

Description de la lumière

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

• 1^{re} Enseignement de spécialité

- La lumière peut être décrite par deux modèles :
 - un modèle **ondulatoire** où la lumière est une onde électromagnétique ;
 - un modèle **particulaire** où la lumière est constituée de particules appelées photons.
- Les deux modèles coexistent : on parle de **dualité onde-particule**.
- Une radiation de fréquence ν ou de longueur d'onde dans le vide λ est un ensemble de photons transportant chacun l'énergie E telle que :

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

énergie du photon (en J) la constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
fréquence (en Hz) célérité de la lumière dans le vide $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
longueur d'onde (en m)

- L'énergie de l'atome est quantifiée : elle ne peut prendre que certaines valeurs. Un atome peut absorber un photon si l'énergie du photon correspond à l'écart entre deux niveaux. Un atome dans un état excité (après une décharge électrique, un chauffage, une absorption de lumière, etc.) peut restituer de l'énergie en émettant un photon.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.



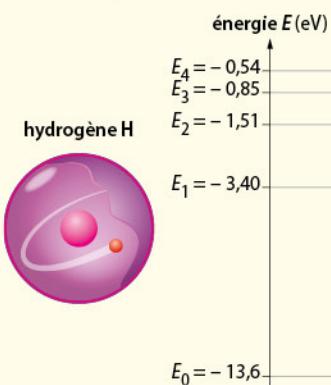
SITUATION 1

On dit que la lumière est onde et particule.

Décrire ces deux aspects de la lumière.

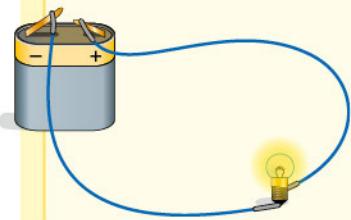
SITUATION 2

Les valeurs de l'énergie de l'hydrogène sont indiquées sur le diagramme suivant.



SITUATION 3

On souhaite mesurer la puissance électrique utilisée par une lampe et l'éclairement émis.



Indiquer quels instruments de mesure on va utiliser et comment les utiliser.

Recopier le diagramme et représenter l'émission d'un photon en précisant son énergie.

par un flux de photons

19

PHYSIQUE

En quoi la découverte et l'interprétation de l'effet photoélectrique a ouvert la voie à la physique quantique et à la mise au point de dispositifs innovants comme les cellules photovoltaïques utilisées au début pour les satellites ?

EXERCICE 36



NOTIONS ET CONTENUS

- ▶ Le photon : énergie, vitesse, masse.
- ▶ Effet photoélectrique.
- ▶ Travail d'extraction.
- ▶ Absorption et émission de photons.
- ▶ Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- ▶ Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque ➔ **Activité 4**

1. ACTIVITÉ DE DÉCOUVERTE

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :

(APP) Rechercher et organiser l'information utile

(COM) Utiliser un vocabulaire adapté

Effet photoélectrique

Les rayonnements peuvent extraire des électrons des matériaux. L'explication de ce phénomène a mis en évidence l'aspect particulier de la lumière.

DOC 1 Expérience de Hertz et Hallwachs

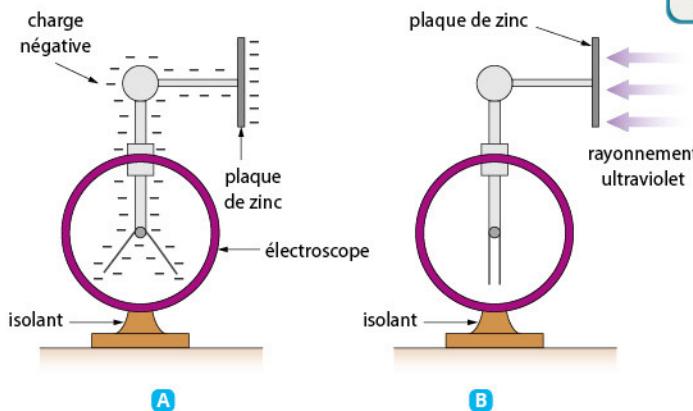
En 1887, Heinrich Hertz (1857-1894) observe par hasard, lors d'une expérience sur les ondes électromagnétiques, une influence de la lumière sur l'électricité. Avec son collaborateur, Wilhelm Hallwachs (1859-1922), ils réalisent en 1888 le montage expérimental schématisé ci-contre.

Voici les résultats de leurs expériences :

- lorsque l'électroscopie est chargé négativement et la plaque éclairée par un rayonnement ultraviolet, il se décharge ;
- lorsque l'électroscopie est chargé positivement et la plaque éclairée par un rayonnement ultraviolet, il ne se passe rien ;
- lorsque l'électroscopie est chargé négativement et la plaque éclairée par un rayonnement visible, il ne se passe rien.

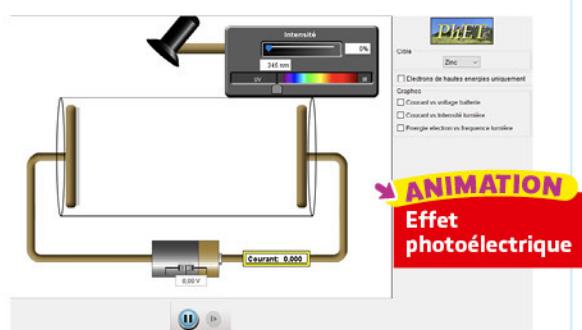
VIDÉO

Expérience de l'effet photoélectrique



DOC 2 Influences de la longueur d'onde et de l'intensité

Dans cette animation, on teste l'éclairage de matériaux différents par des rayonnements dont on fait varier la longueur d'onde et l'intensité.



ANIMATION Effet photoélectrique

DOC 3 Modèles ondulatoire et particulaire de la lumière

La lumière peut être décrite par deux modèles :

- un modèle **ondulatoire** où la lumière est une onde électromagnétique ;
- un modèle **particulaire** où la lumière est constituée de particules appelées photons d'énergie $E = h\nu$.

Les deux modèles coexistent : on parle de **dualité onde-particule**.

Dans le modèle ondulatoire, plus l'intensité augmente et plus l'énergie apportée par le rayonnement augmente. Dans le modèle particulaire, l'énergie apportée dépend de la fréquence ν du rayonnement et du nombre de photons.

Le modèle particulier a été utilisé en 1905 par Albert Einstein (1879-1955), pour interpréter l'effet photoélectrique. Son interprétation a été récompensée par le prix Nobel de physique de 1921.

EXPLOITATION ET ANALYSE

- 1 Proposer une définition de l'effet photoélectrique.
- 2 a. Montrer que l'effet photoélectrique ne se produit qu'à partir d'une fréquence et ce, quelle que soit l'intensité du rayonnement incident.
b. Déterminer cette fréquence pour le zinc et le sodium.
c. Interpréter les expériences de Hertz et Hallwachs.
- 3 Comment évolue le nombre d'électrons émis avec l'intensité du rayonnement incident ?

SYNTHÈSE

En vous basant sur les documents mis à disposition, expliquer pourquoi l'effet photoélectrique ne peut être expliqué qu'en utilisant l'aspect particulier de la lumière.

Je réussis si...

- Je sais définir et citer les propriétés de l'effet photoélectrique.

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

COMPÉTENCES :

- (APP) Rechercher et organiser l'information utile
(COM) Utiliser un vocabulaire adapté et choisir des modèles de représentation appropriés

Applications de l'interaction lumière-matière

L'interaction lumière-matière est exploitée dans de nombreux dispositifs.

DOC 1 Dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière

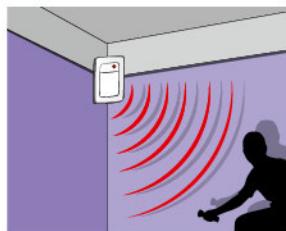
A diode électroluminescente



B spectromètre et spectrophotomètre



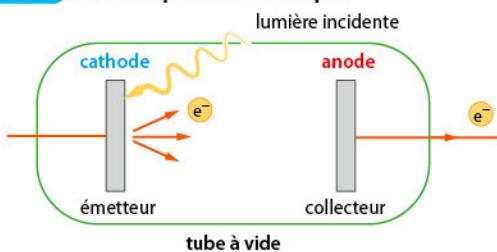
C détecteur de présence



D panneau photovoltaïque



DOC 2 Cellule photoélectrique



Constitution d'une cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique est constituée d'une anode et une cathode placées dans un tube vide ou rempli d'un gaz inerte. Elle est placée dans un circuit électrique. On exploite l'effet photoélectrique à la cathode, ce qui provoque un courant électrique dans le circuit. Le courant électrique augmente avec l'intensité du rayonnement. Les cellules photoélectriques sont souvent utilisées dans les dispositifs « tout ou rien » ou dans les capteurs de lumière.

DONNÉES

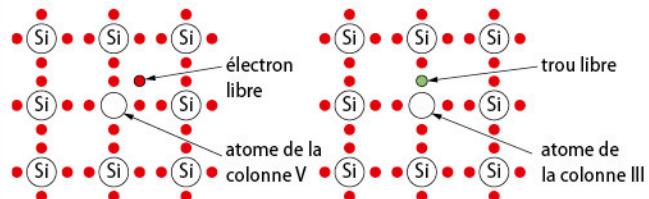
$$\begin{aligned} h &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \\ 1 \text{ eV} &= 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}. \end{aligned}$$

EXPLOITATION ET ANALYSE

- 1 a. Expliquer comment l'effet photoélectrique à la cathode peut provoquer un courant électrique dans le circuit comprenant la cellule photoélectrique.
b. Déterminer, en justifiant, le signe de l'anode et celui de la cathode.
- 2 Déterminer l'intervalle de longueurs d'onde des rayonnements qui peuvent provoquer un courant électrique dans la jonction PN en silicium.
- 3 Une jonction PN polarisée émet un rayonnement de longueur d'onde 560 nm. Calculer l'énergie d'un photon émis.

