

Interaction lumière matière

1) Introduction

2) Rappels

3) L'effet photoélectrique

3-1) Observation de l'effet photoélectrique

3-2) Interprétation de l'effet photoélectrique

5) L'effet photovoltaïque

6) Applications

Programme officiel

B) Décrire la lumière par un flux de photons

Le photon : énergie, vitesse, masse.

Effet photoélectrique.

Travail d'extraction.

Absorption et émission de photons.

Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.

Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.

Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.

Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.

Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.

Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.).

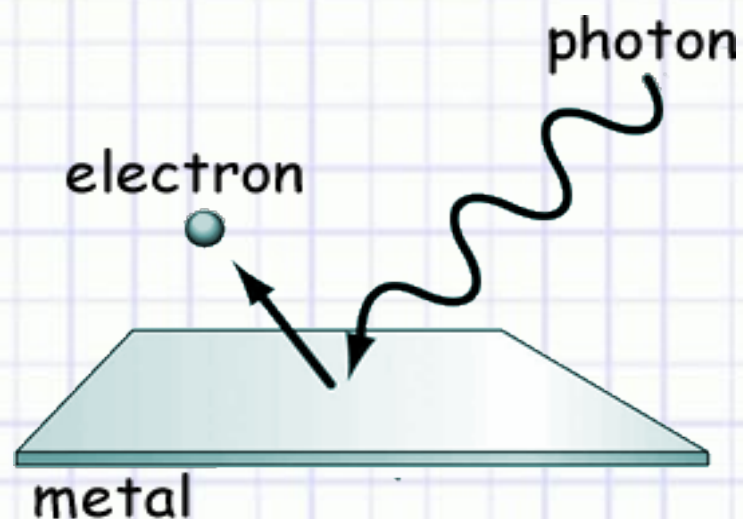
Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.

1) Introduction

Pour décrire des expériences liées à la lumière les physiciens élaborent des modèles.

Dans le chapitre précédent nous avons exploité le **modèle géométrique** (rayon lumineux) pour expliquer le principe de la lunette astronomique. Ce modèle ne permet pas d'expliquer les expériences d'interférences et de diffraction observées avec la lumière visible.

Dans le **modèle ondulatoire** on considère la lumière comme une onde électromagnétique. On peut alors interpréter les interférences et la diffraction comme pour les ondes mécaniques .



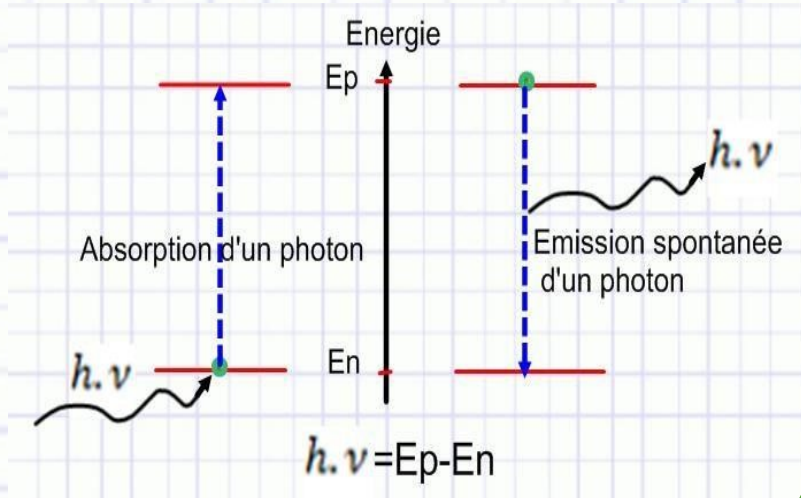
La surface éclairée d'un métal peut émettre des électrons.

C'est l'**effet photoélectrique** découvert et présenté par Heinrich Hertz en 1887.

Aucune des théories connues ne permet d'interpréter ce phénomène.

