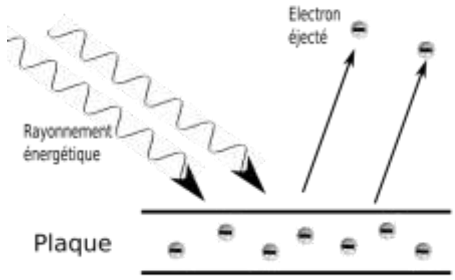
Dualité onde-particule

I. Mise en évidence des photons : L'effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique correspond à l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière.
C'est notamment pour expliquer l'effet photoélectrique qu'Einstein a postulé l'existence des photons : pour extraire un électron d'un métal, il faut apporter une énergie appelée travail d'extraction. Il y a effet photoélectrique si le photon qui frappe le métal apporte une énergie égale ou supérieure au travail d'extraction (énergie seuil).
Lorsque l'énergie du photon incident est supérieure au travail d'extraction, l'excès d'énergie est transféré à l'électron émis sous forme d'énergie cinétique.



1. L'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron d'une électrode de tungstène est de $E_{seuil} = 4{,}49\ eV$.
   Calculer la longueur d'onde dans le vide d'un photon d'énergie 4,49 eV.
   Rappel : $1eV = 1{,}6 \times 10^{-19}\ J$ $\quad h = 6{,}62 \times 10^{-34} J.s$

   Pour réaliser l'extraction, il faut au moins que $E_{photon} = E_{seuil}$
   $\lambda = \frac{h.c}{E_{photon}}$ A.N. $\lambda = \frac{6{,}62\times10^{-34}\times3{,}0\times10^{8}}{4{,}49\times1{,}6\times10^{-19}} = 2{,}76 \times 10^{-7} m = 276\ nm$
   Il s'agit d'UV.

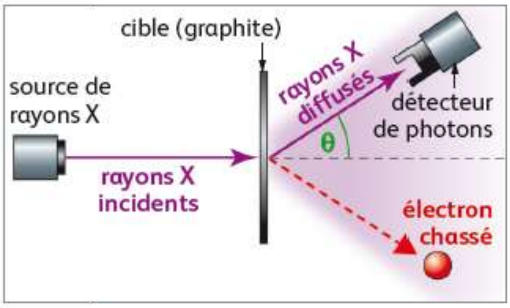
2. Observerait-on un effet photoélectrique si la longueur d'onde de la radiation éclairante était $\lambda' = 300\ nm$
   Un élève propose d'augmenter l'intensité de la radiation pour observer l'effet. Commenter sa proposition.

   Comme $\lambda' > \lambda$ alors $E'_{photon} < E_{seuil}$: l'énergie du photon ne permet pas d'apporter l'énergie d'extraction nécessaire pour observer l'effet photoélectrique.
   Augmenter l'intensité reviendrait à augmenter le nombre de photons. Aucun d'eux ne provoquerait cependant d'extraction.
   C'est cela qui a permis de supposer l'existence du photon, particule d'énergie.

3. Calculer en eV l'énergie cinétique de l'électron émis lorsque l'électrode de tungstène reçoit un rayonnement de longueur d'onde $\lambda" = 200nm$.

   Energie apportée par le photon : $E"_{photon} = \frac{h.c}{\lambda}$ A.N. $E''_{photon} = \frac{6{,}62\times10^{-34}\times3{,}0\times10^{8}}{200\times10^{-9}} = 9{,}93 \times 10^{-19} J = 6{,}21\ eV$
   Cette énergie est suffisante pour provoquer l'extraction d'un électron : $E''_{photon} > E_{seuil}$
   Le « surplus » d'énergie est transformé en énergie cinétique : l'électron s'éloigne de la plaque avec l'énergie cinétique : $Ec = E''_{photon} - E_{seuil}$

II. Mise en évidence de la dualité : L'effet Compton



Dans son expérience schématisée ci-contre, Compton envoie un faisceau de rayons X, onde électromagnétique de courte longueur d'onde λ, sur une cible qui est une mince feuille de graphite. La position du détecteur est modifiée pour étudier la diffusion selon différentes valeurs de θ.

