

La description de la lumière par un flux de photons

Cours

Sommaire

I L'effet photoélectrique et le modèle particulaire de la lumière

- A L'observation de l'effet photoélectrique
- B L'interprétation de l'effet photoélectrique : le modèle du photon
- C Le travail d'extraction

II L'interaction photon-matière et ses applications

- A La quantification de l'énergie d'un atome
- B Les phénomènes d'absorption et d'émission de photon par un atome
- C Les applications de l'interaction photon-matière aux enjeux énergétiques
 - 1. Les diodes électroluminescentes
 - 2. Les cellules photovoltaïques et les capteurs de lumière

I L'effet photoélectrique et le modèle particulaire de la lumière

Lorsqu'on expose un métal à un rayonnement électromagnétique, on observe une tension électrique : c'est l'effet photoélectrique. Cet effet peut être interprété en modélisant l'onde électromagnétique comme un flux de particules que l'on appelle les photons. L'énergie des photons dépend de la fréquence du rayonnement. L'énergie des photons est appelée travail d'extraction quand il s'agit d'extraire un électron d'un atome.

A L'observation de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique peut être observé lorsqu'on soumet un métal à un rayonnement lumineux. Une tension électrique apparaît au niveau du métal.

DÉFINITION

Effet photoélectrique

L'**effet photoélectrique**, décrit par Hertz en 1887, est le phénomène par lequel une tension électrique apparaît dans un métal exposé à des ondes électromagnétiques.

EXEMPLE

Ondes
électromagnétiques



Métal

Effet photoélectrique

Exposé à des ondes électromagnétiques, le métal va être soumis à une tension que l'on peut mesurer à l'aide d'un voltmètre.

PROPRIÉTÉ

L'effet photoélectrique a pour particularité de ne pas dépendre de l'intensité du rayonnement incident mais de sa fréquence, et donc de sa longueur d'onde. La tension produite augmente avec la fréquence de l'onde électromagnétique incidente et diminue donc avec sa longueur d'onde.

EXEMPLE

Un métal est exposé à de la lumière visible. La tension produite est plus importante lorsque le métal est exposé à une lumière bleue que lorsqu'il est exposé à une lumière rouge, car sa longueur d'onde est plus faible.

B L'interprétation de l'effet photoélectrique : le modèle du photon

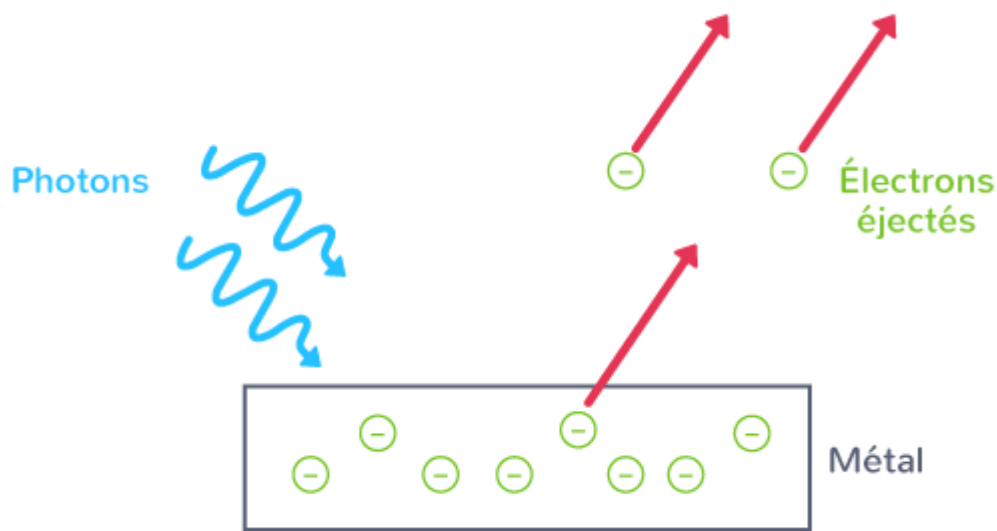
L'effet photoélectrique ne peut s'expliquer que par l'impact de particules de lumière, les photons, sur les atomes composant le métal. L'énergie d'un photon dépend de la fréquence du rayonnement.

PROPRIÉTÉ

En 1905, Albert Einstein montre, en se basant sur les travaux de Max Planck, que l'effet photoélectrique ne peut s'expliquer que par l'impact de particules de lumière, qu'il appelle « photons » sur les atomes composant le métal. La tension électrique observée est alors due à l'éjection d'électrons lors des impacts.

EXEMPLE

Les photons arrachent des électrons aux atomes qui composent le métal. Ce sont ces électrons arrachés qui nous permettent d'observer une tension électrique aux bornes du métal.



Électrons éjectés après impact des ondes électromagnétiques

DÉFINITION

Photon

Le photon est la particule élémentaire de la lumière. Il porte un paquet (ou quantum) d'énergie qui dépend de la fréquence de la lumière considérée. C'est une particule sans masse, qui se déplace à la vitesse de la lumière ($c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

EXEMPLE

Un photon associé à une radiation bleue possède une énergie supérieure à celle d'un photon associé à une radiation rouge.

FORMULE

Énergie d'un photon

Chaque photon transporte un quantum (ou paquet) d'énergie proportionnel à la fréquence ν de l'onde électromagnétique qui lui est associée :

$$E_{\text{photon}} (\text{J}) = h_{(\text{J.s})} \times \nu_{(\text{Hz})}$$

où h est la constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

EXEMPLE

L'énergie d'un photon associé à la radiation émise par un laser hélium-néon est :

$$E_{\text{photon}} (\text{J}) = h_{(\text{J.s})} \times \nu_{(\text{Hz})}$$

$$E_{\text{photon}} = 6,63 \times 10^{-34} \times 4,74 \times 10^{14}$$

$$E_{\text{photon}} = 3,14 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Étant donné que la fréquence est liée à sa longueur d'onde, l'énergie d'un photon peut aussi se calculer à partir de cette dernière.