2) Rappels

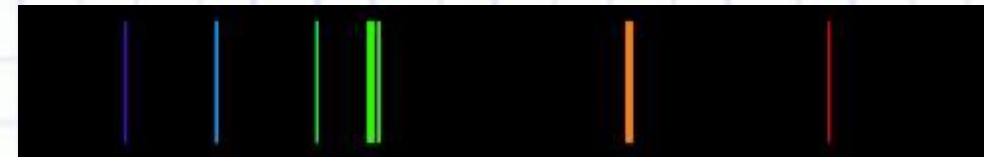
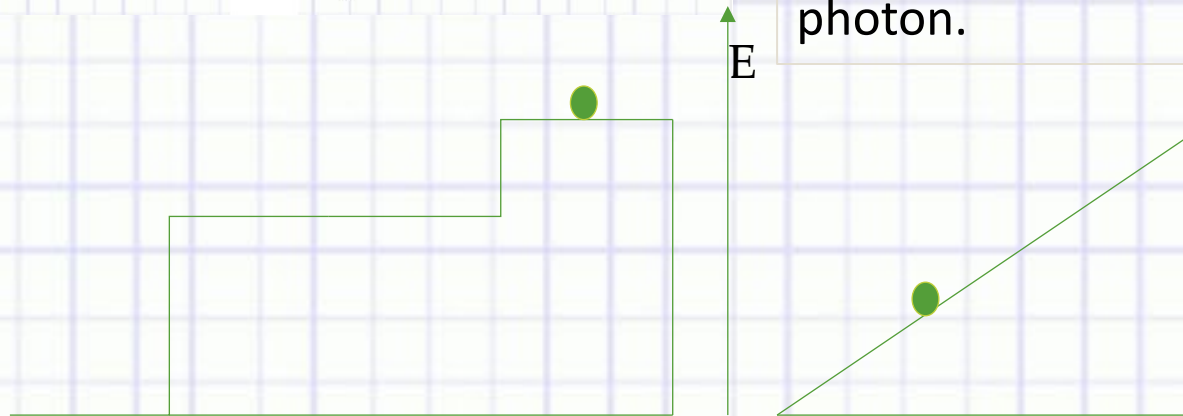
Avant d'aborder l'interprétation de l'effet photoélectrique nous allons rappeler quelques notions



Un atome isolé (ou tout autre objet microscopique, particule) possède des niveaux d'énergie quantifiés.

L'atome absorbe un photon si l'énergie de ce dernier correspond exactement à la différence d'énergie entre deux niveaux.

Le niveau supérieur est instable (état excité). La désexcitation ramène l'atome dans un état inférieur avec émission d'un photon.



Les phénomènes quantiques apparaissent avec des objets microscopiques lorsque la mécanique de Newton ne permet pas de les expliquer.

La lumière est transportée par des photons d'énergie E , de masse nulle et de charge électrique nulle.

constante de Planck $h=6.63.10^{-34}J.s$

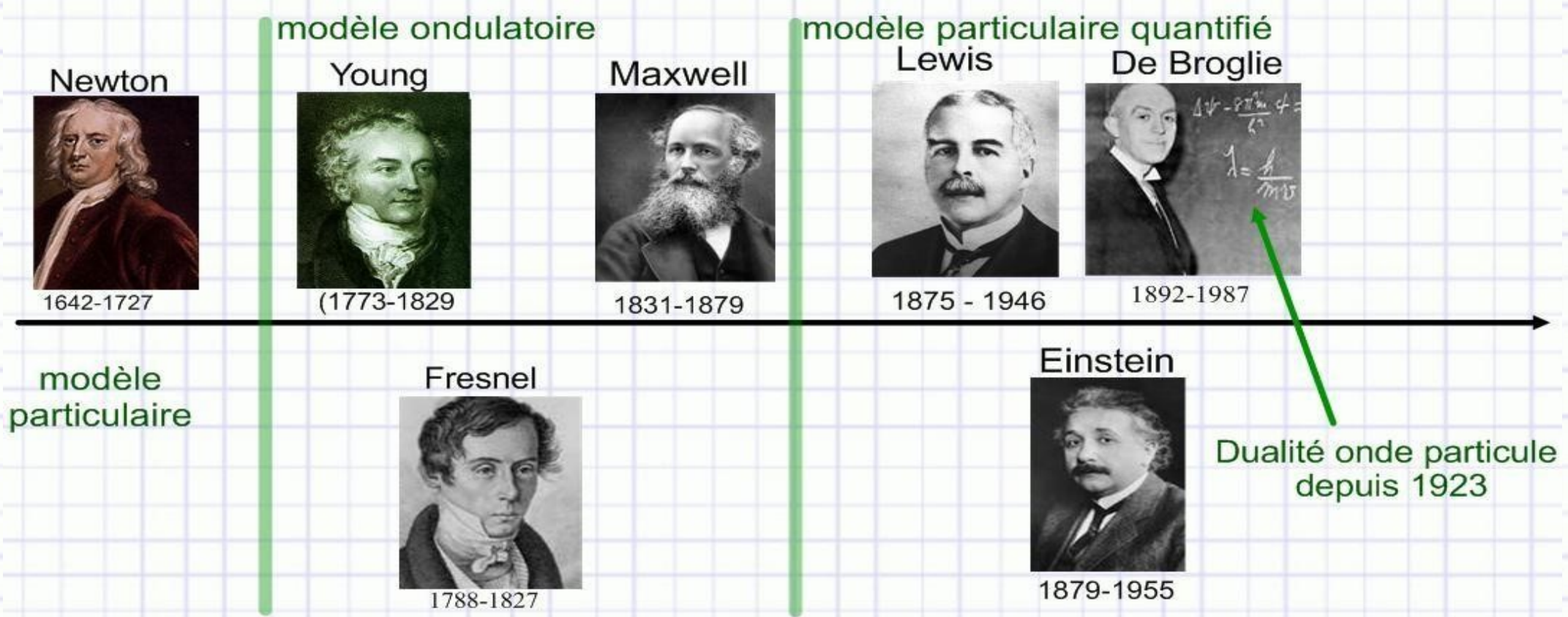
E en Joule (J)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Célérité $c = 3.00.10^8m/s$