Il observe les phénomènes suivants :

– des électrons sont chassés de la cible en graphite ;
– des rayons X sont diffusés dans toutes les directions ;
– la longueur d'onde λ' des rayons X diffusés est plus grande que la longueur d'onde λ des rayons X incidents.

Les mesures expérimentales aboutissent à la relation empirique suivante : $\lambda' - \lambda = 2{,}42 \times 10^{-12}\,(1 - \cos\theta)$, pour les rayons X diffusés selon la direction θ, λ' et λ étant exprimées en mètre.

L'augmentation de la longueur d'onde des rayons X diffusés par les électrons porte le nom d'effet Compton.

Dans le cadre de la théorie ondulatoire, rien ne justifie la présence de ces rayonnements de longueur d'onde λ'. Après cinq années d'expérimentations et de tentatives d'explications, Compton trouve une interprétation satisfaisante. La situation est celle d'un choc entre deux particules formant un système considéré comme isolé : un photon d'énergie $h\nu$ et de quantité de mouvement p, avec un électron qui peut être considéré comme libre et immobile dans les conditions de l'expérience. L'application des lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie totale conduit à une relation

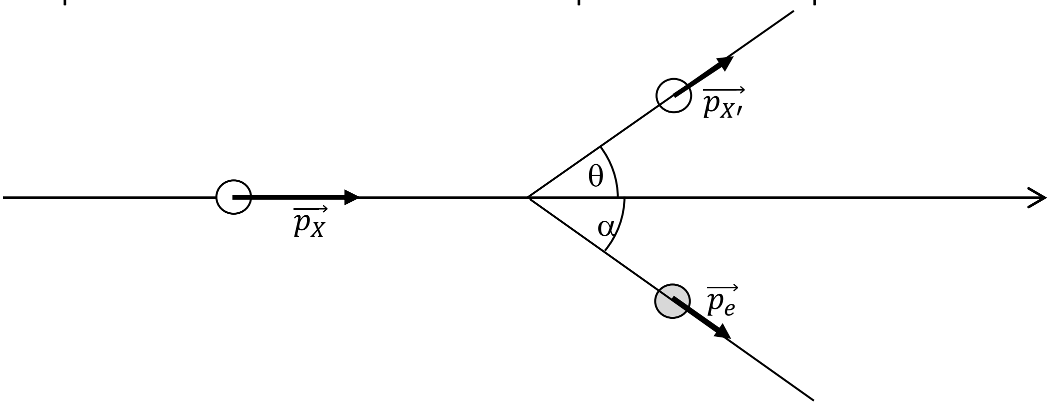
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

m_e : masse de l'électron
h : constante de Planck
c : célérité de la lumière dans le vide

Comme prévu par Einstein, les rayons X se comportent comme des particules : les photons, auxquels on peut attribuer une énergie et une quantité de mouvement. L'effet Compton constitue la preuve incontestable de l'existence des quanta d'énergie $\mathscr{E} = h\nu$, que de nombreux physiciens réfutaient jusqu'alors.

1. Comment Compton propose-t-il d'interpréter l'augmentation de la longueur d'onde des rayons X diffusés ?

   Si la longueur d'onde des photons diffusés est supérieure à la longueur d'onde des photons incidents, les photons (X') diffusés ont une énergie moindre que les photons (X) incidents. La différence d'énergie correspond à l'énergie qui a permis d'extraire et mettre en mouvement un électron.
   Compton considère ceci comme un choc de particules entre 1 photon X et 1 électrons :



2. Traduire la conservation de la quantité de mouvement en utilisant les vecteurs quantités de mouvement des particules mises en jeu.

