter le schéma ci-contre, en admettant que la lumière est composée de particules.

On dessine un faisceau de lumière diaphragmé et non diffracté.

b) L'aspect particulaire de la lumière est-il envisageable dans l'expérience de la figure 1 ?

Non, la lumière est diffractée dans l'expérience 1

c) Sur le document ci-après, on observe des vagues, qui forment un système d'ondes mécaniques. Après avoir repéré la longueur d'onde de cette onde mécanique, que pouvez-vous dire de l'influence des bateaux sur celle-ci ?



La dimension des bateaux est très petite devant la longueur d'onde de l'onde mécanique représentée. La présence des bateaux n'influence pas la longueur d'onde de la houle.

d) Par analogie avec la situation précédente, déterminer si l'aspect ondulatoire de la lumière peut être envisageable dans l'expérience de la figure 2.

Non, car la longueur d'onde du photon est modifiée par la rencontre avec l'électron.

e) Classer les quatre scientifiques du texte en fonction de leur vision sur la lumière.

Huygens et Maxwell ont interprété le comportement de la lumière par sa nature ondulatoire.

Newton et Einstein ont interprété le comportement de la lumière par sa nature particulaire.

f) Comment expliquer que les scientifiques aient tant hésité sur la nature de la lumière ?

Suivant l'étude de la lumière qui est menée, le comportement de celle-ci est différent. La lumière se comporte tantôt comme une onde tantôt comme une particule. Sa nature est donc difficile à définir à l'aide des concepts classiques d'ondes et de particules.

g) De quoi dépend le comportement ondulatoire ou particulaire de la lumière ?

Le comportement de la lumière dépend de l'expérience réalisée. Sa nature est dite «duale ».

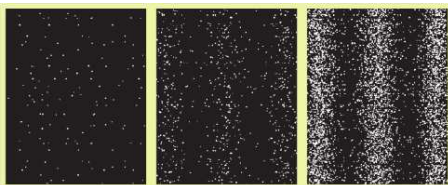
4. UNE NOUVELLE REPRESENTATION

Bordas p 421

Comment la physique a-t-elle pu unifier deux concepts aussi opposés que les comportements ondulatoire et particulaire de mêmes objets ?

4.1. Pour commencer (situation déclenchante)

1924, le physicien français Louis de Broglie propose d'étendre aux « particules matérielles » (électrons, protons...) la dualité onde-particule admise pour la lumière. Une des expériences illustrant ce double comportement consiste à envoyer des électrons un par un au travers de deux fentes rapprochées, puis à observer leur comportement en sortie, en y plaçant un écran (Doc. 4).



Doc. 4 Figure d'interférences électron par électron. La durée de l'expérience et donc le nombre d'électrons sont croissants de gauche à droite. Les impacts électroniques sur l'écran apparaissent en blanc.

Dans sa thèse, publiée la même année, de Broglie écrit : Quand deux théories, fondées sur des idées qui paraissent entièrement différentes, rendent compte avec la même élégance d'une même vérité expérimentale, on peut toujours se demander si l'opposition des deux points de vue est bien réelle et n'est pas due seulement à l'insuffisance de nos efforts de synthèse. »

Dans la relation qui porte son nom, de Broglie rapproche les deux concepts d'onde et de particule dans la même formule : la quantité de mouvement p (concept particulaire) est égale au rapport de la constante de Planck h sur la longueur d'onde λ (concept ondulatoire), soit $p = \frac{h}{\lambda}$

Le comportement ondulatoire des objets peut-il s'observer à notre échelle ?

4.2. Documents

Dans Le Nouveau monde de M. Tompkins, roman de George Gamow et Russell Stannard, le héros est propulsé dans un monde fantastique où la constante de Planck est proche de 1. Un safari est organisé : un groupe d'animaux est rabattu sur une haie continue présentant deux trous. Cette haie passée, les animaux forment alors des zones de plus fortes présences, à l'image des interférences ondulatoires.

5.3. Questions

a) Dans le monde de M. Tompkins, quelle serait la longueur d'onde associée à des papillons de masse

$m = 1,0 \cdot 10^{-3}$ kg et de vitesse $v = 2,0$ m.s⁻¹ ?

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{1}{1,0 \times 10^{-3} \times 2,0} = 5 \times 10^2 \text{ m}$$

b) Si un nuage de papillons passe à travers un obstacle d'ouverture $a = 1,0 \cdot 10^2$ m, que peut-on prévoir sur la répartition des papillons après l'obstacle ?

λ est du même ordre de grandeur (10² m) que les dimensions de la fente. Les papillons vont se répartir par paquets plus ou moins denses après la fente à l'image d'une figure de diffraction observée avec la lumière.

c) Refaire le calcul, en prenant comme valeur de la constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s. Ce résultat semble-t-il plus compatible avec la réalité ?

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1,0 \times 10^{-3} \times 2,0} = 3,3 \cdot 10^{-31} \text{ m} \Rightarrow \lambda \text{ très inférieure aux dimensions de la fente.}$$

Pas de phénomène ondulatoire mais un comportement particulier.

d) Quelle constante physique semble contrôler le comportement ondulatoire des objets ?

La constante de Planck.

e) Reproduire et compléter le tableau suivant avec : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Objet	Masse (kg)	Vitesse (m · s ⁻¹)	Taille de l'ouverture a	$p \cdot a/h = a/\lambda$
Nuage de papillons	$1,0 \times 10^{-3}$	2,0	1,0 m	$3,0 \times 10^{30}$
Une foule de manifestants	70	1,0	5,0 m	$5,3 \times 10^{35}$
Nuage d'atomes « refroidis »	$3,34 \times 10^{-26}$	2,0	5,0 nm	0,50
Nuage d'électrons	$9,0 \times 10^{-31}$	500	1,0 μm	0,67

$$p = h/\lambda \Rightarrow 1/\lambda = p/h$$

$$\text{d'où : } a/\lambda = p \cdot a/h$$

$$a/\lambda = m \cdot v \cdot a/h$$

f) En 1992, une équipe japonaise a observé des franges d'interférence avec des atomes « refroidis », c'est-à-dire ralentis par un laser. Expliquer la nécessité de ralentir les atomes pour observer leur comportement ondulatoire.

Si T diminue, v aussi, donc la longueur d'onde de matière augmente. Il est donc plus facile d'observer des phénomènes ondulatoires.

g) Comment la relation formulée par de Broglie, $p = \frac{h}{\lambda}$ permet-elle d'unifier les deux concepts classiques d'onde et de particule ?

p est lié au concept de particule et λ au concept d'onde. La formule permet de lier ces deux concepts antagonistes.

h) Pourquoi le comportement ondulatoire des objets macroscopiques est-il inexistant ?

Le rapport a/λ n'est pas du même ordre de grandeur.

i) Quelle condition doit vérifier le rapport $\frac{a}{\lambda}$ pour considérer comme dominants les phénomènes ondulatoires ?

Lorsque le rapport a/λ est du même ordre de grandeur, les phénomènes ondulatoires des objets se manifestent.