DOC 3 Jonction PN

Une jonction PN est la jonction d'un semi-conducteur dopé N (pour négatif) qui contient un excès d'électrons et un semi-conducteur dopé P (pour positif) présentant un déficit d'électrons qui est équivalent à la présence de « trous ». Si cette jonction reçoit une énergie supérieure à une énergie minimale elle engendre un courant électrique. Pour le silicium par exemple cette énergie est de 1,12 eV. Lorsqu'on impose une tension supérieure à une tension minimale aux bornes de la jonction, la recombinaison d'une paire électron-trou engendre l'émission d'un rayonnement. Les valeurs de l'énergie minimale et de la tension minimale dépendent des matériaux utilisés.



Exemple de jonction PN avec du silicium

SYNTHÈSE

En effectuant éventuellement une recherche documentaire :

- a. attribuer à chaque dispositif du doc. 1 le principe qu'il exploite parmi :
 - l'effet photoélectrique ;
 - l'absorption de photon par une jonction PN ;
 - l'émission de photon par une jonction PN.
- b. choisir un dispositif du doc. 1 et détailler son fonctionnement.

Je réussis si...

- Je sais expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
- Je sais analyser le fonctionnement de dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière.

3. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :

RÉA Mettre en œuvre un protocole expérimental

VAL Interpréter des mesures



Rendement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le rendement permet de quantifier cette conversion d'énergie.

DOC 1 Cellule photovoltaïque



Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui exploite les propriétés des semi-conducteurs pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Assemblées en panneau photovoltaïque, elles permettent de produire de l'électricité. Le rendement des panneaux n'est pas très élevé mais ils ont l'avantage d'exploiter le Soleil, une source d'énergie renouvelable, et sont très pratiques dans les lieux isolés.

DOC 3 Caractéristique d'une cellule

Pour construire la caractéristique $I = f(U)$ d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement E , avec I l'intensité du courant dans le circuit qui comprend la cellule et U la tension aux bornes de la cellule, on utilise le matériel suivant :

- une **cellule photovoltaïque** de surface S ;
- un **voltmètre** ;
- un **ampèremètre** ;
- un **luxmètre** qui mesure l'éclairement E reçu par une surface en lux de symbole I_x ;
- une **lampe de bureau** ;
- une **résistance** R variable de 0 à 100 $\text{k}\Omega$ qui, branchée en série avec la cellule, permet de faire varier I .

DOC 2 Matériel expérimental



DOC 4 Rendement

Le rendement η d'une cellule photovoltaïque en pourcentage se calcule ainsi :

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

avec η en % et P la puissance en watt.

La puissance électrique $P_{\text{électrique}}$ est la puissance électrique maximale obtenue.

La puissance lumineuse se calcule :

$P_{\text{lumineuse}} = E \cdot S$ avec E l'éclairement en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ et S la surface de la cellule en m^2 . On admettra qu'un éclairement de 100 lux (mesuré à l'aide d'un luxmètre) correspond à $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Tracé de la caractéristique

- Proposer le schéma du montage expérimental permettant de tracer la courbe $I = f(U)$ pour la cellule photovoltaïque éclairée par une source de lumière d'éclairement E .
- À l'aide d'un tableur-grapheur, tracer $I = f(U)$.

2 Détermination de la puissance électrique

- Calculer la puissance pour chaque couple de valeurs (I , U).
- À l'aide d'un tableur-grapheur, tracer $P = f(U)$.
- Déterminer la puissance électrique maximale $P_{\text{électrique}}$.

3 Détermination de la puissance lumineuse

- Mesurer l'éclairement E reçu par la cellule.
- Calculer la puissance lumineuse $P_{\text{lumineuse}}$ reçue par la cellule photovoltaïque.

SYNTHESE

Calculer le rendement de la cellule photovoltaïque et commenter le résultat obtenu.

Avoir un regard critique sur les incertitudes de mesures. **FICHE MÉTHODE** ➔ p. 538

Je réussis si...

- Je sais proposer un protocole expérimental pour tracer la caractéristique d'une cellule photovoltaïque.
- Je sais calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque à partir de la caractéristique.

1 Propriétés de l'effet photoélectrique

► Découverte de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est observé et présenté en 1839 par Antoine-César et Edmond Becquerel : ils détectent un courant électrique entre deux électrodes d'un même métal plongées dans une solution lorsque l'une des deux électrodes est éclairée par la lumière du Soleil. Cet effet a ensuite été étudié précisément en 1887 par Heinrich Hertz (1857-1894), physicien allemand, sans qu'il ne parvienne à interpréter toutes ses propriétés.

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons d'un matériau sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique (FIG. 1).

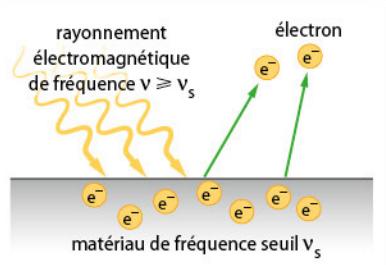


FIG. 1 Principe de l'effet photoélectrique.

► Propriétés

On constate expérimentalement que :

- l'émission d'électrons se produit à partir d'une fréquence limite appelée fréquence seuil qui dépend du matériau étudié mais pas de l'intensité du rayonnement ;
- le nombre d'électrons émis est proportionnel à l'intensité du rayonnement ;
- l'énergie cinétique de l'électron émis augmente avec la fréquence du rayonnement.

L'effet photoélectrique se produit à partir d'une **fréquence seuil**, notée v_s , quelle que soit l'intensité du rayonnement. La fréquence seuil dépend du matériau étudié (FIG. 2).

Remarque. On peut associer à chaque fréquence seuil une longueur d'onde seuil dans le vide en utilisant la relation $\lambda_s = c/v_s$, avec c la célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'effet photoélectrique se manifeste pour un rayonnement de longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde seuil.

EXEMPLE

La fréquence seuil du zinc vaut $v_s = 8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$ et la longueur d'onde dans le vide associée est $\lambda_s = 370 \text{ nm}$. Un rayonnement de fréquence supérieure à $8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$ et de longueur d'onde dans le vide inférieure à 370 nm provoque l'effet photoélectrique.

► Interprétation

Le modèle ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer l'existence d'une fréquence seuil et l'absence d'intensité lumineuse seuil.

Pour interpréter cela, Albert Einstein (1879-1955), physicien allemand, reprend en 1905 le modèle particulaire de la lumière abandonné à l'époque en faveur du modèle ondulatoire. Il l'associe à l'hypothèse de quantification de l'énergie émise par Max Planck (1858-1947) (FIG. 3).

Ainsi un rayonnement de fréquence v est un ensemble de photons, particules de masse nulle et de vitesse $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide, transportant chacun l'énergie $E = hv$. Si ce photon arrive sur un matériau de fréquence seuil v_s :

- si $E_{\text{photon}} < hv_s$, aucun électron n'est émis du matériau ;
- si $E_{\text{photon}} \geq hv_s$, des électrons sont émis même pour un seul photon.

L'effet photoélectrique ne peut être interprété qu'en utilisant le modèle particulaire de la lumière : la lumière est un ensemble de **photons** (FIG. 4) d'énergie $E = hv$ avec h la constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Si l'énergie des photons est supérieure ou égale à hv_s , la lumière ou le rayonnement électromagnétique extrait des électrons du matériau.

Matériau	v_s	λ_s
Césium	$4,62 \times 10^{14} \text{ Hz}$	650 nm
Potassium	$5,56 \times 10^{14} \text{ Hz}$	540 nm
Baryum	$6,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$	500 nm
Zinc	$8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$	370 nm
Cuivre	$1,03 \times 10^{14} \text{ Hz}$	290 nm

FIG. 2 Fréquences et longueurs d'onde seuil de différents matériaux.



FIG. 3 Albert Einstein reçoit la médaille Max Planck de ses mains le 28 juin 1929.

Nom : photon

Fonction : particule de lumière

Masse : $m = 0$ au repos

Charge : $q = 0 \text{ C}$

Énergie : $E = hv$

Vitesse : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide

FIG. 4 Caractéristiques du photon

2 Aspect énergétique

► Travail d'extraction

L'effet photoélectrique se produit pour une fréquence seuil qui dépend du matériau. D'un point de vue énergétique, cela se traduit par l'existence d'un travail d'extraction de l'électron. Il est nécessaire de fournir une énergie minimale à un matériau pour en extraire un électron. Plus le travail d'extraction est important et plus l'électron est lié au matériau.

Le **travail d'extraction** est l'énergie minimale à fournir à un matériau pour en extraire un électron. Son symbole est W et son unité est le joule de symbole J.

On a la relation :

$$W = h\nu_S$$

travail d'extraction (en J) fréquence seuil (en Hz)
 constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Le travail d'extraction dépend du matériau étudié.

Remarque. Les valeurs du travail d'extraction étant faibles, on utilise couramment comme unité l'électron-volt de symbole eV avec la conversion $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

EXEMPLE

La fréquence seuil du zinc vaut $\nu_S = 8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$. Le travail d'extraction pour le zinc se calcule : $W = h \cdot \nu_S = 6,63 \times 10^{-34} \times 8,11 \times 10^{14} = 5,38 \times 10^{-19} \text{ J} = 5,38 \times 10^{-19} / (1,602 \times 10^{-19}) = 3,36 \text{ eV}$. Si un photon possède une énergie supérieure ou égale à 3,36 eV, il peut extraire un électron du zinc.

► Énergie cinétique de l'électron

Soit un rayonnement de fréquence ν qui éclaire un matériau de fréquence seuil ν_S tel que $\nu > \nu_S$. L'énergie du photon $E_{\text{photon}} = h\nu$ est supérieure au travail d'extraction $W = h\nu_S$. Un électron est donc extrait du matériau et possède une énergie cinétique E_c correspondant à l'énergie excédentaire. En effet la conservation de l'énergie implique :

$E_{\text{photon}} = W + E_c$ et $E_c = E_{\text{photon}} - W = h\nu - h\nu_S = h(\nu - \nu_S)$. L'énergie cinétique de l'électron augmente donc linéairement avec la fréquence du rayonnement.