   Conservation de la quantité de mouvement :
   $\overrightarrow{p_X} = \overrightarrow{p_{X'}} + \overrightarrow{p_e}$

3. Donner le domaine des valeurs possibles pour Δλ. Justifier le choix de l'utilisation des rayons X pour observer l'effet Compton.
   On donne : $h = 6{,}63\times10^{-34}$ J.s $m_e = 9{,}1\times10^{-31}$ kg $c = 3{,}00\times10^{8}$ m.s^{-1}

$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e.c}.(1 - cos\theta)$
Si $\theta = 0$ alors $cos\theta = 1$ et $\Delta\lambda = 0$
Si $\theta = 90°$ alors $cos\theta = 0$ et $\Delta\lambda = \frac{h}{m_e.c}$
On a donc $0 < \Delta\lambda < \frac{h}{m_e.c}$ soit $0 < \Delta\lambda < \frac{6{,}62\times10^{-34}}{9{,}1\times10^{-31}\times3{,}0\times10^{8}}$
D'où $0 < \Delta\lambda < 2{,}42 \times 10^{-12} m$ $0 < \Delta\lambda < 2{,}42\ pm$
Pour obtenir une telle variation, il faut des rayons X.

4. Pour quelle valeur de θ la valeur de λ' est-elle maximale ?
Que peut-on dire de l'énergie de l'électron ?
$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e.c}.(1 - cos\theta)$ donc $\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e.c}.(1 - cos\theta)$
λ' est maximal lorsque $cos\theta = 0$ soit $\theta = \frac{\pi}{2}$
Lorsque λ' est maximale, l'énergie du photon X' est minimale et l'électron a reçu le maximum d'énergie.

III. Modèle particulaire : le photon

En 1905, Einstein associe à la lumière une particule appelé photon.
Chaque photon est un quantum d'énergie dont l'expression est : $E = h.\nu$
Chaque photon a une quantité de mouvement : $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

IV. Relation de Louis de Broglie :

En 1923, alors que les scientifiques ont prouvé que la lumière peut se comporter comme une onde ou comme des particules, Louis de Broglie émet l'hypothèse que l'on peut associer une onde à des particules matérielles comme les électrons : à toute particule matérielle de quantité de mouvement p, il associe une onde de longueur d'onde λ : $\lambda = \frac{h}{p}$

V. Vérification de la dualité onde-particule : interférences obtenues avec des électrons (exercice Bac)

Si l'on parvient à établir la correspondance entre ondes et corpuscules pour la matière, peut-être sera-t-elle identique à celle qu'on doit admettre entre ondes et corpuscules pour la lumière ? Alors on aura atteint un très beau résultat : une doctrine générale qui établira la même corrélation entre ondes et corpuscules, aussi bien dans le domaine de la lumière que dans celui de la matière.

D'après Notice sur les travaux scientifiques, de Louis de Broglie, 1931

Données numériques :
Masse d'un électron : $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg
Charge élémentaire : $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
Constante de Planck : $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J.s
Vitesse de propagation de la lumière dans le vide : $c = 3{,}0 \times 10^{8}$ m.s^{-1}

1. Expérience des fentes d'Young

En 1961, Claus Jönsson reproduit l'expérience des fentes d'Young en remplaçant la source lumineuse par un canon à électrons émettant des électrons, de mêmes caractéristiques, un à un. L'impact des électrons sur l'écran est détecté après leur passage à travers la plaque percée de deux fentes.

Répondre aux questions suivantes à partir des documents 1 et 2.