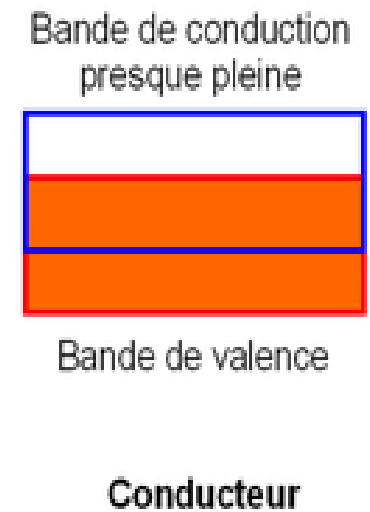
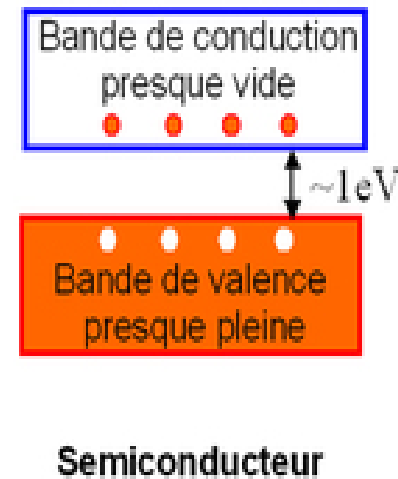
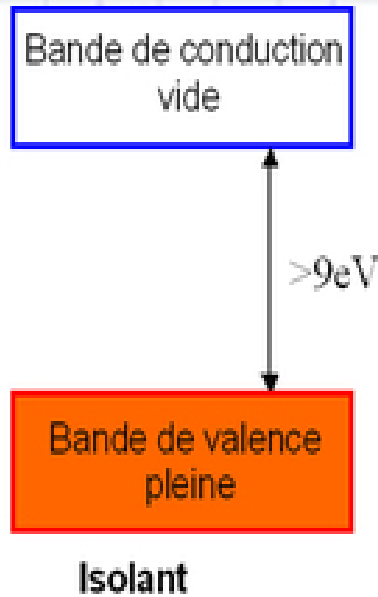
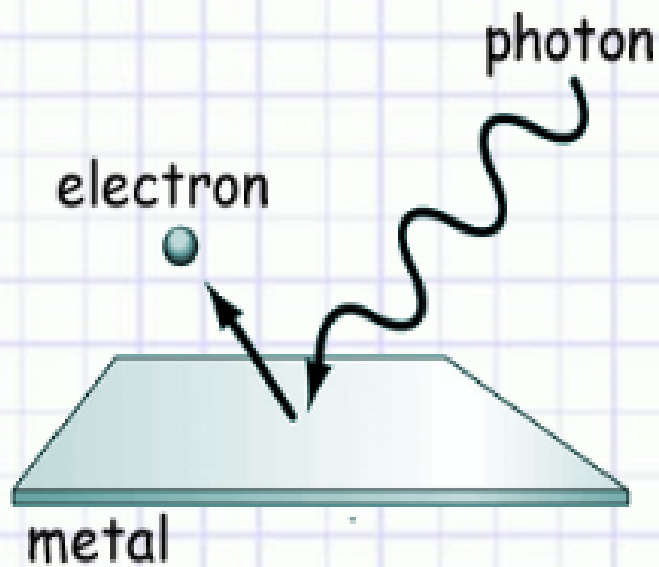
λ Longueur d'onde en m

ν fréquence en de l'onde en Hertz (Hz)



« Selon l'hypothèse envisagée ici, lors de la propagation d'un rayon lumineux émis par une source ponctuelle, l'énergie n'est pas distribuée de façon continue sur des espaces de plus en plus grands, mais est constituée d'un nombre fini de quanta d'énergie localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que tout d'un bloc. »

Source : Albert Einstein, « Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. » dans Annalen der Physik