Si un photon de fréquence ν extrait un électron d'un matériau de fréquence seuil ν_S telle que $\nu > \nu_S$, l'électron possède une **énergie cinétique** E_c telle que :

$$E_c = E_{\text{photon}} - W = h\nu - h\nu_S = h(\nu - \nu_S)$$

énergie du photon (en J) travail d'extraction (en J) fréquence (en Hz)
 énergie cinétique de l'électron (en J) constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ fréquence seuil (en Hz)

Remarque. On peut également calculer la vitesse de l'électron avec la relation

$$E_c = \frac{1}{2} m_e v^2 \text{ donc } v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}$$

avec m_e la masse de l'électron telle que $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

EXEMPLE

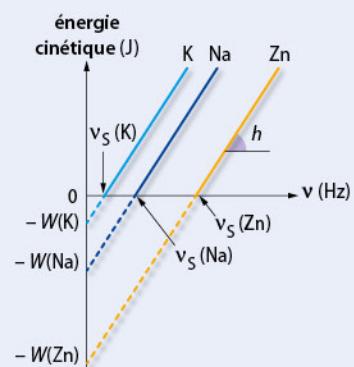
Un rayonnement de fréquence $\nu = 10,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ éclaire le zinc de travail d'extraction $W = 5,38 \times 10^{-19} \text{ J}$. L'énergie cinétique de l'électron extrait se calcule :

$$E_c = E_{\text{photon}} - W = h\nu - W = 10,0 \times 10^{14} \times 6,63 \times 10^{-34} - 5,38 \times 10^{-19} = 1,25 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{La vitesse de l'électron se calcule : } v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = 5,24 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

UN PONT VERS LES MATHS

Le tracé de l'**énergie cinétique** de l'électron en fonction de la fréquence du rayonnement est une droite de coefficient directeur h , qui coupe l'axe des abscisses en ν_S et a pour ordonnée à l'origine $-W$.



3 Applications de l'interaction photon-matière

► Cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique est constituée de deux électrodes : la cathode et l'anode enfermées dans un tube vide ou rempli d'un gaz inertes (FIG. 5). Lorsque la cellule est reliée à un circuit électrique comprenant une source de tension et que la cathode est éclairée par un rayonnement de fréquence supérieure à sa fréquence seuil, elle émet des électrons qui sont collectés à l'anode. Le courant électrique obtenu augmente avec le nombre de photons reçus donc avec l'intensité de la source de rayonnement.

Les cellules photoélectriques permettent ainsi de convertir un signal lumineux en signal électrique et sont utilisées :

- pour mesurer l'intensité lumineuse dans les luxmètres, les spectrophotomètres et les spectromètres (UV-visible, IR) ;
- dans des dispositifs contrôlés par la lumière : interrupteurs crépusculaires, contrôle de présence d'un objet par un faisceau lumineux, etc.

Une **cellule photoélectrique** est un dispositif qui engendre un courant électrique sous l'effet de la lumière. Ces cellules sont utilisées pour mesurer l'intensité lumineuse d'une source et comme capteur de lumière.

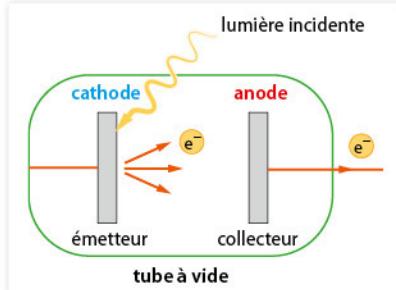


FIG. 5 Principe d'une cellule photoélectrique

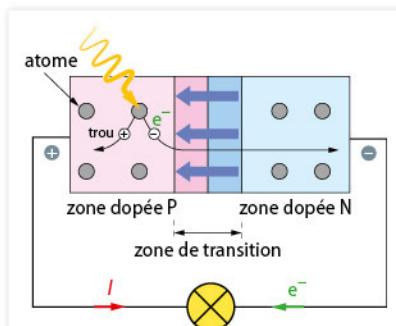


FIG. 6 Principe d'une cellule photovoltaïque

► Utilisation des semi-conducteurs

L'utilisation de matériaux semi-conducteurs en jonction PN (FIG. 6) et l'exploitation de l'effet photoélectrique a permis la mise au point de nombreux dispositifs comme les cellules photovoltaïques et des diodes électroluminescentes (DEL). Dans les deux cas, les niveaux d'énergie des matériaux sont représentés par des bandes d'énergie (FIG. 7).

Si l'énergie d'un photon est supérieure à une énergie appelée « énergie du gap » un électron est extrait ce qui engendre un courant électrique. C'est ainsi que les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque mesure l'efficacité de la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique. Il dépend de la technologie et se situe actuellement entre 5 et 18 %.

Une **cellule photovoltaïque** est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique et est utilisée pour la production d'électricité. Le rendement η d'une cellule photovoltaïque se calcule :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} \times 100 = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

$$\text{ou } \eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

avec η en %, E l'énergie en J et P la puissance en W.

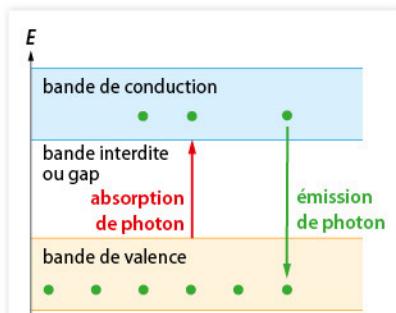


FIG. 7 Bandes d'énergie dans les matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques et les DEL. L'absorption de photons est exploitée dans les cellules photovoltaïques, l'émission dans les diodes électroluminescentes.

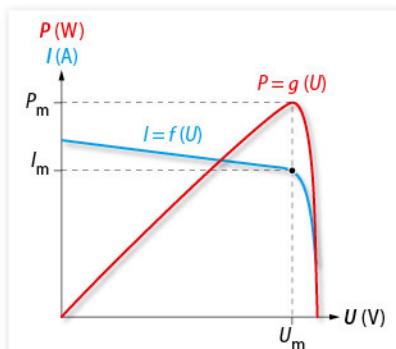
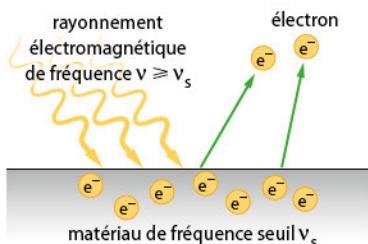


FIG. 8 Détermination de la puissance électrique maximale d'une cellule photovoltaïque.

1 Propriétés de l'effet photoélectrique

Principe de l'effet photoélectrique



L'effet photoélectrique dépend de la **fréquence seuil v_s** .

L'énergie cinétique de l'électron dépend la fréquence.

Interprétation en 1905 par Einstein qui utilise la notion de photon

Nom : photon

Fonction : particule de lumière

Masse : $m = 0$ au repos

Charge : $q = 0$ C

Énergie : $E = hv$

Vitesse : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide

2 Aspect énergétique

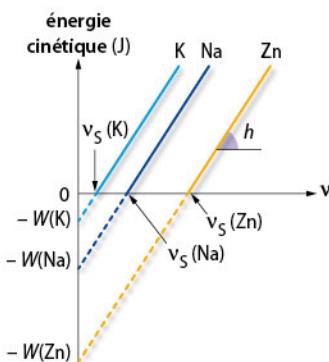
Travail d'extraction d'un électron

$$\text{travail d'extraction (J)} \rightarrow W = h v_s \quad \begin{matrix} \text{fréquence (Hz)} \\ \text{constante de Planck } h = 6,63 \times 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s}) \end{matrix}$$

Conservation de l'énergie

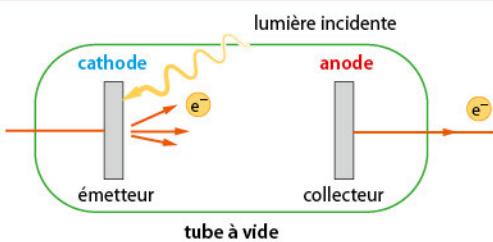
$$\begin{matrix} \text{énergie du photon (J)} & \text{travail d'extraction (J)} & \text{fréquence (Hz)} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \text{énergie cinétique de l'électron (J)} & \rightarrow E_c = E_{\text{photon}} - W = h v - h v_s = h(v - v_s) & \text{constante de Planck } h = 6,63 \times 10^{-34} (\text{J} \cdot \text{s}) \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \text{fréquence seuil (Hz)} & & \end{matrix}$$

Tracé de l'énergie cinétique de l'électron en fonction de la fréquence

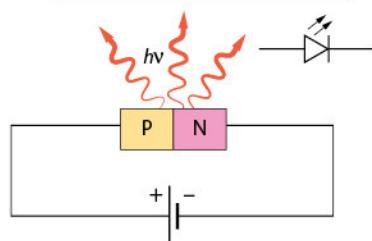


3 Applications de l'interaction photon-matière

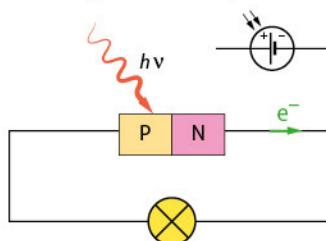
Cellule photoélectrique



DEL (diode électroluminescente)



Cellule photovoltaïque

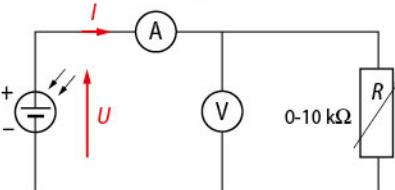


Rendement d'une cellule photovoltaïque

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} \times 100 = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

Mesure de $P_{\text{électrique}}$



EXERCICES

Vérifier l'essentiel EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➔ **SOLUTIONS EN PAGE 593**



DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

1 Propriétés de l'effet photoélectrique

	A	B	C
1 L'effet photoélectrique s'explique par :	l'aspect particulaire de la lumière.	l'aspect ondulatoire de la lumière.	la dualité onde-particule de la lumière.
2 L'effet photoélectrique se produit :	en dessous d'une fréquence seuil.	au-dessus d'une fréquence seuil.	pour n'importe quelle fréquence.
3 Le cobalt a une fréquence seuil de $1,2 \times 10^{15} \text{ Hz}$. L'effet photoélectrique se produit :	pour une longueur d'onde dans le vide supérieure à 250 nm.	pour une longueur d'onde dans le vide inférieure à 250 nm.	pour une longueur d'onde dans le vide égale à 250 nm.