Formule liant l'énergie d'un photon à la longueur d'onde de la radiation associée

Puisque la fréquence ν d'une onde est liée à sa longueur d'onde λ par la relation suivante :

$$\nu_{(\text{Hz})} = \frac{c_{(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})}}{\lambda_{(\text{m})}}$$

La formule liant l'énergie d'un photon E_{photon} et la longueur d'onde λ de la radiation associée est :

$$E_{\text{photon}(\text{J})} = \frac{h_{(\text{J} \cdot \text{s})} \times c_{(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})}}{\lambda_{(\text{m})}}$$

EXEMPLE

L'énergie d'un photon associée à la radiation émise par un laser hélium-néon peut aussi être calculée à partir de sa longueur d'onde :

$$E_{\text{photon}(\text{J})} = \frac{h_{(\text{J} \cdot \text{s})} \times c_{(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})}}{\lambda_{(\text{m})}}$$

$$E_{\text{photon}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632,8 \times 10^{-9}}$$

$$E_{\text{photon}} = 3,14 \times 10^{-19} \text{ J}$$

FORMULE

Conversion d'énergie en joules et en électron-volts

On exprime souvent les énergies des photons en électron-volts (eV), unité plus adaptée aux énergies des photons associés à des rayonnements visibles :

$$E_{\text{photon}(\text{eV})} = \frac{E_{\text{photon}(\text{J})}}{1,60 \times 10^{-19}}$$

EXEMPLE

L'énergie d'un photon associée à la radiation émise par un laser hélium-néon exprimée en électron-volts est :

$$E_{\text{photon}(\text{eV})} = \frac{E_{\text{photon}(\text{J})}}{1,60 \times 10^{-19}}$$

$$E_{\text{photon}(\text{eV})} = \frac{3,14 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}}$$

$$E_{\text{photon}(\text{eV})} = 1,96 \text{ eV}$$

L'effet photoélectrique a eu une grande importance car il a permis de mettre en évidence la dualité de la lumière. En effet, la lumière possède à la fois les propriétés d'une onde et celles d'un flux de particules.

L'effet photoélectrique a eu une grande importance car il a permis de mettre en évidence la dualité de la lumière. En effet, la lumière possède à la fois les propriétés d'une onde (mise en évidence par les phénomènes de la diffraction et des interférences, par exemple) et celles d'un flux de particules.



À RETENIR

C Le travail d'extraction

Le travail d'extraction est l'énergie des photons qu'il est nécessaire de transférer à un atome métallique pour en extraire un électron.

DÉFINITION

Travail d'extraction

Le travail d'extraction, noté W_0 , est l'énergie minimale nécessaire pour éjecter un électron à la surface du métal.

EXEMPLE

Le travail d'extraction du césium est $W_0 = 1,9 \text{ eV}$.

Ainsi, l'énergie des photons incidents est utilisée pour extraire les électrons du métal et l'excédent est converti sous forme d'énergie cinétique des électrons éjectés.

FORMULE

Expression du travail d'extraction

En considérant que l'énergie du système {photons + métal} est conservée, on en déduit que l'énergie des photons incidents est égale à la somme du travail d'extraction et de l'énergie cinétique des électrons éjectés :

$$h_{(\text{J.s})} \times \nu_{(\text{Hz})} = W_0 (\text{J}) + E_c (\text{J})$$

On peut donc déterminer la valeur du travail d'extraction à l'aide de la fréquence ν du rayonnement et de l'énergie cinétique des électrons éjectés :

$$W_0 (\text{J}) = h_{(\text{J.s})} \times \nu_{(\text{Hz})} - E_c (\text{J})$$

EXEMPLE

Lorsqu'un échantillon de césium est exposé à un rayonnement de longueur d'onde 450 nm, l'énergie cinétique des électrons éjectés est 1,54 eV. Calculons le travail d'extraction de l'échantillon.

On sait que :

$$W_0 (\text{J}) = h_{(\text{J.s})} \times \nu_{(\text{Hz})} - E_c (\text{J})$$

Soit :

$$W_0 (\text{J}) = h_{(\text{J.s})} \times \frac{c_{(\text{m.s}^{-1})}}{\lambda_{(\text{m})}} - E_c (\text{J})$$

L'application numérique nous donne alors :

$$W_0 = 6,63 \times 10^{-34} \times \frac{3,00 \times 10^8}{450 \times 10^{-9}} - 1,54 \times 1,60 \times 10^{-19}$$

$$W_0 = 3,04 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Soit, en électron-volts :

$$W_0 = \frac{3,04 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}}$$

$$W_0 = 1,9 \text{ eV}$$

On en déduit que l'énergie minimale pour extraire un électron d'un échantillon de césium avec un rayonnement de 450 nm est $W_0 = 1,9 \text{ eV}$.

À partir de la valeur du travail d'extraction, on peut déterminer la fréquence seuil d'extraction.

DÉFINITION

Fréquence seuil d'extraction

La **fréquence seuil d'extraction**, notée ν_0 , est la fréquence du rayonnement minimal permettant l'extraction d'électrons, l'énergie cinétique des électrons éjectés étant alors nulle.

EXEMPLE

La fréquence seuil d'extraction du césium est $\nu_0 = 4,59 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

Sachant que l'énergie minimale d'un rayonnement est le travail d'extraction et que la fréquence correspondante est la fréquence seuil d'extraction, on peut calculer cette dernière.

FORMULE

Fréquence seuil d'extraction

Puisqu'ils correspondent tous les deux à une énergie minimale d'extraction, le travail d'extraction et la fréquence seuil d'extraction sont liés par la relation suivante :

$$W_0 \text{ (J)} = h \text{ (J.s)} \times \nu_0 \text{ (Hz)}$$

D'où l'expression de la fréquence seuil d'extraction ν_0 en fonction du travail d'extraction W_0 :

$$\nu_0 \text{ (Hz)} = \frac{W_0 \text{ (J)}}{h \text{ (J.s)}}$$

EXEMPLE

Le travail d'extraction du césium étant $W_0 = 1,9 \text{ eV}$, sa fréquence d'extraction est :

$$\nu_0 \text{ (Hz)} = \frac{W_0 \text{ (J)}}{h \text{ (J.s)}}$$

$$\nu_0 = \frac{1,9 \times 1,60 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}}$$

$$\nu_0 = 4,59 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

L'énergie d'un atome est quantifiée et ne peut prendre que certaines valeurs. Ces valeurs définissent des niveaux d'énergie qui sont représentés sur un diagramme énergétique. Lorsqu'un atome subit une transition énergétique, l'énergie d'un photon est absorbée ou émise par l'atome. Cette interaction photon-matière possède de nombreuses applications dans la vie courante.