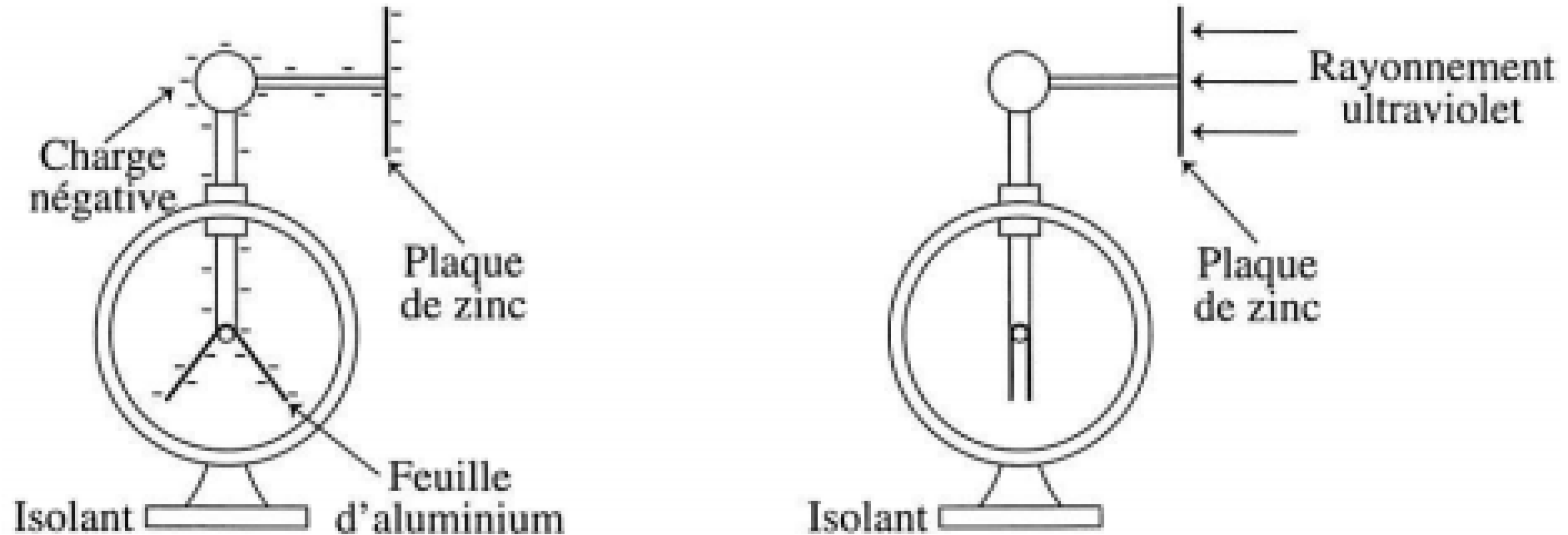


Dans un solide : Les électrons de la bande de conduction sont responsables de la conductivité électrique alors que les électrons de la bande de valence sont responsables de la cohésion du solide.