2 Aspect énergétique

	A	B	C
4 Le travail d'extraction est l'énergie :	à fournir pour extraire un photon.	à fournir pour extraire un électron.	libérée lors de l'extraction d'un électron.
5 Le cobalt a une fréquence seuil de $1,2 \times 10^{15} \text{ Hz}$. Le travail d'extraction vaut :	$8,0 \times 10^{-19} \text{ J}$.	$5,5 \times 10^{-49} \text{ J}$.	$1,7 \times 10^{-40} \text{ J}$.
6 La conservation de l'énergie dans le cas de l'effet photoélectrique s'écrit :	$h\nu = E_c \text{ électron} + W$	$h\nu = E_c \text{ électron} + h\nu_s$	$h\nu = E_c \text{ électron} - W$

3 Applications de l'interaction photon-matière

	A	B	C
7 Le(s) dispositif(s) qui exploite(nt) l'effet photoélectrique est (sont) :	la résistance.	le luxmètre.	le spectrophotomètre.
8 Le rendement d'une cellule photovoltaïque se calcule :	$\eta = \frac{P_{\text{lumineuse}}}{P_{\text{électrique}}} \times 100$	$\eta = \frac{E_{\text{lumineuse}}}{E_{\text{électrique}}} \times 100$	$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$
9 Pour mesurer la puissance électrique maximale fournie par une cellule photovoltaïque, on réalise le montage :			

EXERCICES

Acquérir les bases

1 Propriétés de l'effet photoélectrique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du **BAC**

Effet photoélectrique

- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.

→ Acquérir les bases : 10

DONNÉES

► Célérité de la lumière dans le vide :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

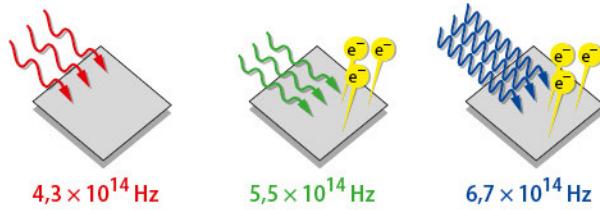
; constante de Planck :

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

► $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$; $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

10 Schéma

On trouve le schéma suivant sur un site internet traitant de l'effet photoélectrique.



1. Pourquoi s'agit-il bien d'effet photoélectrique sur ce schéma ?

- Définir ce qu'est la fréquence seuil.
- Quelle information sur la fréquence seuil du matériau étudié peut-on extraire de ce document ?

11 Vrai ou faux

Dire si les affirmations suivantes sont vraies ou fausses.

- L'effet photoélectrique se produit à partir d'une certaine fréquence.
- L'effet photoélectrique se produit à partir d'une certaine intensité lumineuse.
- L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon et un électron.
- Le modèle ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer l'effet photoélectrique.

12 Photon

Recopier et compléter la « carte d'identité » du photon ci-dessous.

Nom :

Définition :

Masse :

Expression de l'énergie :

Vitesse dans le vide :

Preuve expérimentale d'existence :

13 Onde ou particule

Attribuer à chaque affirmation suivante le modèle physique de la lumière utilisé.

- À partir d'une certaine intensité du rayonnement incident, l'électron du matériau possède suffisamment d'énergie pour s'en extraire.
- Plus l'intensité lumineuse est importante, plus il y a de photons donc plus il y a d'électrons extraits.
- Un seul photon suffit pour extraire un électron si sa fréquence est suffisante.
- L'énergie cinétique des électrons extraits est d'autant plus importante que l'intensité du rayonnement qui l'extract est importante.

14 Électron ou non

Le schéma suivant indique les longueurs d'onde seuil de différents matériaux.

UV	650 nm	Cs
UV	540 nm	K
UV	500 nm	Ba
UV	370 nm	Zn

On éclaire ces matériaux avec les rayonnements suivants :

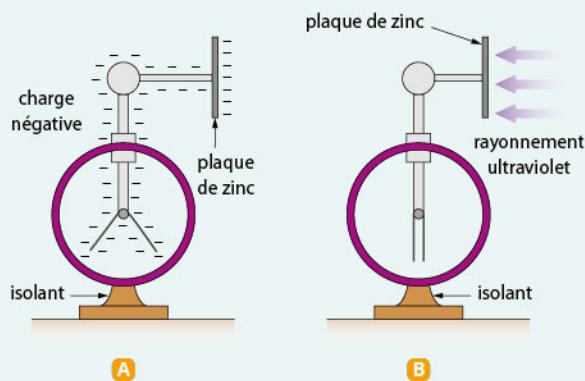
- un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 500 \text{ nm}$;
- un rayonnement de fréquence $v = 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$;
- un rayonnement ultraviolet.

Pour chaque rayonnement, indiquer sur quel(s) matériau(x) un effet photoélectrique se produit.

15 Expérience d'Hallwachs

HISTOIRE DES SCIENCES

En 1888, Wilhelm Hallwachs (1859-1922), physicien allemand et collaborateur de Heinrich Hertz, réalise l'expérience schématisée ci-dessous.



Donnée : $\lambda_s(\text{Zn}) = 0,37 \mu\text{m}$.

- Donner la définition de l'effet photoélectrique.
 - Expliquer en quoi cette expérience est une démonstration de l'effet photoélectrique.
 - Observera-t-on un effet photoélectrique :
 - pour un rayonnement visible ?
 - si le dispositif est chargé positivement ?
- Justifier les réponses en utilisant la donnée.

2 Aspect énergétique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Définir le travail d'extraction.
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons émis et la fréquence du rayonnement incident.

→ Acquérir les bases : 17 → S'entraîner : 26 27

16 Travail d'extraction

Soient les matériaux de seuils photoélectriques suivants.

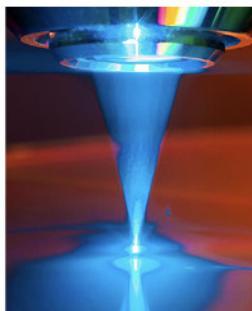
Matériau	Fréquence seuil	Longueur d'onde seuil	Travail d'extraction
Argent (Ag)		0,27 μm	
Platine (Pt)	$4,5 \times 10^{14}$ Hz		
Césium (Cs)		0,19 μm	
Calcium (Ca)	$6,7 \times 10^{14}$ Hz		

- a. Rappeler la définition, le symbole et l'unité du travail d'extraction.
- b. Donner la relation entre le travail d'extraction et la fréquence seuil.
- c. En déduire la relation entre le travail d'extraction et la longueur d'onde seuil.
2. Recopier et compléter le tableau ci-dessus.
3. Recopier et compléter les phrases suivantes.
 - Plus la longueur d'onde seuil... et plus le travail d'extraction...
 - Plus la fréquence seuil... et plus le travail d'extraction...

17 Laser bleu

Un laser bleu de longueur d'onde $\lambda = 450$ nm extrait un électron d'une électrode en césium de travail d'extraction 1,95 eV.

1. Calculer l'énergie cinétique de l'électron en J puis en eV.
2. Calculer la vitesse d'expulsion de l'électron.



18 Potassium

Soit un échantillon de potassium de travail d'extraction $W = 2,29$ eV. Il est éclairé par un rayonnement de fréquence $v = 6,0 \times 10^{14}$ Hz.

- a. Rappeler la relation entre le travail d'extraction, la fréquence du rayonnement et l'énergie cinétique de l'électron émis.
- b. Quel principe utilise-t-on pour établir cette relation ?
2. a. Calculer l'énergie cinétique de l'électron.
- b. En déduire la vitesse de l'électron.

19 Énergie cinétique

Un rayonnement de fréquence v extrait un électron d'un matériau de fréquence seuil v_s . L'électron est éjecté avec une vitesse v .

1. Comparer v et v_s dans cette situation.

2. a. Donner la relation entre l'énergie du photon incident E_p , l'énergie cinétique de l'électron E_c et le travail d'extraction du matériau W en précisant la loi de conservation utilisée.

- b. Exprimer alors E_c en fonction de v et v_s .
- c. Représenter l'allure de la courbe $E_c = f(v)$.
- d. Justifier que l'énergie cinétique de l'électron augmente linéairement avec la fréquence du rayonnement incident.

3 Applications de l'interaction photon-matière

EN AUTONOME

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Interaction photon-matière

- Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
- Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière

→ Acquérir les bases : 21

Rendement d'une cellule photovoltaïque

- Définir le rendement d'une cellule photovoltaïque
- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque

→ Acquérir les bases : 20 → S'entraîner : 28 29

20 Rendement

Un panneau photovoltaïque a un rendement de 11 %. Il reçoit un rayonnement de 900 W.

1. Représenter la conversion d'énergie qui a lieu dans un panneau photovoltaïque.
2. Rappeler la définition du rendement.
3. Calculer la puissance électrique produite.

21 Cellule photoélectrique

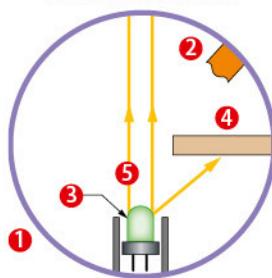
Une cellule photoélectrique est constituée de deux électrodes : une anode et une cathode placées face à face dans une ampoule vide ou contenant un gaz inerte de basse pression. On éclaire la cathode avec un rayonnement de fréquence supérieure à sa fréquence seuil. Un courant électrique parcourt alors le circuit dans lequel elle se situe.