A La quantification de l'énergie d'un atome

L'énergie d'un atome est quantifiée. On représente ces valeurs sur un diagramme énergétique.

PROPRIÉTÉ

L'énergie d'un atome ne peut prendre que certaines valeurs, en nombre restreint, qui dépendent de la nature de l'atome : on dit que l'énergie de l'atome est quantifiée.

EXEMPLE

L'énergie d'un atome d'hydrogène peut être égale à $-13,6 \text{ eV}$ ou à $-3,39 \text{ eV}$ (entre autres valeurs) mais à aucune valeur entre ces deux-là.



REMARQUE

Par convention, l'énergie d'un atome est négative, une énergie nulle correspondant à un atome ionisé, qui a donc perdu un électron.

EXEMPLE

C'est le résultat d'une convention. L'état maximal d'énergie que peut atteindre l'atome est celui de la ionisation. Si on associe à cet état une énergie nulle, tous les états d'énergie que peut atteindre l'atome sont bien en dessous de l'état maximal, donc négatifs.

DÉFINITION

Diagramme d'énergie d'un atome

Le **diagramme d'énergie d'un atome** représente les niveaux d'énergie accessibles pour un atome, que l'on numérote avec l'indice n , appelé nombre quantique.

EXEMPLE

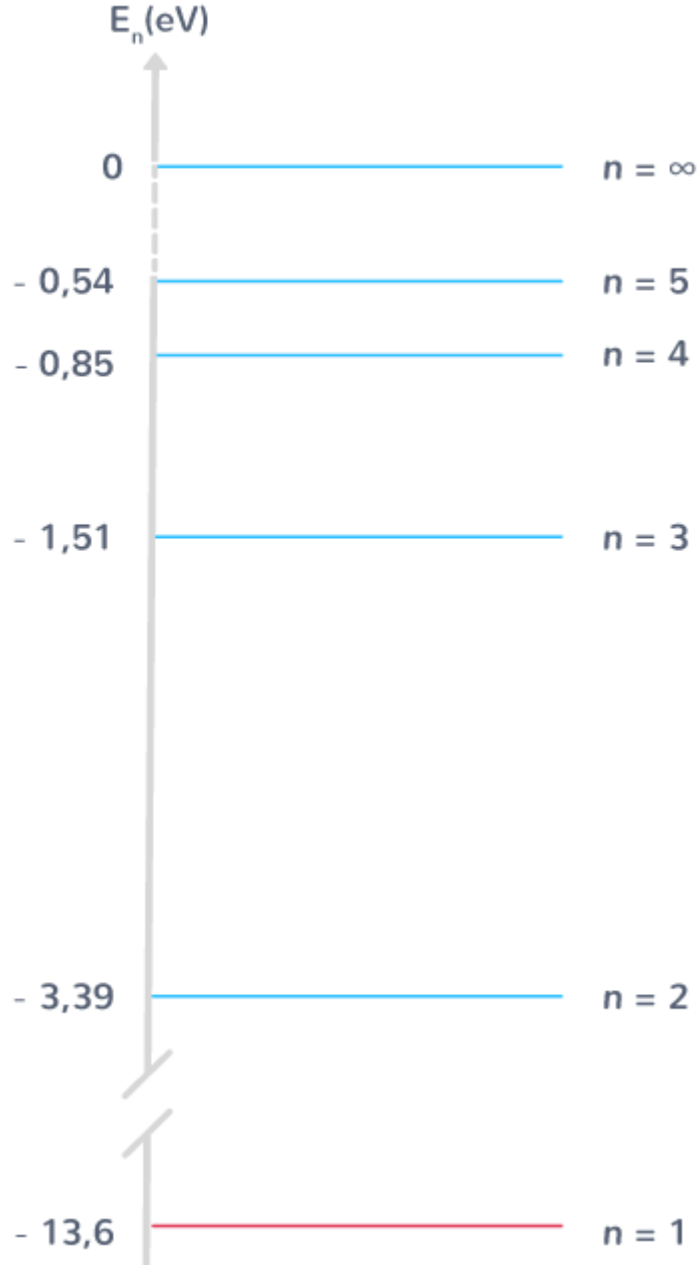


Diagramme énergétique de l'atome d'hydrogène

DÉFINITION

États énergétiques d'un atome

On distingue plusieurs **états énergétiques d'un atome** :

- **L'état fondamental** correspond à l'état d'énergie minimale, dans lequel l'atome possède la stabilité maximale. Il est associé au nombre quantique $n = 1$.
- Les niveaux d'énergie associés à un nombre quantique $n > 1$ correspondent aux **états excités de l'atome**.
- **L'état ionisé** correspondant à l'état d'énergie maximale $E = 0$ eV et associé à un nombre quantique tendant vers l'infini.

EXEMPLE

D'après le diagramme d'énergie d'un atome d'hydrogène :

- L'énergie de son état fondamental est $-13,6$ eV.
- Les énergies de ses quatre premiers états excités sont $-3,39$ eV, $-1,51$ eV, $-0,85$ eV et $-0,54$ eV.