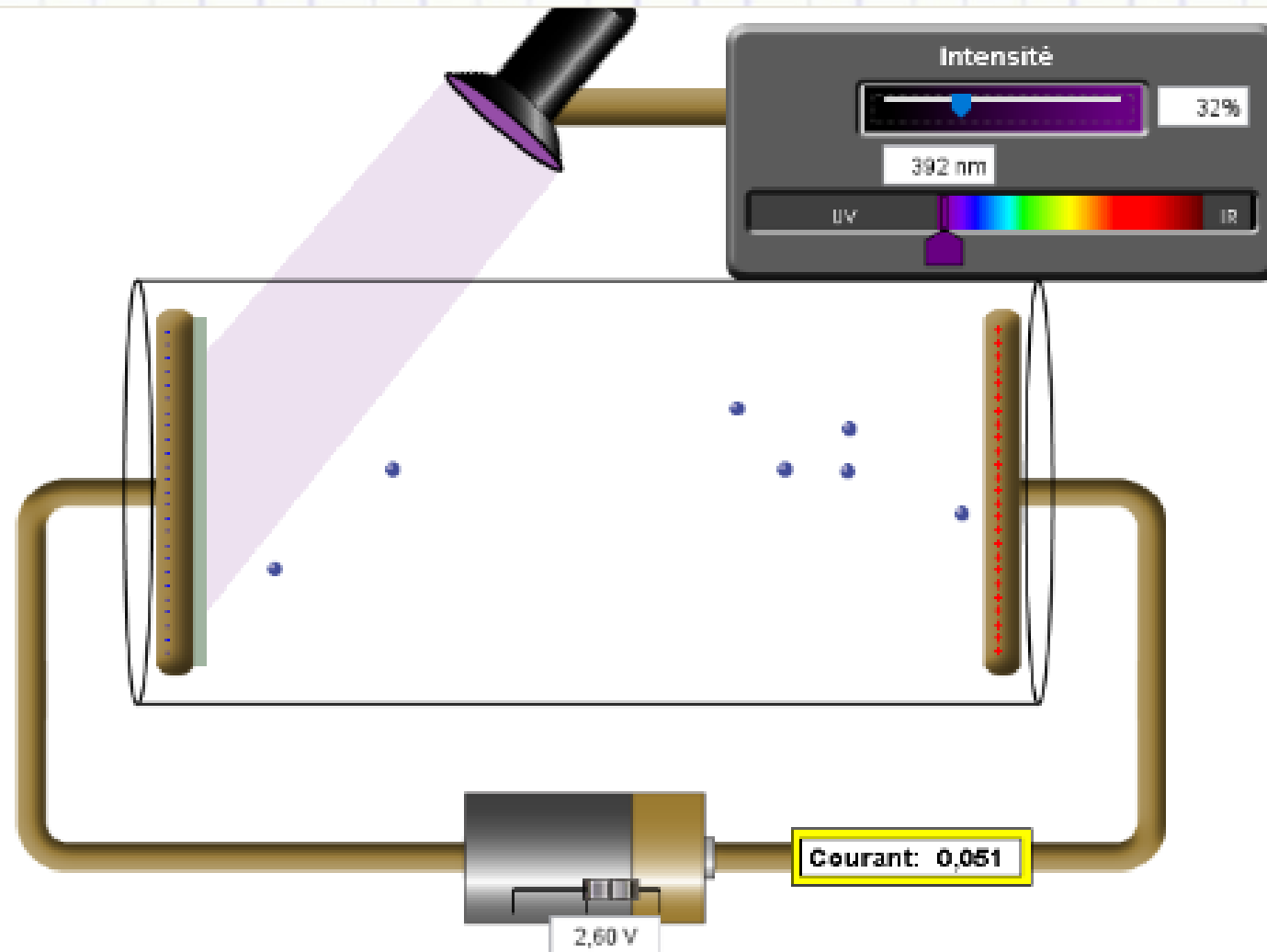
3) L'effet photoélectrique

3-1) Observation de l'effet photoélectrique

Expérience de Halbwachs assistant de Hertz (1888)



1902 : Lenard observe que l'énergie cinétique des électrons individuels émis par effet photoélectrique augmente avec la fréquence de la lumière utilisée, ce qui est en contradiction avec la théorie ondulatoire de la lumière qui prédirait que l'énergie des électrons serait proportionnelle à l'intensité de la lumière.

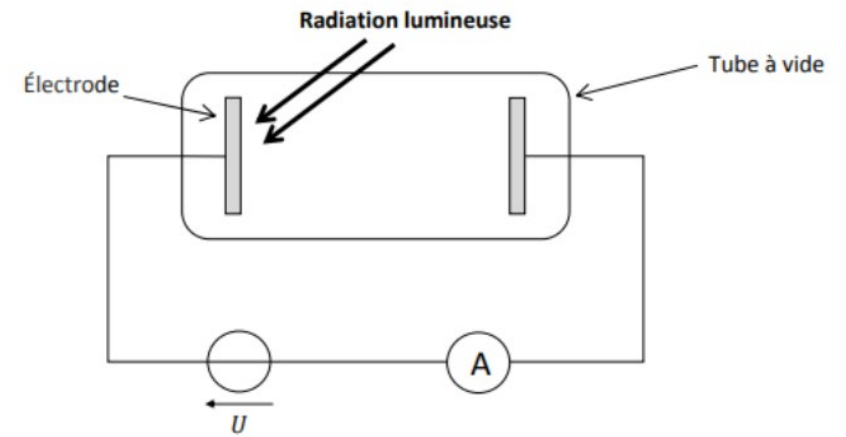


On applique une tension électrique U entre deux électrodes placées dans une ampoule à vide.

La cathode est éclairée par une lumière monochromatique dont on peut faire varier la longueur d'onde et l'intensité.

On peut aussi choisir le métal constituant la cathode. Les électrons éventuellement arrachés sont accélérés vers l'anode ce qui se traduit par l'apparition d'un courant électrique.

- Il existe une fréquence seuil telle que pour toute fréquence plus petite on n'observe aucun courant électrique quel que soit l'intensité lumineuse.
- Pour une fréquence supérieure au seuil même avec une intensité lumineuse très faible on observe un courant électrique.
- La fréquence seuil dépend du métal utilisé pour la cathode.



L'effet photoélectrique a été expliqué en 1905 par Einstein en utilisant le concept de photon introduit par Planck. Einstein a obtenu pour cette interprétation le prix Nobel en 1921.

En 1924 Louis De Broglie associe une longueur d'onde à toute particule matérielle.

On parle alors de dualité onde corpuscule.

Le **modèle corpusculaire** a donc permis à Einstein d'interpréter l'effet photoélectrique.