1. Faire un schéma de la cellule photoélectrique.
2. Expliquer comment le courant est créé à partir de l'éclairage de la cathode.
3. Préciser le signe de la cathode et le signe de l'anode.
4. Citer un exemple de dispositif qui exploite une cellule photoélectrique.

22 DéTECTEUR DE fumée

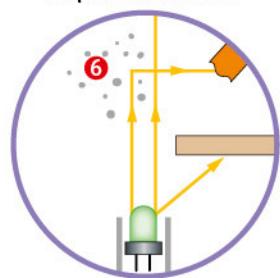
Le principe d'un détecteur de fumée est schématisé ainsi.

En l'absence de fumée



1 : chambre optique
2 : capteur de lumière
3 : DEL
4 : cache opaque

En présence de fumée



5 : rayon de lumière
6 : particules de fumée

EXERCICES

1. a. Quel composant utilise l'effet photoélectrique ? Justifier.
- b. Quel composant utilise l'effet électroluminescent ?
2. a. Dans quel composant y a-t-il absorption de photon ?
b. Dans quel composant y a-t-il émission de photon ?
3. Résumer le principe du détecteur de fumée.

23 Étude d'une cellule

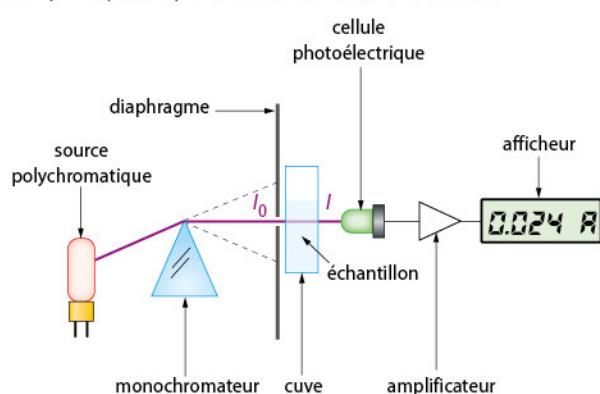
Lors d'une séance de TP, on éclaire une cellule photovoltaïque de longueur 5 cm et de largeur 4 cm avec une lampe de bureau placée à 10 cm de la cellule. La cellule reçoit un éclairage de 7 000 lx. On mesure $I = 0,18 \text{ A}$ et $U = 0,10 \text{ V}$ pour la puissance électrique maximale.

Données : on admettra que $100 \text{ lx} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; on a la relation $P_{\text{lumineuse}} = E \cdot S$ avec E l'éclairage en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ et S la surface de la cellule en m^2 .

1. Calculer la puissance lumineuse reçue.
2. Calculer la puissance électrique maximale.
3. a. Calculer le rendement de la cellule.
b. Commenter le résultat obtenu.

24 Spectrophotomètre

Un spectrophotomètre est utilisé pour mesurer l'absorbance dans le domaine du visible d'une solution colorée. Son principe simplifié est schématisé ci-dessous.



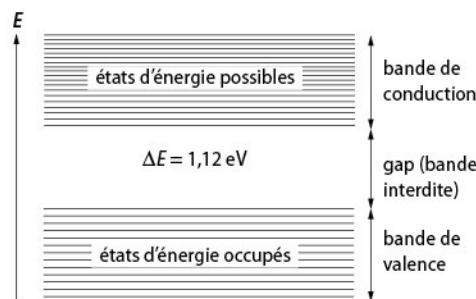
Données : domaine du visible.



1. Quel élément convertit l'intensité lumineuse en électricité ?
2. Quel effet est exploité dans ce dispositif ?
3. Quelle condition doit respecter la longueur d'onde seuil de la cathode de la cellule ? Recopier en justifiant la réponse correcte parmi les réponses proposées ci-dessous :
a. $\lambda_S \leq 400 \text{ nm}$ b. $\lambda_S \leq 800 \text{ nm}$ c. $\lambda_S \geq 400 \text{ nm}$

25 Le silicium

Le silicium est un semi-conducteur qui est exploité pour construire les diodes électroluminescentes et les cellules photovoltaïques. C'est un matériau qui devient conducteur lorsqu'on lui apporte une énergie supérieure à celle de la bande interdite appelée aussi « gap ». Cette énergie peut par exemple être apportée par un photon.



1. Quelle(s) analogie(s) peut-on faire entre ce principe et l'effet photoélectrique ?
2. Calculer les domaines de fréquence et de longueur d'onde des photons qui permettent de rendre le silicium conducteur.
3. Parmi les deux composants cités, lequel :
a. convertit l'énergie électrique en énergie lumineuse ?
b. convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique ?

Faire le point avant d'aller plus loin

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

PRÉPA
BAC

Expliquer pourquoi l'effet photoélectrique ne s'explique qu'avec la notion de photon.

Citer deux dispositifs qui exploitent l'interaction photon-matière.

Définir l'effet photoélectrique et la fréquence seuil.

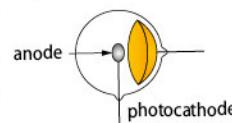
Définir le travail d'extraction, donner son symbole et son unité.

Donner la relation qui permet de calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque en explicitant chaque grandeur et son unité.

Représenter le schéma du circuit électrique et décrire le protocole permettant de déterminer la puissance électrique maximale que peut fournir une cellule photovoltaïque éclairée par une source de lumière de puissance P_{lum} .

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

Expliquer le fonctionnement de la cellule photoélectrique représentée ci-dessous.



Donner deux caractéristiques de l'effet photoélectrique.

Retrouver ces questions en version numérique

bordas
Flash PAGE
cartes mémos

Exercice résolu

EN AUTONOMIE

26 Or électrique

L'effet photoélectrique se produit pour une fréquence seuil qui dépend du matériau. D'un point de vue énergétique, cela se traduit par l'existence d'un travail d'extraction de l'électron : l'énergie minimale à fournir à un matériau pour en extraire un électron. Le travail d'extraction pour l'or est de 5,10 eV.

Données : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$;
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$;
 $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.



1. Pour chaque rayonnement suivant, dire en **justifiant**

s'il y a un effet photoélectrique :

- rayonnement ① : $\lambda_1 = 300 \text{ nm}$
- rayonnement ② : $v_2 = 1,00 \times 10^{15} \text{ Hz}$
- rayonnement ③ : $v_3 = 5,00 \times 10^{15} \text{ Hz}$

2. **Calculer** alors l'énergie cinétique et la vitesse de l'électron émis.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. L'effet photoélectrique se produit pour un photon d'une fréquence supérieure à la fréquence seuil v_S . On a la relation $W = hv_S$ avec h la constante de Planck, W le travail d'extraction.

On a donc $v_S = W/h = (5,10 \times 1,602 \times 10^{-19}) / (6,63 \times 10^{-34}) = 1,23 \times 10^{15} \text{ Hz}$.

On a aussi la relation $\lambda_S = c/v_S = 3,00 \times 10^8 / (1,23 \times 10^{15}) = 2,44 \times 10^{-7} \text{ m}$
 $= 244 \times 10^{-9} \text{ m} = 244 \text{ nm}$.

Si $v \geq v_S$ et $\lambda \leq \lambda_S$, l'électron est extrait.

Seul le rayonnement ③ peut extraire des électrons.

2. La conservation de l'énergie dans le cas de l'extraction d'un électron d'un matériau de travail W par un photon de fréquence v s'exprime :

$$E_{\text{photon}} = W + E_c$$

$$E_c = E_{\text{photon}} - W = hv - hv_S = h(v - v_S)$$

$$\text{AN : } E_c = 6,63 \times 10^{-34} \times (5,00 \times 10^{15} - 1,23 \times 10^{15}) = 2,50 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Pour le calcul de la vitesse de l'électron, on a $E_c = \frac{1}{2} m_e v^2$

$$v^2 = \frac{2E_c}{m_e} \quad \text{et} \quad v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}$$

$$\text{AN : } v = \sqrt{2 \times 2,50 \times 10^{-18} / (9,11 \times 10^{-31})} = 2,34 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

► Ce ne sont pas les mêmes grandeurs qui caractérisent les rayonnements : le premier est caractérisé par une longueur d'onde, les deux autres par la fréquence.

LES VERBES D'ACTION

► **Justifier**: trouver les calculs ou les arguments qui démontrent la réponse.

► **Calculer**: appliquer une formule mathématique.

QUELQUES CONSEILS

1. Convertir les eV en J.

2. Appliquer la conservation de l'énergie du photon.

EXERCICE SIMILAIRE

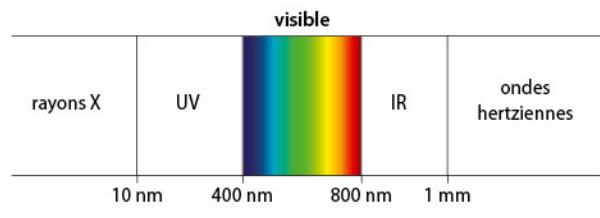
27 Zinc électrique

On éclaire une plaque de zinc avec une lampe à vapeur de mercure dont les principales raies d'émission ont les longueurs d'onde suivantes : 302 nm ; 313 nm ; 365 nm ; 405 nm ; 436 nm ; 546 nm ; 578 nm.

Données : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;
 $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$; $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $W(\text{Zn}) = 3,36 \text{ eV}$.

1. Rappeler la définition de l'effet photoélectrique.
2. Montrer qu'il y a émission d'un électron uniquement pour les longueurs d'onde du domaine des ultraviolets.
3. Calculer l'énergie cinétique de l'électron extrait par un photon de longueur d'onde 302 nm.