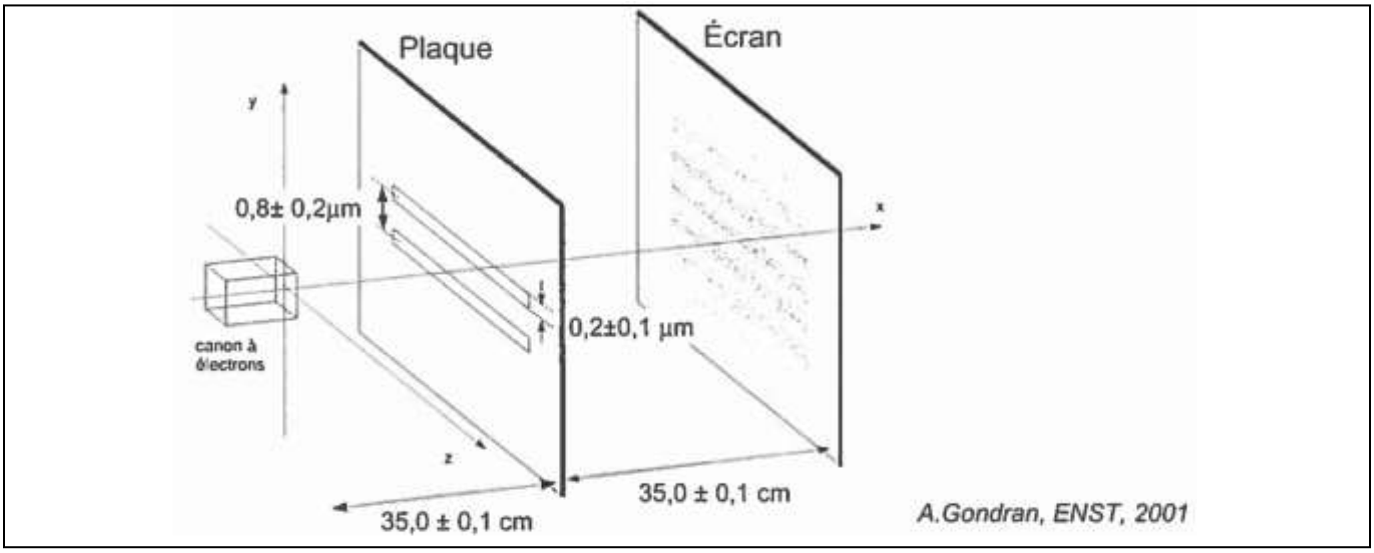
1.1. Peut-on prévoir la position de l'impact d'un électron ? Justifier.

Avec un « faible » nombre d'impacts, il semble que les positions d'impacts des électrons sont aléatoires. On ne peut pas donc pas prévoir la position de l'impact d'un électron unique