3-2) Interprétation de l'effet photoélectrique

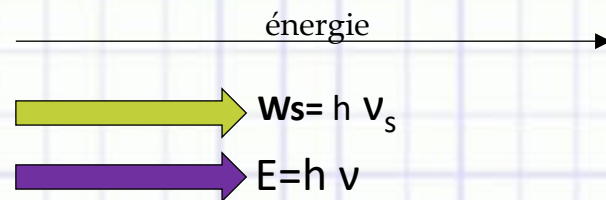
L'effet photoélectrique s'explique en admettant qu'un électron du métal n'absorbe qu'un seul photon (indivisible) à la fois.

On appelle W_s le travail d'extraction c'est-à-dire l'énergie à fournir à l'électron pour l'extraire du métal en absorbant l'énergie E d'un photon. Soit $E = h \nu$, l'énergie d'un photon incident. Il y a trois cas possibles :

Si $E = W_s$

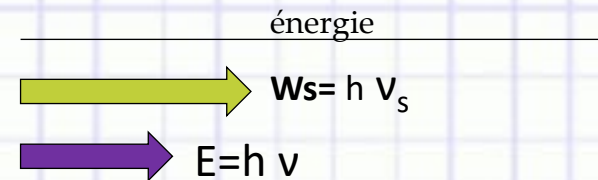
Toute l'énergie du photon à servie à extraire l'électron. Ce dernier est arraché sans surplus d'énergie donc sans énergie cinétique. Sa vitesse est donc nulle.

Dans ce cas $\nu = \nu_s$ fréquence seuil et W_s est le seuil d'extraction.



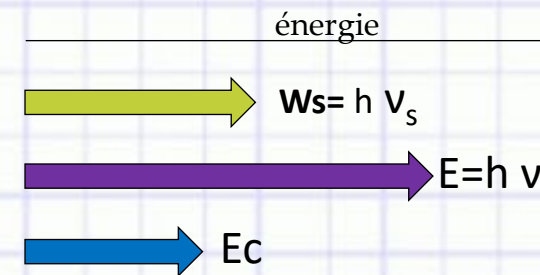
Si $E < W_s$

Le photon agissant seul, il n'y a pas assez d'énergie pour extraire l'électron donc pas d'effet photoélectrique



Si $E > W_s$

L'électron est arraché avec un surplus d'énergie qui dépend de la fréquence du photon.



Donc pour $E \geq W_s$ l'effet photoélectrique est observé.

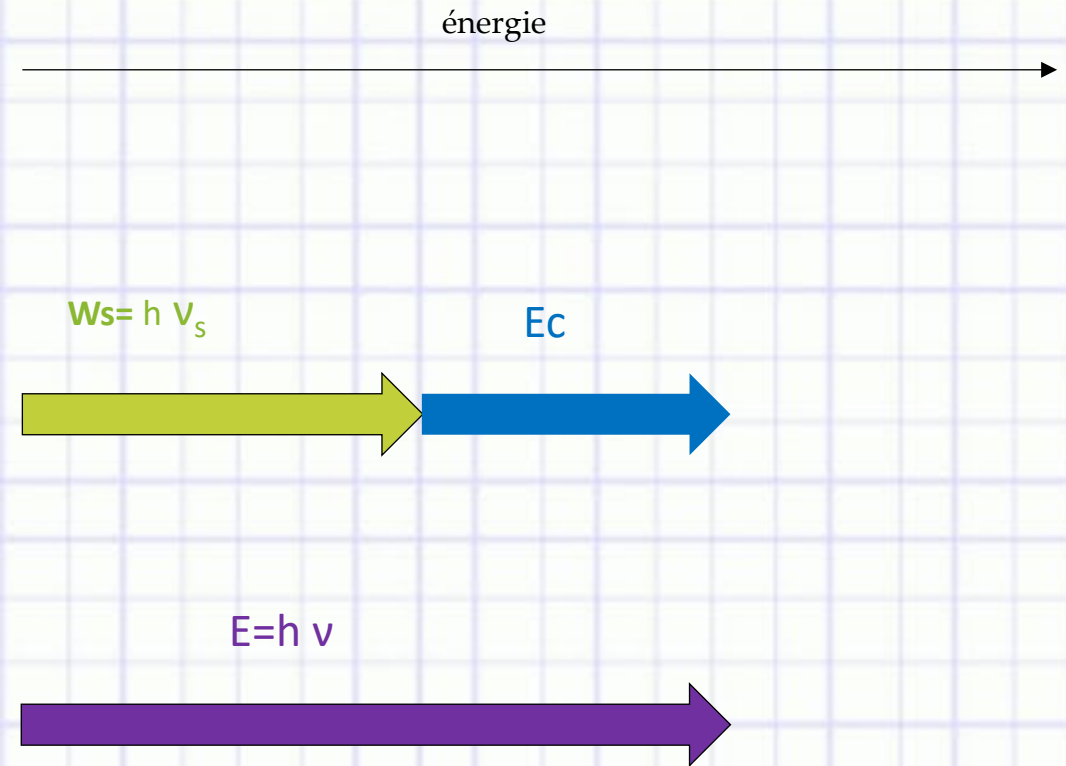
Si on appelle E_c l'énergie cinétique de l'électron on a

$$E = W_s + E_c$$

$$h \nu = h \nu_s + E_c$$

$$E_c = h \nu - h \nu_s = h (\nu - \nu_s)$$

$$E_c = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h(\nu - \nu_s)$$



Exercice corrigé 23 page 520 (Hatier)