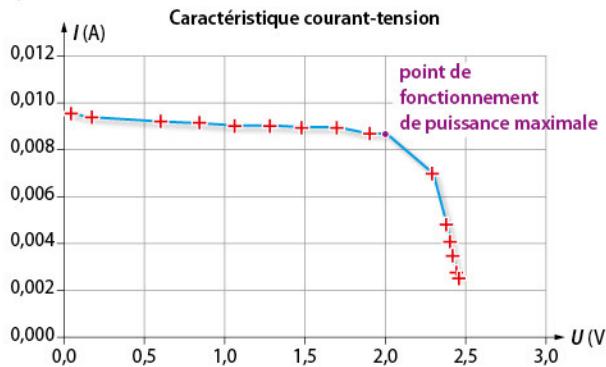
Données : domaines d'ondes électromagnétiques



Exercice résolu EN AUTONOMIE

28 Étude d'une cellule photovoltaïque

Lors d'une séance de travaux pratiques, on éclaire une cellule photovoltaïque de surface 45 cm^2 avec une source lumineuse d'éclairement $85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. On mesure la tension aux bornes de la cellule pour différentes valeurs de l'intensité du courant électrique I . On trace la courbe suivante et on détermine le point de fonctionnement de puissance maximale.



Données : On a la relation $P_{\text{lumineuse}} = E \cdot S$ avec $P_{\text{lumineuse}}$ la puissance lumineuse émise en W , E l'éclairement en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ et S la surface de la cellule en m^2 .

1. **Expliquer** comment on fait pour déterminer expérimentalement le point de fonctionnement de puissance maximale.

2. **Calculer** le rendement de la cellule photovoltaïque étudiée en pourcentage.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

On donne l'éclairement E et la surface S et la formule reliant puissance, éclairement et surface.

Le point correspondant à la puissance électrique maximale est indiqué sur la caractéristique.

LES VERBES D'ACTION

Expliquer : détailler les différentes étapes à suivre.

Calculer : appliquer une formule mathématique.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. On calcule pour chaque valeur $P = U \cdot I$, puis on trace $P = f(U)$ et on détermine, pour la valeur maximale de P , la valeur U_m . On reporte alors la valeur de U_m sur la courbe pour trouver le **point de fonctionnement de puissance maximale**.

$$2. \eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

On lit pour le point de fonctionnement maximal :

$$U_m = 2,0 \text{ V} \text{ et } I_m = 0,0083 \text{ A} \text{ donc } P_{\text{électrique}} = U_m \cdot I_m$$

$$\text{AN : } P_{\text{électrique}} = 2,0 \times 0,0083 = 0,017 \text{ W.}$$

$$P_{\text{lumineuse}} = E \cdot S. \text{ AN : } P_{\text{lumineuse}} = 85 \times 45 \times (10^{-2})^2 = 0,38 \text{ W.}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100 = \frac{0,017}{0,38} \times 100 = 4,5 \%$$

QUELQUES CONSEILS

2. Déterminer les coordonnées du point de fonctionnement maximal pour calculer la puissance électrique maximale.

EXERCICE SIMILAIRE

29 Caractéristiques d'un module

Un fabricant fournit les données suivantes pour un module photovoltaïque en silicium monocristallin de surface $S = 0,25 \text{ m}^2$ utilisé pour l'habitat :

Pour une irradiance solaire standard de $1\ 000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:
Puissance maximale (P_m) : 5 W .

On souhaite tracer la courbe $I = f(U)$ et $P = g(U)$ pour cette cellule photovoltaïque. On obtient les mesures suivantes pour une lampe d'éclairement $97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$U (\text{V})$	20,8	19,9	18,8	17,5	15,8	13,5	7,5	4,4	0,061
$I (\text{mA})$	0,0	45,5	84,1	116	150	173	200	210	224

- Représenter le schéma du montage à réaliser pour obtenir ces mesures.
- Sur une feuille de papier millimétré ou à l'aide d'un logiciel tableur-grapheur, tracer la caractéristique $I = f(U)$.
- a. Déterminer, en expliquant la démarche, la puissance électrique maximale $P_{\text{électrique}}$.
b. Calculer le rendement.
c. Commenter le résultat obtenu.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

30 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

On éclaire une plaque d'argent avec un rayonnement de fréquence v variable. On relève pour chaque valeur l'énergie cinétique de l'électron émis. Le tableau ci-dessous présente les mesures obtenues.

Fréquence ($\times 10^{14}$ Hz)	1,0	5,0	10	20	40	80	100	150	200
E_c (eV)	x	x	0	4,0	12,3	28,8	37,0	57,8	78,5

- Expliquer pourquoi certaines valeurs d'énergie cinétique ne sont pas indiquées.
- a. Tracer $E_c = f(v)$.
- Commenter la courbe obtenue.
- Determiner, en justifiant, le travail d'extraction de l'argent.

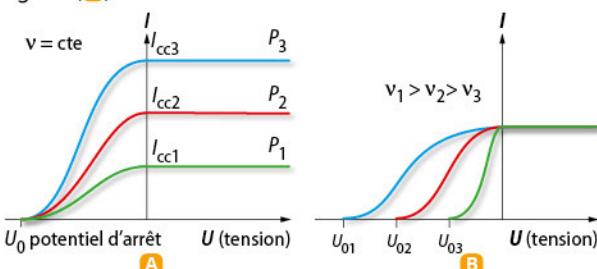
DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$; $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

31 Caractéristique d'une cellule photoélectrique

On réalise le montage ci-contre pour tracer la caractéristique d'une cellule photoélectrique.

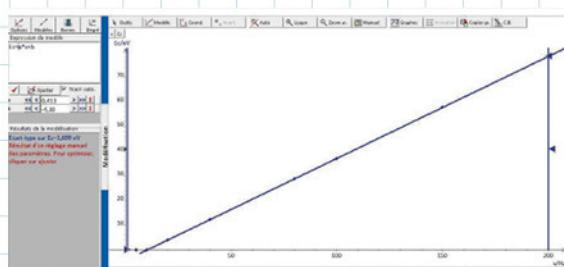
La tension d'arrêt notée U_0 est la tension qu'il faut appliquer entre l'anode et la cathode pour stopper les électrons émis par la cathode. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, on obtient la relation $E_c = -eU_0$ avec E_c , l'énergie cinétique de l'électron et e , la charge de l'électron. On trace la caractéristique de la cellule photoélectrique pour trois rayonnements de même fréquence mais de puissances différentes telles que $P_2 = 2P_1$ et $P_3 = 3P_1$ (A) puis pour trois rayonnements de fréquences v_1 , v_2 et v_3 telles que $v_2 = 2v_3$ et $v_1 = 3v_3$ de puissance P égales (B).



Solution proposée par un élève

1. Il n'y a pas d'énergie cinétique car la vitesse de l'électron est nulle.) Il n'y a surtout pas d'électron émis.

2. a.



b. On obtient une droite.) Préciser.

3. On lit sur la courbe $W = -4,30 \text{ eV}$.) Le travail d'extraction n'est pas négatif.

1. Montrer que l'énergie cinétique du photon est ici proportionnelle à la fréquence du rayonnement.

2. Montrer que l'intensité du courant de saturation I_{cc} est proportionnelle à la puissance de la source.

3. Expliquer en quoi ces résultats ne sont pas compatibles avec le modèle ondulatoire de la lumière.

32 Matériau mystère

DÉMARCHE DIFFÉRENCIÉE

Un matériau de nature inconnue éjecte un électron avec une énergie de $1,0 \times 10^{-19} \text{ J}$ sous l'effet d'un photon de fréquence $v = 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$.



Données : longueur d'onde seuil de différents matériaux.

UV	650 nm	Cs
UV	540 nm	K
UV	500 nm	Ba
UV	370 nm	Zn
UV	290 nm	Cu

DÉMARCHE EXPERTE

Déterminer à l'aide des données la nature du matériau.

EXERCICES

DÉMARCHE AVANCÉE

- Exprimer le travail d'extraction en fonction de l'énergie cinétique de l'électron et l'énergie du photon incident puis calculer sa valeur.
- Exprimer la longueur d'onde seuil en fonction du travail d'extraction et calculer sa valeur.

33 Nobel prize

Excerpt from the speech of S. Arrhenius at the Nobel Prize in Physics awarded to Albert Einstein in 1921.

"Your Majesty, Your Royal Highnesses, Ladies and Gentlemen. The studies for which Einstein has received the Nobel Prize, falls within the domain of the quantum theory founded by Planck in 1900. This theory asserts that radiant energy consists of individual particles, termed "quanta", approximately in the same way as matter is made up of particles, i.e. atoms. This remarkable theory, for which Planck received the Nobel Prize for Physics in 1918, suffered from a variety of drawbacks and about the middle of the first decade of this century it reached a kind of impasse. Then Einstein came forward with his work on specific heat and the photoelectric effect.

(...) The most extraordinary aspect of this effect was that the electron emission velocity is independent of the intensity of the illuminating light, which is proportional only to the number of electrons, whereas the velocity increases with the frequency of the light.

(...) [In Einstein's interpretation] when a quantum of light falls on a metal plate it can at most yield the whole of its energy to an electron there. A part of this energy is consumed in carrying the electron out into the air, the remainder stays with the electron as kinetic energy. This applies to an electron in the surface layer of the metal. Only if the quantum contains sufficient energy for the electron to perform the work of detaching itself from the metal does the electron move out into the air. Consequently, only light having a frequency greater than a certain limit is capable of inducing a photoelectric effect, however high the intensity of the irradiating light. If this limit is exceeded the effect is proportional to the light intensity at constant frequency."

- Pour quels travaux Albert Einstein a-t-il reçu le prix Nobel de physique ?
- Expliquer l'importance historique de ces travaux.
- Relever les caractéristiques de l'effet photoélectrique citées dans le texte.
- Comment appelle-t-on maintenant le "quanta" d'énergie ?
- Donner ses caractéristiques.
- Citer deux applications de l'effet photoélectrique.

34 Rendement et éclairement

On réalise les mesures ci-dessous pour un panneau photovoltaïque de surface $S = 1,50 \text{ m}^2$.