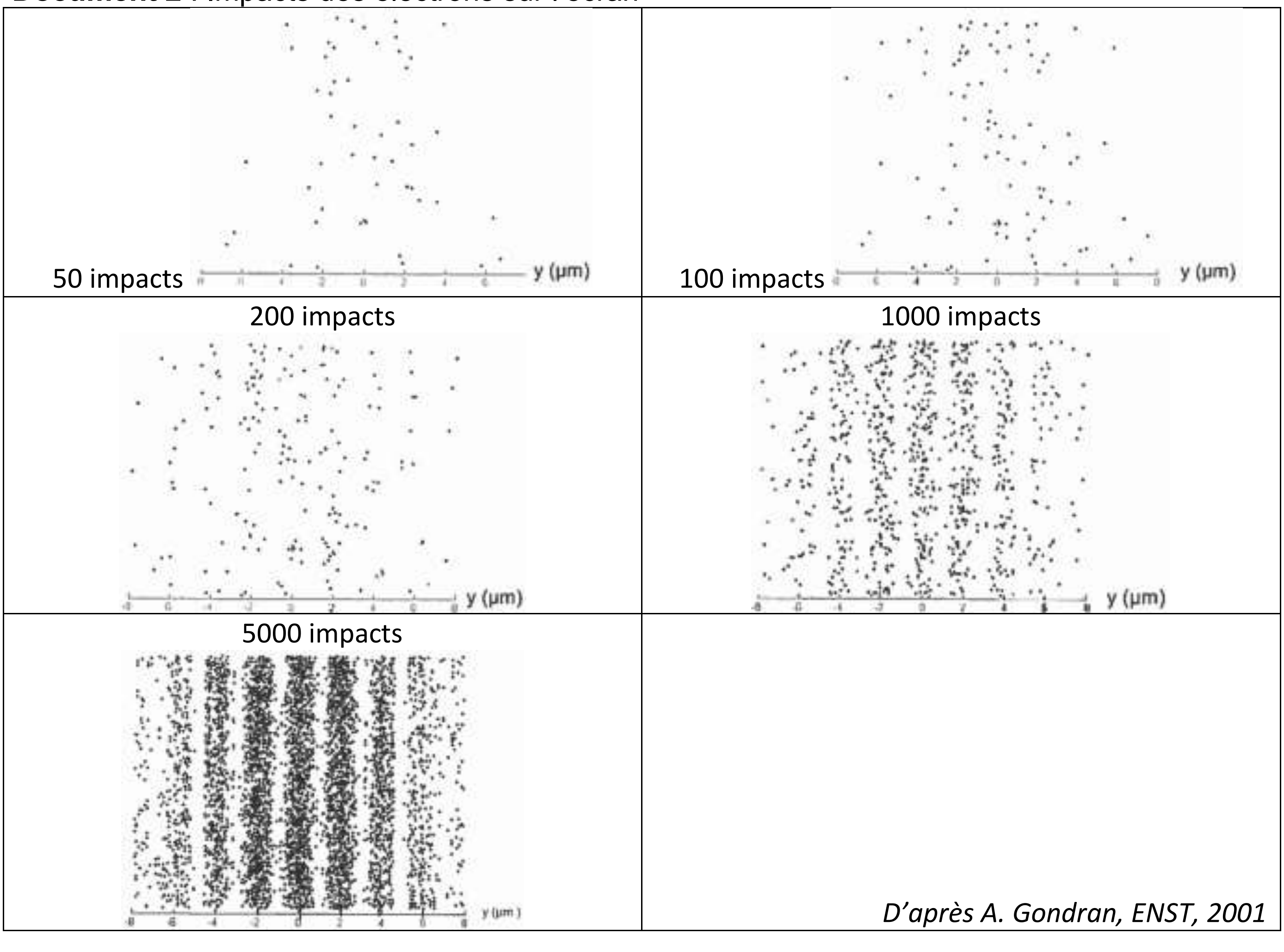
1.2. En quoi cette expérience met-elle en évidence la dualité onde-particule pour l'électron ? Détailler la réponse.

Après un grand nombre d'impacts d'électrons (5000), on reconnaît une figure d'interférences (voir 5000 impacts) d'où l'aspect ondulatoire des électrons tandis qu'avec un faible nombre d'impacts, on observe l'aspect particulaire (un impact aléatoire par électron)

Document 1 : Expérience des fentes d'Young



Document 2 : Impacts des électrons sur l'écran



D'après A. Gondran, ENST, 2001

2. Longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron

2.1. Passage à travers la plaque percée de deux fentes

2.1.1. Déterminer la valeur de la longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron et donnée par la relation de de Broglie, lorsque la vitesse des électrons est $v_e = 1{,}3 \times 10^8 m.s^{-1}$

D'après la relation de de Broglie associant une onde de longueur d'onde λ à toute particule en mouvement : $p = \frac{h}{\lambda}$ avec p = m_e.v (quantité de mouvement de la particule).
On en déduit que $\lambda = \frac{h}{m_e.v}$
Soit $\lambda = \frac{6{,}6\times10^{-34}}{9{,}1\times10^{-31}\times1{,}3\times10^{8}}$ = $5{,}6\times10^{-12}$ m = **5,6 pm**