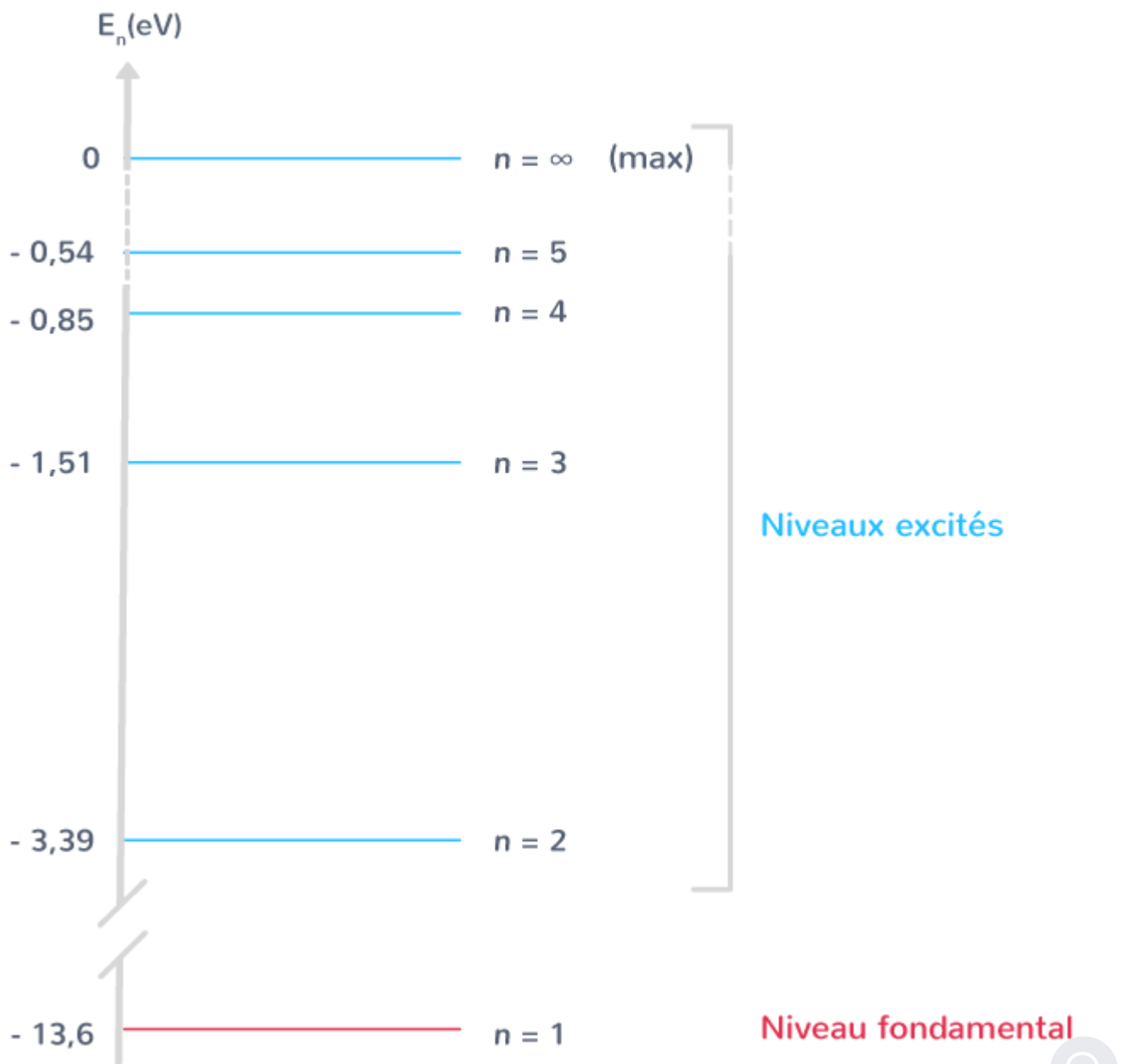


Diagramme énergétique de l'atome d'hydrogène

B Les phénomènes d'absorption et d'émission de photon par un atome

Un atome peut absorber ou émettre un photon pour gagner ou perdre de l'énergie. Cela se produit si l'énergie d'un photon correspond à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie d'un atome.

PROPRIÉTÉ

Si l'énergie d'un photon correspond à la différence d'énergie entre deux niveaux d'un atome, il peut être absorbé par celui-ci. Un ou plusieurs électrons de la couche externe de l'atome passent alors à un état d'énergie supérieur du diagramme énergétique de l'atome.

À l'inverse, quand un ou plusieurs électrons de l'atome veulent passer d'un état d'énergie excité à un état d'énergie inférieur, l'atome émet un photon dont l'énergie est égale à la différence entre ces deux niveaux.

Absorption et émission d'un photon	Absorption	Émission
Représentation		
Relation entre l'énergie du photon et de la variation de l'énergie de l'atome	$E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{atome}}$ (car $\Delta E_{\text{atome}} > 0 \text{ J}$)	$E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{atome}} $ (car $\Delta E_{\text{atome}} < 0 \text{ J}$)
Conséquence	L'atome absorbe la radiation de longueur d'onde : $\lambda(\text{m}) = \frac{h_{(\text{J.s})} \times c_{(\text{m.s}^{-1})}}{\Delta E_{\text{atome}}(\text{J})}$	L'atome émet la radiation de longueur d'onde : $\lambda(\text{m}) = \frac{h_{(\text{J.s})} \times c_{(\text{m.s}^{-1})}}{ \Delta E_{\text{atome}} (\text{J})}$