Pour un éclairement $E = 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$I(\text{A})$	4,6	4,5	4,6	4,5	4,6	4,6	4,6	4,1	3,8	3,0	2,0	1,0	0
$U(\text{V})$	0	5,0	7,0	10	15	20	22	25	28	30	33	35	36

Pour un éclairement de $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$I(\text{A})$	6,0	6,1	6,0	6,0	6,1	6,0	6,0	5,7	5,5	4,2	3,0	2,0	0
$U(\text{V})$	0	5,0	7,0	10	15	20	22	25	28	30	33	35	36

Donnée : Incertitude sur le rendement

$$u(\eta) = \eta \times \sqrt{\frac{u(P_m)^2}{P_m^2} + \frac{u(E)^2}{E^2} + \frac{u(S)^2}{S^2}} \text{ où } P_m \text{ est la puissance maximale, } u(P_m) = 1 \text{ W; } u(S) = 0,05 \text{ m}^2; u(E) = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

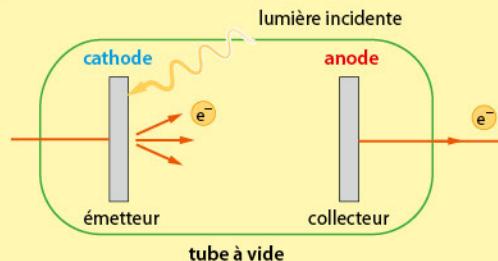
- À l'aide d'un tableur-grapheur, tracer pour chaque éclairement $I = f(U)$.
- Calculer P puis tracer $P = g(U)$ pour chaque éclairement.
- Déterminer le rendement du panneau pour chaque éclairement.
- Évaluer l'incertitude sur le rendement.
- L'éclairement a-t-il une influence sur le rendement du panneau photovoltaïque ?



À L'ORAL

35 Cellule photoélectrique et application

Élaborer un exposé oral de quelques minutes présentant le principe* de fonctionnement d'une cellule photoélectrique dont le schéma est représenté ci-dessous.



*le principe de deux dispositifs qui l'exploitent comme par exemple le luxmètre, le spectromètre, le spectrophotomètre, le photomultiplicateur, etc.

Les mots-clés à utiliser

- cathode
- anode
- électrons
- courant électrique
- fréquence seuil
- intensité lumineuse
- photon

36 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Les panneaux photovoltaïques produisent de l'électricité à partir de la lumière du Soleil.

Préparer un exposé oral qui explique :

- en quoi les travaux sur l'effet photoélectrique ont ouvert la voie à la physique quantique ;
- le principe de 2 dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière.



Développer ses compétences

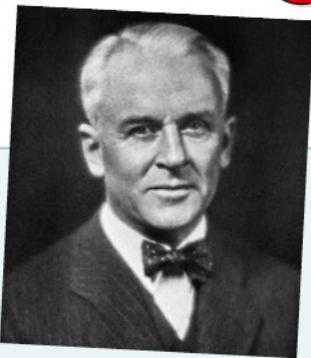
37 Expérience de Millikan

RÉSOLUTION DE PROBLÈME



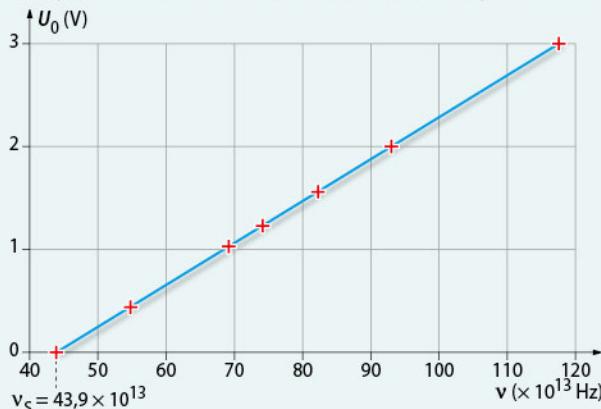
COM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

Robert Millikan (1868-1953), scientifique américain, ne croyait pas à l'interprétation de l'effet photoélectrique d'Albert Einstein (1879-1955), physicien allemand.

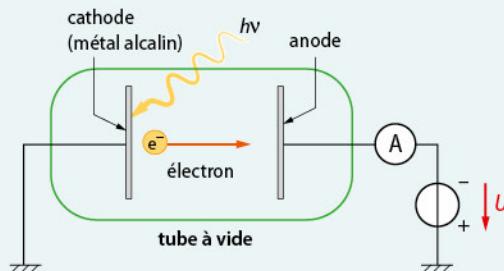


DOC 1 Principe de l'expérience

Millikan réalise donc l'expérience suivante (**B**) avec des métaux : un rayonnement de fréquence ν extrait des électrons de la cathode. Ces électrons sont collectés à l'anode. On branche ce dispositif à une source de tension variable U . Pour une certaine valeur de la tension appelée tension d'arrêt et notée U_0 , les électrons sont arrêtés et annulent le courant dans le circuit. Il mesure U_0 pour différentes valeurs de ν puis trace U_0 en fonction de ν (**A**).



A Courbe obtenue par Robert Millikan en 1916 pour le sodium



B Dispositif expérimental

DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide :
 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Dans les conditions de l'expérience on a $E_c = eU_0$

DOC 2 Résultats et prolongements

L'expérience de Millikan valide non seulement l'interprétation de l'effet photoélectrique d'Albert Einstein mais permet aussi une détermination expérimentale de la constante de Planck h .

Robert Millikan obtint le prix Nobel en 1923 pour ses travaux sur la charge élémentaire e et pour ceux sur l'effet photoélectrique.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Rappeler l'hypothèse d'Albert Einstein pour interpréter l'effet photoélectrique.
2. Exprimer l'énergie cinétique de l'électron en fonction de la fréquence seuil du matériau ν_S et de la fréquence du rayonnement incident ν .
3. Déterminer la valeur du coefficient directeur de la droite obtenue pour le sodium.

PROBLÉMATIQUE

Déterminer la valeur de h mesurée par Robert Millikan en 1916 et la comparer à la valeur actuellement admise.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.

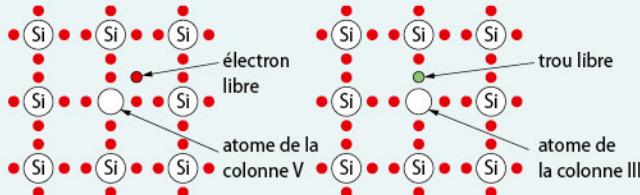
38 Photodiode et DEL ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

COM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

La photodiode et la diode électroluminescente (DEL) sont des dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière et la technologie des semi-conducteurs.

DOC 1 Jonction PN

La photodiode détecte la lumière, la diode électroluminescente émet de la lumière. Elles sont constituées d'une jonction PN c'est-à-dire la jonction d'une zone contenant un semi-conducteur dopé N qui possède un surplus d'électrons et une zone contenant un semi-conducteur dopé P c'est-à-dire qui présente un défaut d'électrons autrement dit une présence de « trous ».

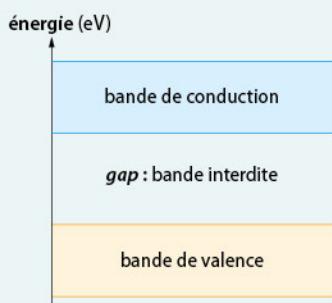


Exemples de dopages P et N pour le silicium



DOC 3 Bandes d'énergie

Les niveaux d'énergie possibles des matériaux semi-conducteurs sont situés dans deux bandes : la bande de valence et la bande de conduction. Un semi-conducteur peut absorber ou émettre des photons dont l'énergie est supérieure à celle du « gap ».

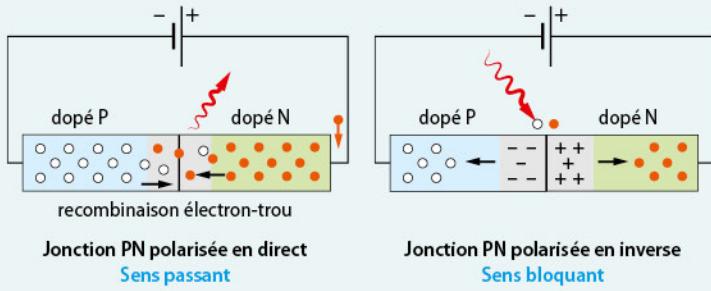


Bandes de valence et de conduction

Si	GaSb	GaP	GaAs
1,12	0,68	2,25	1,43

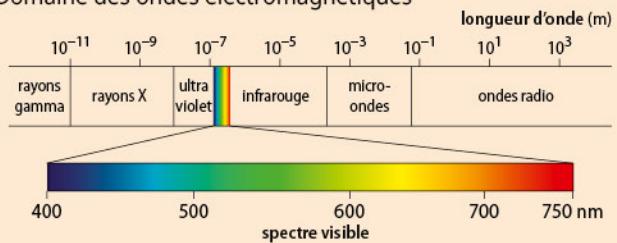
Quelques valeurs d'énergie de gap de matériaux semi-conducteurs utilisés, en eV

DOC 4 Principes de fonctionnement



DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- 1 eV = $1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Domaine des ondes électromagnétiques



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. a. Pourquoi peut-on dire que la photodiode et la DEL exploitent l'interaction lumière-matière ?
- b. Citer un autre dispositif qui exploite cette interaction.
2. a. Rappeler les caractéristiques du photon (définition, énergie, masse, vitesse).
- b. Déterminer de quel(s) domaine(s) d'ondes électromagnétiques proviennent les photons qui peuvent être absorbés par chaque semi-conducteur cité.

SYNTHÈSE

Comparer le fonctionnement de la photodiode et de la diode électroluminescente en précisant pour chaque dispositif :

- le principe de fonctionnement ;
- le schéma du composant ;
- s'il y a émission ou absorption de photon ;
- un exemple d'utilisation.