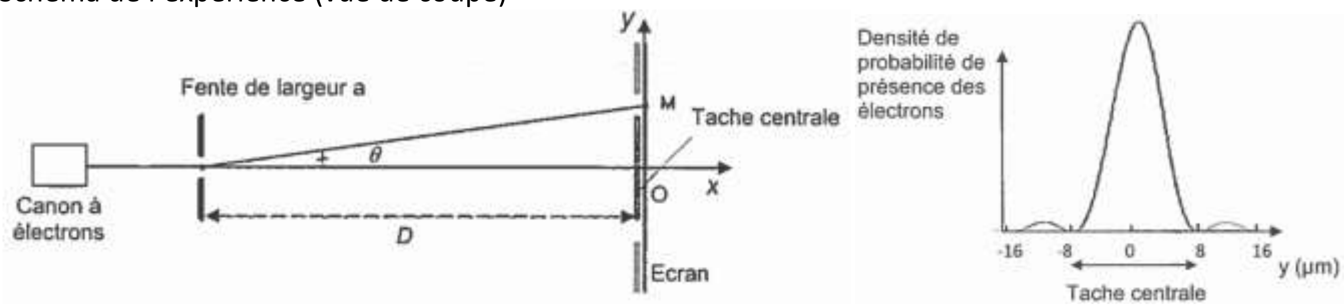
2.1.2. Vérifier la cohérence des observations expérimentales réalisées avec le résultat précédent.

Expérimentalement, on a : D'après le doc.1
- Distance séparant les deux fentes $b = 0{,}8$ mm
- Distance entre la plaque et l'écran $D = 35{,}0$ cm

À l'aide du doc.2. déterminons la valeur de l'interfrange : $4\,i = 8{,}0\ \mu m$
donc $i = \frac{8{,}0}{4} = 2{,}0\ \mu m$

En utilisant la formule correspondant à l'interfrange mesurable pour des interférences lumineuses :
$i = \frac{\lambda.D}{b}$ d'où $\lambda = \frac{i.b}{D}$
A.N. $\lambda = \frac{2{,}0\times10^{-6}\times0{,}8\times10^{-3}}{35{,}0\times10^{-2}} = 4{,}57 \times 10^{-12}\ m = 5 \times 10^{-12}\ m = \mathbf{5\ pm}$

2.2. Passage à travers une seule fente de la plaque
L'une des deux fentes de la plaque est dorénavant bouchée ; l'autre de largeur *a* = 0,2 µm est centrée sur l'axe Ox du canon à électrons.
Schéma de l'expérience (vue de coupe)



2.2.1. Quel est le phénomène physique observé ?

On observe une tache centrale entourée de deux taches secondaires séparées par une zone d'extinction : le faisceau d'électrons a été **diffracté** par la fente (ce qui confirme la nature ondulatoire des électrons).

2.2.2. Retrouver l'ordre de grandeur de la valeur de la longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron, sachant que la distance séparant la fente de l'écran est *D* = 35,0 cm.
Pour les petits angles, on rappelle que tan θ ≈ θ.

En utilisant le schéma de l'expérience, $tan\ \ \theta = \frac{OM}{D}$
En utilisant l'approximation des petits angles : $\theta \approx tan\ \ \theta = \frac{OM}{D}$ (avec θ en radians)

La relation entre l'écart angulaire θ entre le centre d'une tache de diffraction et le milieu de la 1ère extinction est : $\theta = \frac{\lambda}{a}$ donc $\lambda = \theta . a = \frac{OM\ .\ a}{D}$ (avec θ en radians).

En utilisant le document 3, $OM\ =\ 8{,}0\ \mu m$
$\lambda = \frac{8{,}0\times10^{-6}\times0{,}2\times10^{-6}}{35{,}0\times10^{-2}} = 5 \times 10^{-12}m = 5\ pm$
L'ordre de grandeur de cette longueur d'onde est le picomètre ce qui est en accord avec les questions précédentes.