Absorption et émission d'un photon

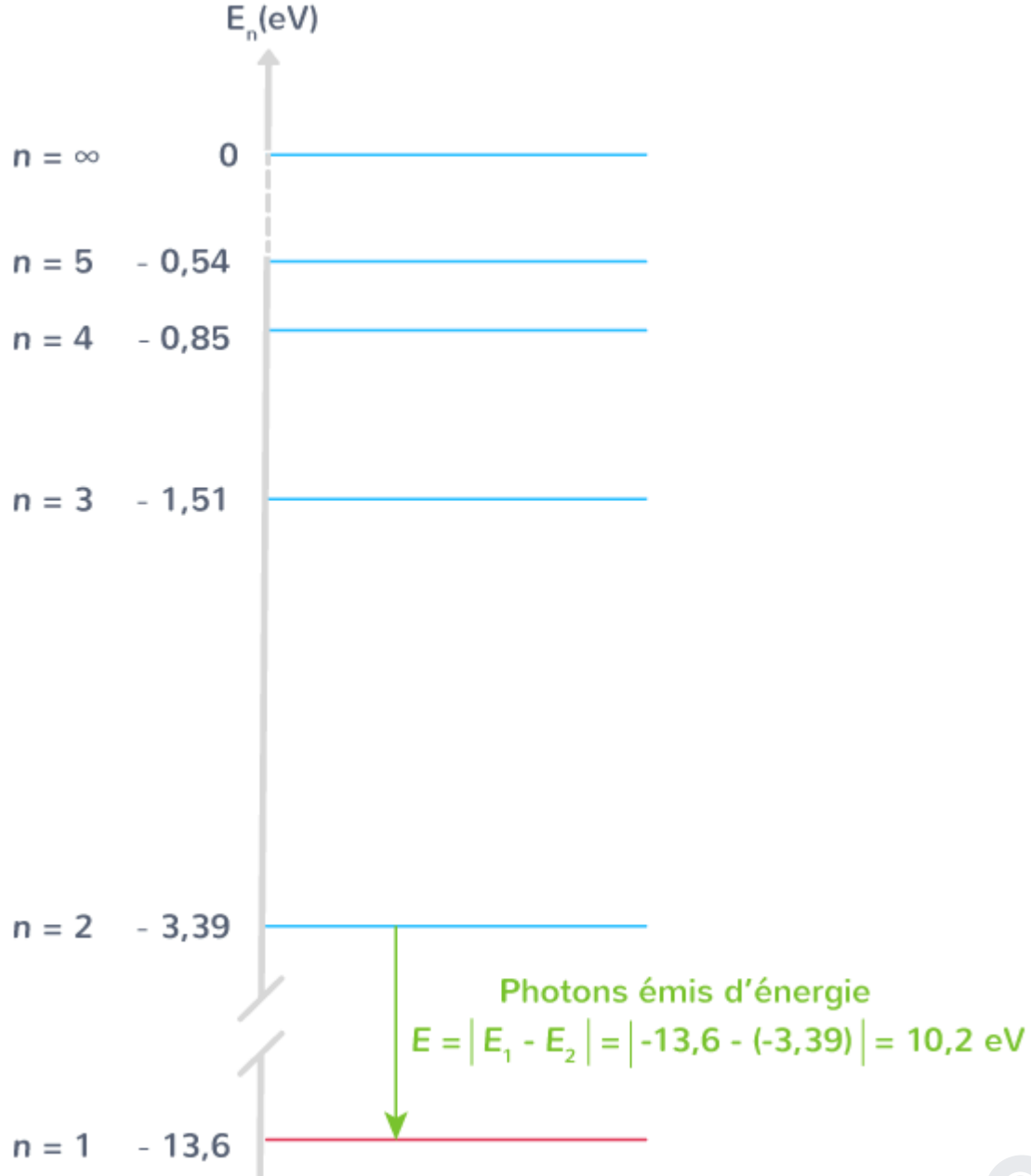
EXEMPLE

Si un atome d'hydrogène se désexcite en passant du niveau $n = 2$ à son niveau fondamental, l'énergie du photon émis est :

$$E_{\text{photon}} = |\Delta E_{\text{atome}}| = |E_2 - E_1|$$

$$E_{\text{photon}} = |13,6 - 3,39|$$

$$E_{\text{photon}} = 10,2 \text{ eV}$$



Transition énergétique du niveau E_2 au niveau E_1 d'un atome d'hydrogène

La longueur de la radiation émise est alors :

$$\lambda_{(m)} = \frac{h_{(J.s)} \times c_{(m \cdot s^{-1})}}{|E_2 - E_1|_{(J)}}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{|3,39 - 13,6| \times 1,60 \times 10^{-19}}$$

$$\lambda = 1,22 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Cette transition énergétique émet un photon d'une longueur d'onde de 122 nm.

C Les applications de l'interaction photon-matière aux enjeux énergétiques

Les diodes électroluminescentes sont des sources lumineuses ayant de très bons rendements. Les cellules photovoltaïques permettent de produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire et peuvent aussi être utilisées comme des capteurs de lumière. Ces dispositifs permettent des économies d'énergie.

1. Les diodes électroluminescentes

Les diodes électroluminescentes réalisent une conversion efficace de la puissance électrique en puissance lumineuse.

DÉFINITION

Diodes électroluminescentes (DEL)

Les diodes électroluminescentes (DEL) sont des récepteurs électriques qui convertissent la puissance électrique en puissance lumineuse avec un très bon rendement.

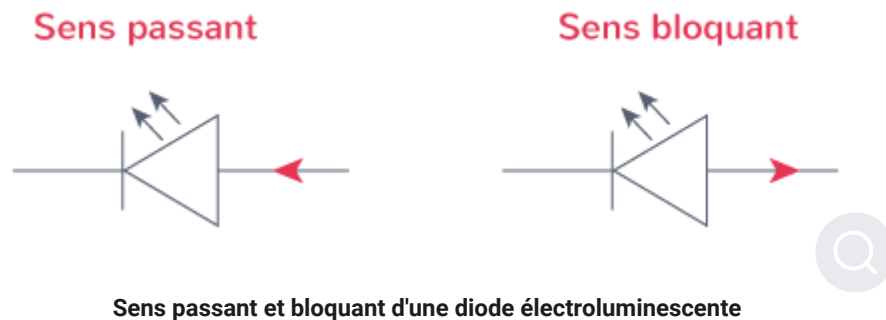
EXEMPLE

Les rendements des diodes électroluminescentes sont quasiment dix fois plus importants que ceux des ampoules à filaments.

PROPRIÉTÉ

Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique dans un seul sens, nommé le « sens passant », le sens opposé étant le « sens bloquant ». Son symbole en forme de flèche illustre son sens passant.