39 Production d'électricité RÉSOLUTION DE PROBLÈME

AN/R/A Choisir un modèle ou des lois pertinentes**Les panneaux photovoltaïques sont utilisés pour produire l'électricité des particuliers.****DONNÉE**

► Moyenne annuelle de l'énergie reçue à Orléans sur une surface orientée au Sud et inclinée d'un angle égal à la latitude : $3,4 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}$.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

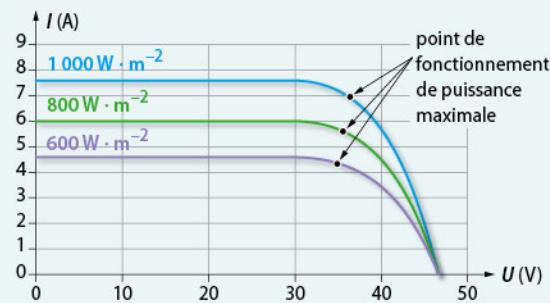
1. Calculer le rendement du panneau photovoltaïque pour un éclairement de $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
2. Déterminer l'énergie lumineuse moyenne reçue par 1 m^2 à Orléans en une année en kWh.

PROBLÉMATIQUE

Une habitation à Orléans consomme une énergie électrique de 5 000 kWh par an. Les propriétaires souhaitent que 50 % de l'énergie électrique soit produite par les panneaux photovoltaïques étudiés.

Déterminer la surface du toit à couvrir.**» Retrouvez des exercices de synthèse p. 522****DOC Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque**

La courbe ci-dessous présente la caractéristique intensité-tension d'un panneau photovoltaïque de surface $1,50 \text{ m}^2$ pour trois éclairements.

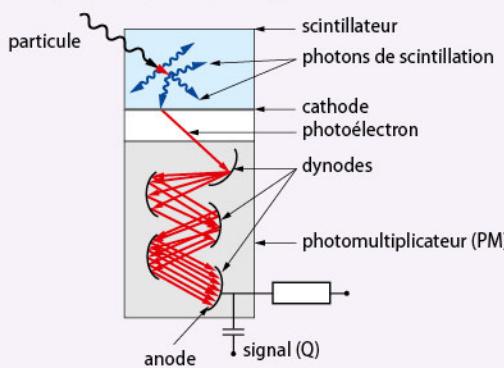
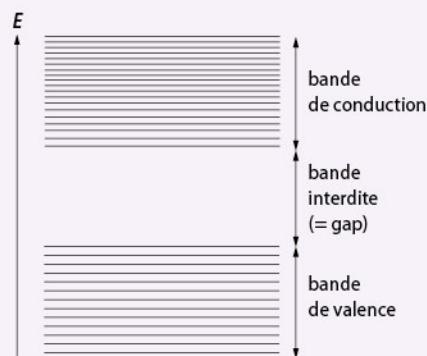
**VERS LE SUP'**

40 Détection de particules

En physique des particules, on utilise différents dispositifs pour détecter des particules cosmiques ou obtenues dans des expériences de physique nucléaire.

Dans les détecteurs à scintillation, on associe un scintillateur à un tube photomultiplicateur pour détecter, compter et déterminer l'énergie des particules. Les particules excitent un scintillateur qui émet alors des photons dans le domaine du visible, provoquant l'émission d'électrons à la cathode A. Un système d'électrodes, appelées dynodes, permet de démultiplier le nombre d'électrons (par succession d'émissions secondaires). On mesure alors le courant obtenu à l'anode.

Dans les détecteurs à semi-conducteur, on mesure le courant électrique obtenu lorsqu'une particule est absorbée par le matériau, ce qui provoque le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction B.

**A** Principe d'un scintillateur**B** Bandes d'énergie

Données : domaine du visible : $400\text{-}800 \text{ nm}$; énergie du gap du silicium : $1,12 \text{ eV}$, du germanium : $0,66 \text{ eV}$.

1. a. Quel est le nom de l'effet exploité au niveau de la cathode ?
- b. Calculer la fréquence seuil minimale de la cathode pour que cet effet ait lieu avec des photons du domaine du visible.
- c. Justifier l'utilisation du terme « photons » et pas « onde lumineuse » dans l'explication du principe du photomultiplicateur.

2. Calculer l'énergie minimale des particules pour qu'elles puissent être détectées par les semi-conducteurs suivants :

- a. le silicium ; b. le germanium.
- a. La représentation des énergies possibles d'un solide en bandes provient de la quantification de l'énergie des atomes. Préciser ce terme.
- b. Recopier et représenter le gain d'énergie apporté par une particule en supposant que celui-ci engendre un courant électrique.

Associations de cellules

↗ GESTES
ECE
n° 9 et 10



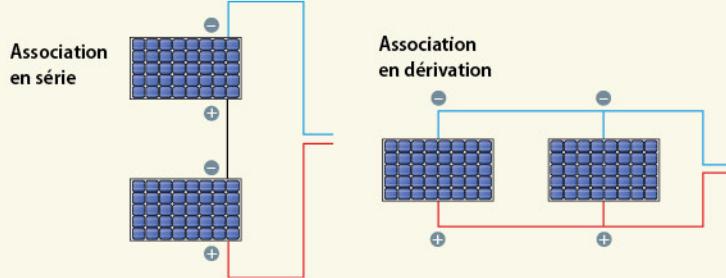
Contexte

Un panneau photovoltaïque est un assemblage de modules qui sont eux-mêmes constitués de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles.

L'objectif est d'étudier comment évolue le rendement pour une association de cellules en série et en dérivation.

Documents mis à disposition

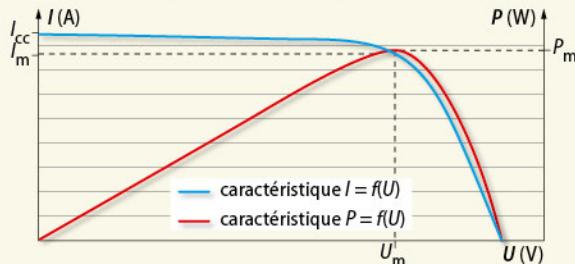
Cellule, module et panneau photovoltaïque



Un luxmètre mesure l'éclairement en lux de symbole I_x . On admettra que $100 \text{ lx} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
On a la relation $P = E \cdot S$ avec E l'éclairement, P la puissance lumineuse reçue et S la surface de la cellule.



Détermination de la puissance électrique maximale fournie par une cellule photovoltaïque



Matériel mis à disposition

- 2 cellules photovoltaïques identiques de surface S donc la caractéristique est donnée pour un éclairement E .
- 2 multimètres
- un tableur-grapheur
- Une résistance variable 10Ω - $10k\Omega$
- Un luxmètre
- Une lampe de bureau
- Un double décimètre

Travail à effectuer

1. (AN/R) Proposition de protocole expérimental (15 min conseillées)

- Proposer un protocole expérimental pour comparer les caractéristiques de deux cellules branchées en série et deux cellules branchées en dérivation.



Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) Mise en œuvre du protocole expérimental proposé (25 min conseillées)

- Mettre en œuvre le protocole et tracer la caractéristique de chaque association.



Être en mesure de présenter les résultats

3. (VAL) Exploitation du résultat obtenu (20 min conseillées)

Pour chaque association de cellules :

- Tracer $P = f(U)$.
- Mesurer la puissance électrique maximale fournie par l'association.
- Déterminer la puissance lumineuse reçue.
- Calculer le rendement de chaque association.
- Identifier une source d'incertitude possible dans les mesures réalisées.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

UNE QUESTION

L'utilisation des panneaux photovoltaïques peut-elle rendre les transports propres ?

Enjeu de la question

Les transports, en particulier aériens, sont polluants et à l'origine de l'émission de dioxyde de carbone, un gaz à effet de serre. L'utilisation de l'énergie solaire permettrait de réduire leur impact.

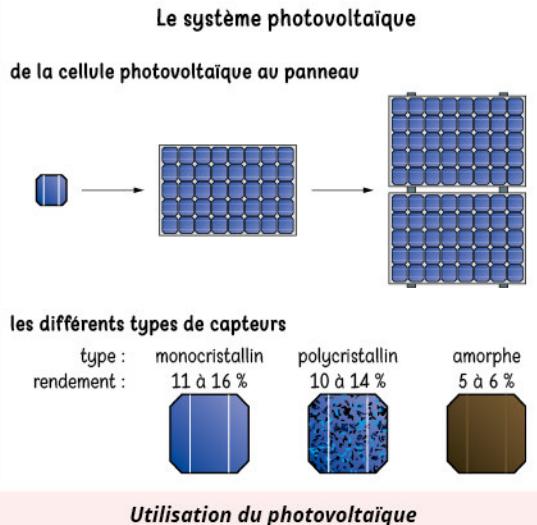
Proposition de plan de présentation

1. Les transports et leurs impacts sur l'environnement.
2. Rendements actuels des différents types de panneaux photovoltaïques.
3. Les prototypes : *Solar Impulse*, *Energy Observer*, *Eraole*. Routes solaires.
4. Conclusion : avantages et inconvénients de l'utilisation de panneaux photovoltaïques dans les transports.

Les mots-clés

semi-conducteur ▶ réchauffement climatique ▶ rendement
▶ ensoleillement

Exemple de support de présentation



QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES

Citer une autre technologie plus respectueuse de l'environnement que l'on pourrait utiliser dans les transports.

Expliquer l'effet de serre et le réchauffement climatique.

Recenser tous les paramètres qui influencent l'énergie lumineuse reçue par le panneau photovoltaïque.

Comment choisir le matériau utilisé dans les panneaux photovoltaïques ?

À propos des panneaux photovoltaïques

Comment expliquer le faible rendement des panneaux photovoltaïques ?

UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers relatifs au développement durable sont des métiers d'avenir. L'exploitation de l'énergie solaire est prometteuse car elle exploite une source d'énergie renouvelable. De nombreux prototypes sont actuellement à l'essai.

Après le bac : Bac + 5 diplôme d'ingénieur ou master du domaine des matériaux

Autres métiers : Technicien(ne) photovoltaïque, électricien(ne) photovoltaïque

L'ingénieur(e) de recherche photovoltaïque travaille dans des laboratoires de recherche pour comprendre les phénomènes à l'origine des dispositifs utilisant des énergies renouvelables et mettre aux points des matériaux et dispositifs innovants pour accroître les rendements en restant respectueux de l'environnement.