23 On éclaire la surface d'une bassine en cuivre, utilisée pour faire les confitures, avec un rayonnement lumineux de fréquence $\nu = 3,00 \times 10^{16}$ Hz.

- Déterminer la fréquence seuil ν_s du cuivre.
- Justifier que l'effet photoélectrique est observable.
- Déterminer l'énergie cinétique des électrons émis.
Convertir le résultat en électron-volts.
- En déduire la vitesse v de ces électrons.



Données

- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s
- Travail d'extraction du cuivre :
 $W_{\text{ext}}(\text{Cu}) = 7,53 \times 10^{-19}$ J
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J
- Masse de l'électron : $m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg

Exercice corrigé 26 page 522 (Hatier)

26 Stérilisation par lampe ultraviolette (UV)

Les UV-C sont les ultraviolets les plus énergétiques et donc les plus nocifs pour le corps humain. Des lampes émettrices d'UV-C sont utilisées dans les laboratoires de biologie pour stériliser le matériel. Une plaque de zinc est éclairée avec une lampe à UV-C émettant un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 100$ nm.

Données

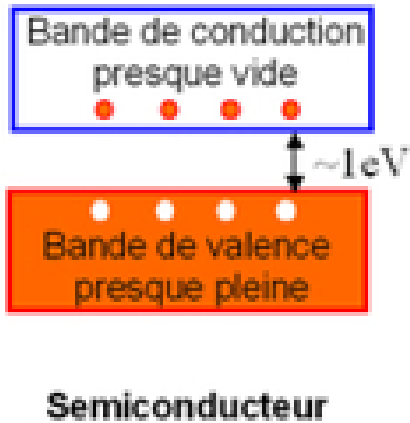
- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹
- Masse d'un électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg
- $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J
- Travail d'extraction du zinc : $W_{\text{ext}}(\text{Zn}) = 9,41$ eV

- Déterminer la fréquence seuil ν_s du zinc.
- Déterminer la fréquence du rayonnement émis par la lampe à UV-C.
- L'effet photoélectrique est-il observable ?
- Déterminer l'énergie cinétique E_c des électrons éjectés de la plaque de zinc. On donnera le résultat en joules et en électron-volts.
- En déduire leur vitesse v .



Lampe à UV-C servant à nettoyer du matériel médical.

4) L'effet photovoltaïque



Dans un semiconducteur comme le silicium le gap ou écart d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence est très faible.

Sous l'action d'un rayonnement électromagnétique des électrons de la bande de conduction peuvent passer dans la bande de valence. Ainsi le matériau isolant devient conducteur

C'est un effet photoélectrique dit interne car sous l'action de la lumière le courant électrique est produit dans le matériau semiconducteur.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel (père d'Henri Becquerel) en 1839.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

L'électron n'est pas arraché .

ISS : 2400m² de panneaux solaires !



16 panneaux solaires, chacun composé de 16 400 cellules photovoltaïques, sont installés sur l'ISS.

L'efficacité énergétique ou rendement η indique le taux d'énergie solaire pouvant être converti en électricité. Pour les panneaux de l'ISS, ce taux est de l'ordre de 14%.

Au cours de la mission alpha 6 nouveaux panneaux vont être installés.

η rendement

P_{el} puissance électrique en W

$$\eta = \frac{P_{el}}{\varepsilon S}$$

S surface en m²

ε puissance lumineuse incidente en W.m⁻²

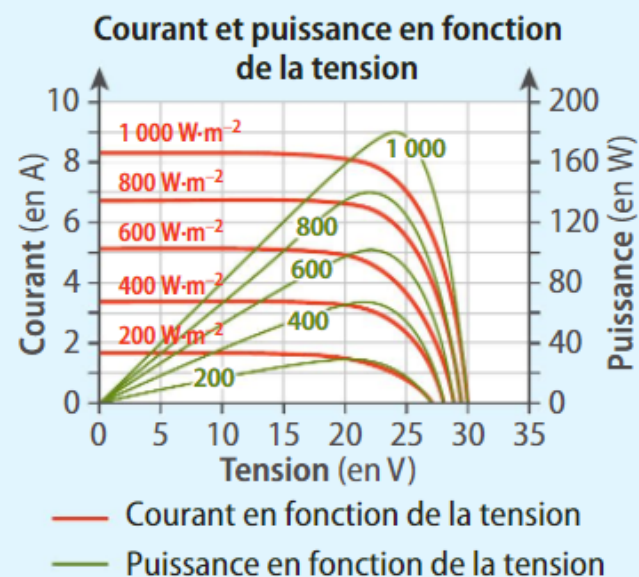
Exercice corrigé 24 page 521

24 Un panneau solaire

Un installateur de panneaux solaires souhaite poser le modèle dont les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, selon l'éclairement reçu, sont données dans le **doc. 1**.