EXEMPLE

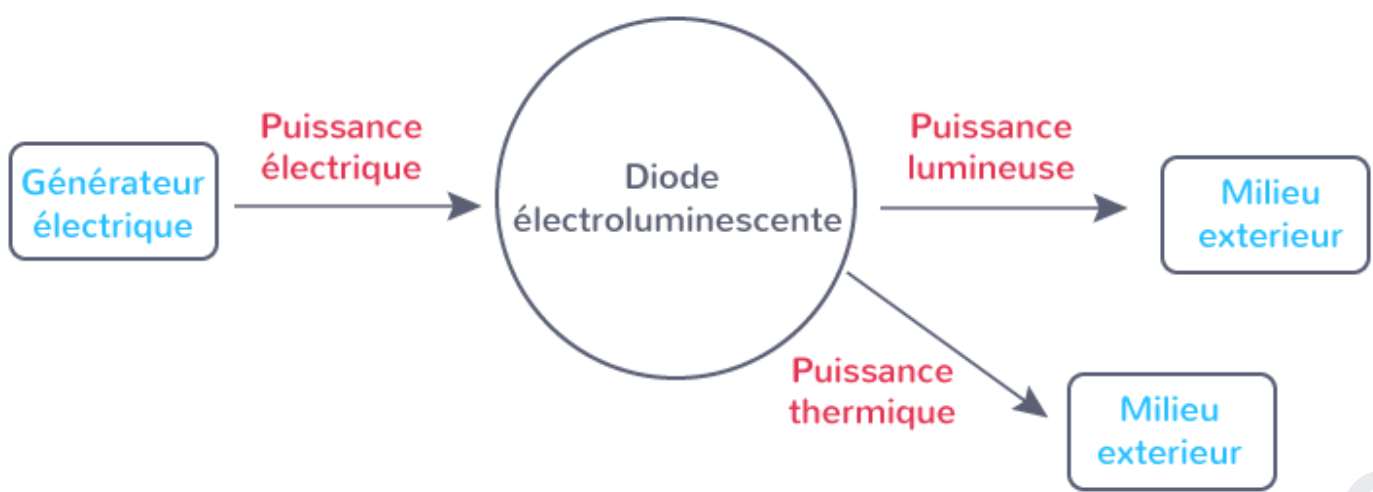


PROPRIÉTÉ

On illustre la conversion d'énergie réalisée par une diode électroluminescente à l'aide d'une chaîne énergétique. Celle-ci fait apparaître :

- la puissance absorbée, ici c'est la puissance électrique ayant pour origine un générateur ;
- la puissance produite (ou utile), ici c'est la puissance lumineuse, transférée au milieu extérieur ;
- la puissance (inévitavelmente) perdue, ici c'est la puissance thermique dissipée dans le milieu extérieur.

EXEMPLE



Chaîne énergétique d'une diode électroluminescente

2. Les cellules photovoltaïques et les capteurs de lumière

Les cellules photovoltaïques composent les panneaux solaires électriques et certains capteurs de lumière. Elles exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Ainsi, elles permettent la conversion d'une source d'énergie renouvelable en électricité et permettent aussi de réaliser des économies d'énergie.

DÉFINITION

Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dipôles qui exploitent l'effet photoélectrique : elles produisent de l'énergie électrique lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

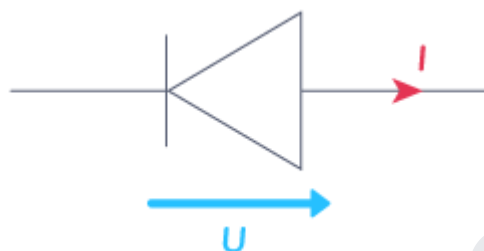
EXEMPLE

Les panneaux solaires électriques sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques.

PROPRIÉTÉ

Les cellules photovoltaïques fonctionnent comme des diodes mais branchées en inverse. Leur symbole électrique est donc similaire mais l'intensité est délivrée dans le sens opposé au sens passant d'une diode conventionnelle.

EXEMPLE



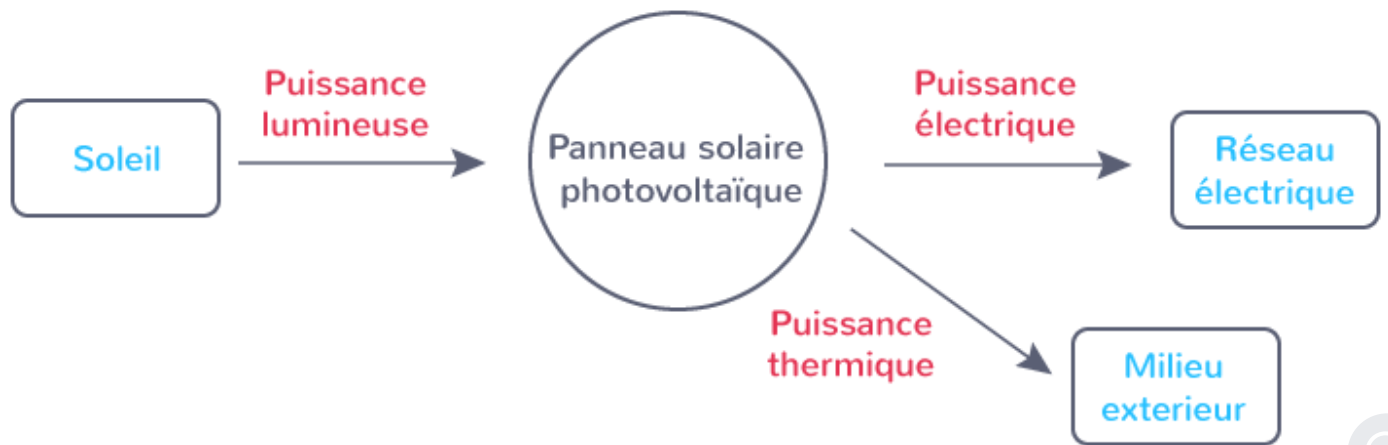
Intensité et tension d'une cellule photovoltaïque

PROPRIÉTÉ

On illustre la conversion d'énergie réalisée par les cellules photovoltaïques à l'aide d'une chaîne énergétique. Celle-ci fait apparaître :

- la puissance absorbée, ici c'est la puissance solaire ayant pour origine le Soleil ;
- la puissance produite (ou utile), ici c'est la puissance électrique, transférée au réseau électrique ;
- la puissance (inévitablement) perdue, ici c'est la puissance thermique dissipée dans le milieu extérieur.

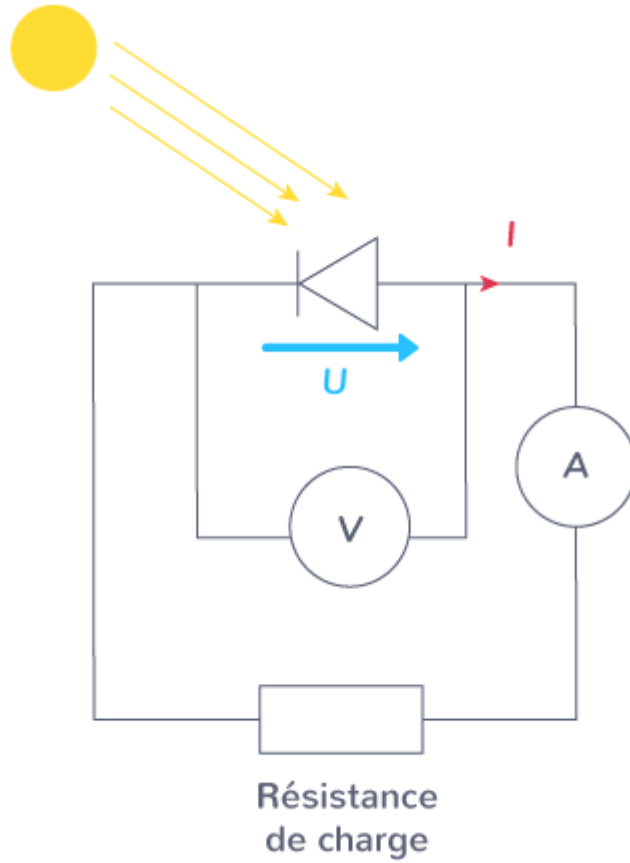
EXEMPLE



Chaîne énergétique d'une cellule photovoltaïque

PROPRIÉTÉ

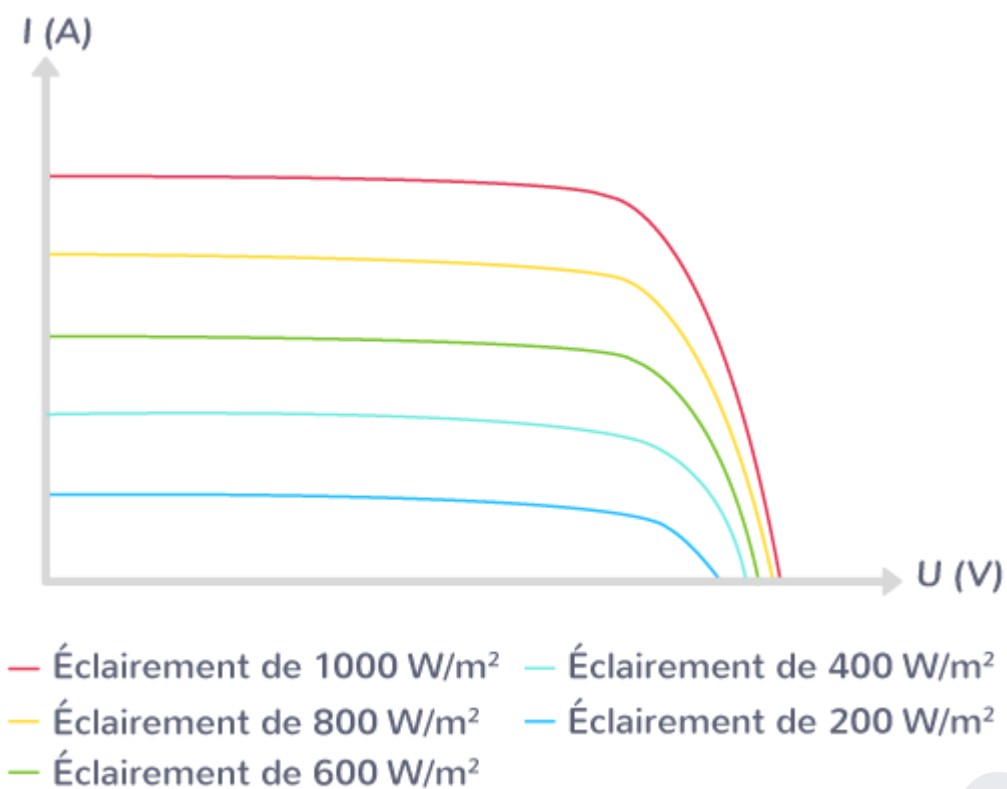
Pour déterminer les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, on l'insère dans un circuit électrique avec une résistance de charge et on mesure la tension électrique U entre ces bornes et l'intensité I qu'elle délivre lorsqu'elle est exposée à un rayonnement :



Circuit électrique avec une cellule photovoltaïque

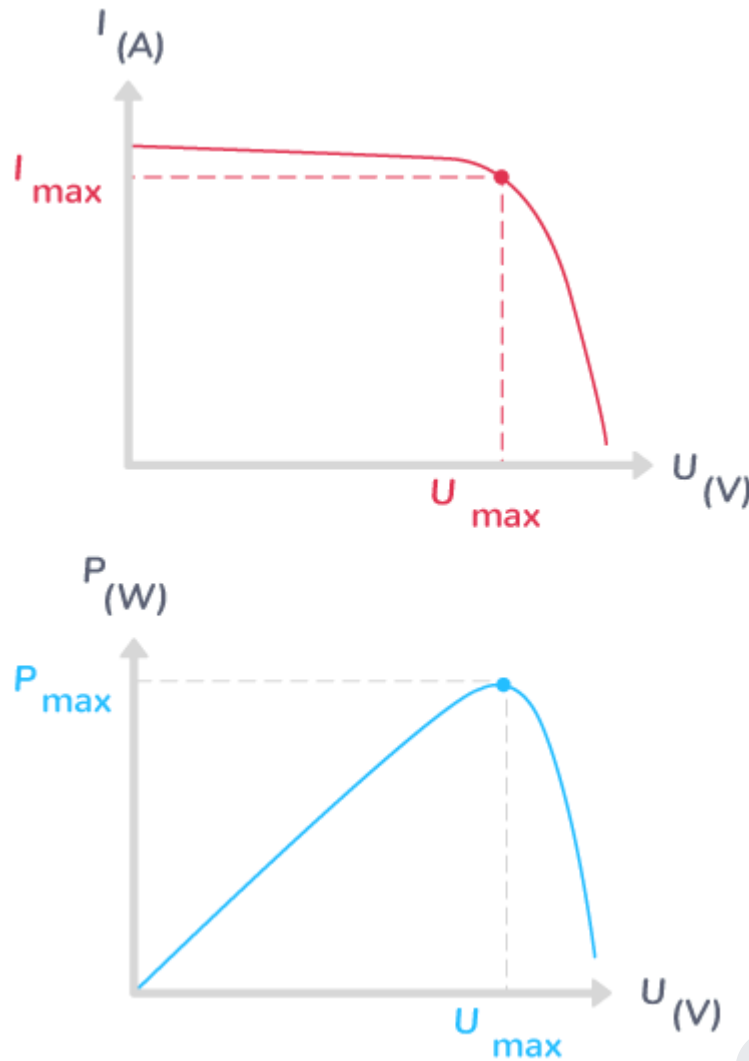
Les cellules photovoltaïques délivrent un courant continu dont l'intensité dépend de l'éclairement (ou puissance surfacique, exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) qu'elles reçoivent :

EXEMPLE



Caractéristiques $I = f(U)$ une cellule photovoltaïque en fonction de l'éclairement

La caractéristique $I = f(U)$ de la cellule photovoltaïque montre qu'il existe une intensité I_{\max} et une tension U_{\max} pour lesquelles la puissance électrique de la cellule $P = U \times I$ est maximale.