L'éclairement reçu le jour de la mesure vaut $\varepsilon = 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et la température vaut $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

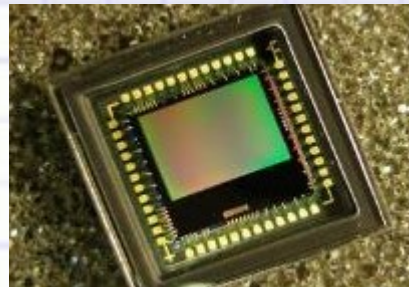
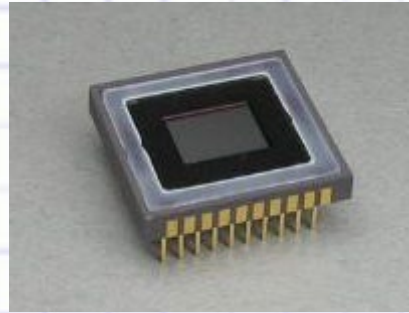
- Quelle conversion énergétique est réalisée par un panneau solaire ?
- Lire graphiquement la puissance maximale P que le panneau peut fournir quand il est soumis à un éclairement $\varepsilon = 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
Pour quelle valeur U de la tension électrique cette puissance maximale est-elle atteinte ?
- Par lecture graphique, déterminer la valeur I de l'intensité du courant électrique correspondant à la tension électrique U et à l'éclairement ε .
- Vérifier par le calcul que les valeurs de U et de I obtenues correspondent bien à une puissance fournie égale à la valeur de P déterminée à la question **b**.
- En déduire le rendement du panneau solaire.



Doc. 1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du panneau solaire, selon différents éclairements.

Donnée Dimensions du panneau
longueur L × hauteur H × épaisseur e :
 $1\,318 \text{ mm} \times 994 \text{ mm} \times 46 \text{ mm}$

5) Applications



Exercice corrigé 27 page 523

27 La DEL

Les diodes électroluminescentes (DEL, en abrégé) émettent de la lumière par effet photovoltaïque. Lorsqu'un courant traverse un matériau semi-conducteur, certains électrons participant au courant électrique passent de la bande de conduction à la bande de valence : ils subissent une transition énergétique, leur énergie diminue d'une valeur égale à l'écart d'énergie séparant ces deux bandes, appelée le gap énergétique. Il y a alors émission, par le matériau, de photons dont l'énergie est égale à ce gap.

Doc. 1 La DEL

Une DEL est un dispositif physique qui peut émettre de la lumière lorsqu'un courant électrique la traverse. La première DEL rouge fut inventée en 1962 par Nick Holonyak Jr. et Sam Bevacqua, ingénieurs américains, avec un gap de 1,78 eV. Pendant de nombreuses années, les couleurs disponibles furent limitées au rouge, jaune, vert et bleu. Dans les années 1990, les travaux de chercheurs américains permirent la création de la DEL blanche.



Détail d'une DEL blanche.

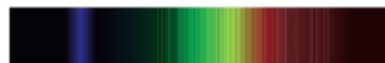
Doc. 2 La lampe à filament

Une lampe à filament, ou lampe à incandescence, produit de la lumière lorsqu'un filament en tungstène est porté à incandescence par effet Joule. L'incandescence est un phénomène physique par lequel un corps chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans le visible.



Lampe à incandescence.

Doc. 3 Spectres de deux types de lampes



Lumière émise par une DEL blanche.



Lumière blanche émise par incandescence d'un filament.

- Exprimer en joules l'énergie correspondant au gap de la DEL rouge.
- Déterminer la longueur d'onde λ du rayonnement associé et vérifier que la lumière émise est bien rouge.
- La DEL blanche est formée d'une DEL émettant dans le bleu et d'un luminophore, c'est-à-dire une substance transformant une partie de ce rayonnement en une lumière à large spectre et de longueur d'onde plus grande. Expliquer en quoi le spectre de la DEL blanche est cohérent avec cette description et pourquoi l'œil perçoit une teinte blanche.

Données

- Constante de Planck :
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Célérité de la lumière dans le vide :
 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$