Intensité, tension et puissance d'une cellule photovoltaïque

FORMULE

Rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement η d'une cellule photovoltaïque est égale au quotient de la puissance électrique produite et de la puissance lumineuse absorbée, ces deux grandeurs devant être exprimées dans la même unité, généralement en watts (W) :

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

Le plus souvent, on dispose de la tension U aux bornes de la cellule, de l'intensité I qu'elle délivre, de l'éclairement E et de la surface de la cellule S .

Les expressions des puissances sont alors :

- $P_{\text{électrique}} \text{ (W)} = U_{\text{(V)}} \times I_{\text{(A)}}$
- $P_{\text{lumineuse}} \text{ (W)} = E_{\text{(W.m}^{-2}\text{)}} \times S_{\text{(m}^2\text{)}}$

Le rendement de la cellule est alors donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{U_{(V)} \times I_{(A)}}{E_{(W.m^{-2})} \times S_{(m^2)}}$$

EXEMPLE

Exposée à un rayonnement d'éclairement $E = 900 \text{ W.m}^{-2}$, une cellule photovoltaïque de surface $S = 40 \text{ cm}^2$ délivre une intensité de 45 mA sous une tension de 9,6 V.

Son rendement est alors :

$$\eta = \frac{U_{(V)} \times I_{(A)}}{E_{(W.m^{-2})} \times S_{(m^2)}}$$
$$\eta = \frac{9,6 \times 45 \times 10^{-3}}{900 \times 40 \times 10^{-4}}$$
$$\eta = 0,12$$

Soit un rendement de 12 %.



Les cellules photovoltaïques ont l'avantage d'exploiter une source d'énergie renouvelable, le Soleil, mais leur rendement n'est pas très bon.

REMARQUE

EXEMPLE

Le rendement des cellules photovoltaïques les plus efficaces, au silicium cristallin, ne dépasse pas les 17 %.

PROPRIÉTÉ

Certains capteurs de lumière contiennent des cellules photovoltaïques : à partir d'un certain éclairement, l'intensité électrique atteint une valeur seuil qui commande un circuit d'éclairage. En éclairant seulement lorsque c'est nécessaire, on réalise des économies d'électricité.

EXEMPLE

On estime que des capteurs de lumière correctement utilisés permettent d'économiser d'au moins 10 % le coût énergétique de l'éclairage.

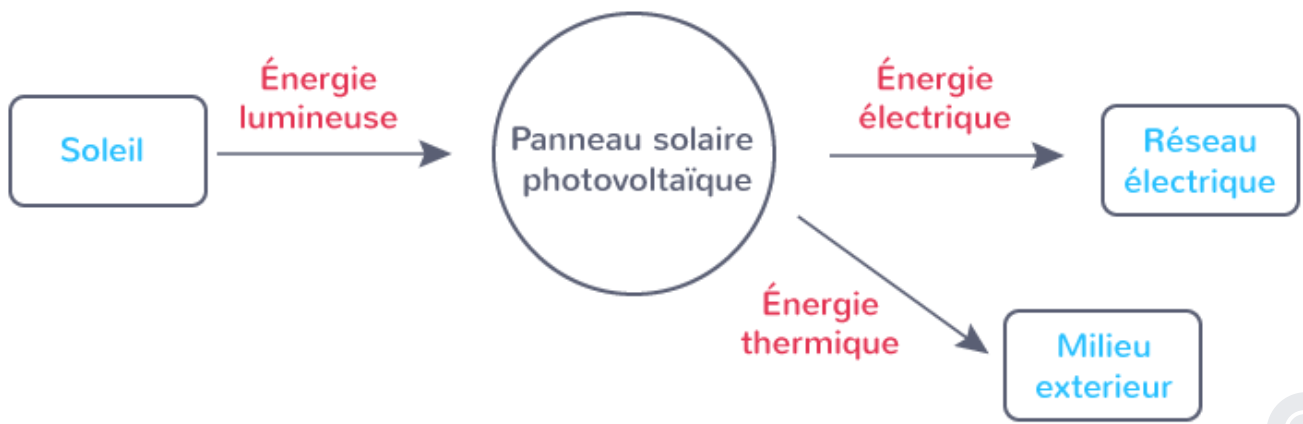


Puisque la puissance et l'énergie sont des grandeurs proportionnelles ($E_{(J)} = P_{(W)} \times \Delta t_{(s)}$), on peut aussi bien utiliser les énergies pour représenter la chaîne énergétique d'une cellule photovoltaïque et exprimer son rendement.

REMARQUE

EXEMPLE

La chaîne énergétique d'une cellule photovoltaïque peut aussi être obtenue avec les énergies :



Chaîne énergétique d'une cellule photovoltaïque

Le rendement d'une cellule photovoltaïque peut aussi s'écrire :

$$\eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}}$$

Avec :

- $E_{\text{électrique}} \text{ (J)} = U_{\text{(V)}} \times I_{\text{(A)}} \times \Delta t_{\text{(s)}}$
- $E_{\text{lumineuse}} \text{ (J)} = E_{\text{(W.m}^{-2}\text{)}} \times S_{\text{(m}^2\text{)}} \times \Delta t_{\text{(s)}}$

D'où :

$$\eta = \frac{U_{\text{(V)}} \times I_{\text{(A)}} \times \Delta t_{\text{(s)}}}{E_{\text{(W.m}^{-2}\text{)}} \times S_{\text{(m}^2\text{)}} \times \Delta t_{\text{(s)}}}$$

Et finalement, on retrouve donc bien la même expression du rendement de la cellule :

$$\eta = \frac{U_{\text{(V)}} \times I_{\text{(A)}}}{E_{\text{(W.m}^{-2}\text{)}} \times S_{\text{(m}^2\text{)}}}$$