

Deux siècles d'énergie électrique

Cours

Sommaire

I Les alternateurs

- A Le phénomène d'induction électromagnétique
- B Le rendement d'un alternateur

II Les cellules photovoltaïques

- A Les spectres atomiques
- B Les semi-conducteurs
- C Le principe de la conversion photovoltaïque
- D Les propriétés électriques des cellules photovoltaïques

RÉSUMÉ

Les alternateurs sont des générateurs électriques performants qui existent depuis deux siècles. Ils exploitent le phénomène d'induction électromagnétique et réalisent ainsi une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique avec un très bon rendement. Les cellules photovoltaïques sont des innovations technologiques du XX^e siècle dont l'impact climatique et environnemental est restreint. Elles utilisent un semi-conducteur dont le spectre atomique permet l'absorption de photons du rayonnement solaire. Lorsque certains des électrons de valence passent dans la bande de conduction, un courant électrique est produit.

I Les alternateurs

Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'induction électromagnétique. Ils réalisent une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique avec un très bon rendement.

A Le phénomène d'induction électromagnétique

Un alternateur met à profit le phénomène d'induction électromagnétique pour produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique.

Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs : ces dispositifs convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette conversion est due au phénomène d'induction électromagnétique.

Le phénomène d'induction électromagnétique a lieu lorsqu'un aimant et une bobine de fil électrique sont en mouvement relatif : une tension électrique est alors créée aux bornes de la bobine.

EXEMPLE

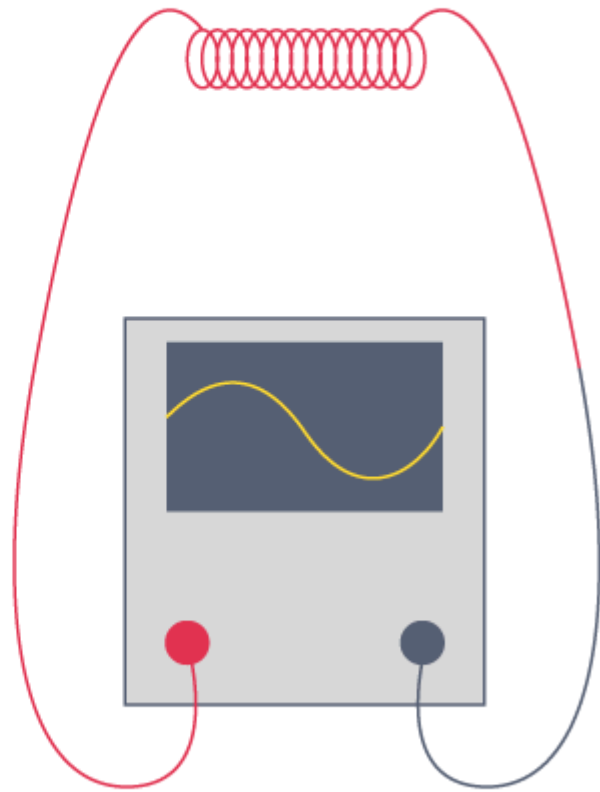
Mise en évidence du phénomène d'induction électromagnétique

Mouvement relatif



Aimant

Bobine de fil électrique

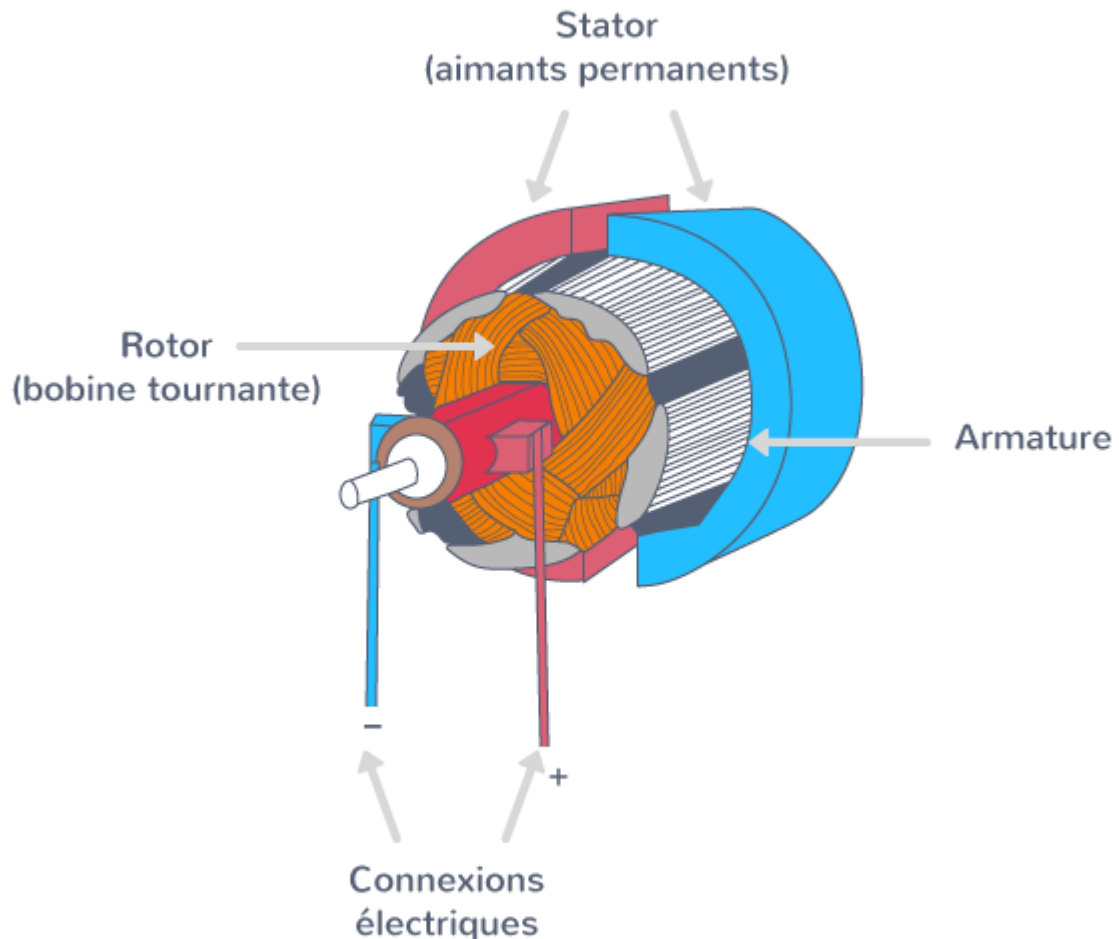


Oscilloscope



Ainsi, un alternateur est composé d'aimants et d'une ou plusieurs bobines. Un de ces éléments, appelé « stator », est fixe et l'autre, appelé « rotor », est mobile.

Schéma d'un alternateur



Dans cet alternateur :

- Le stator est composé par les aimants.
- Le rotor est la bobine.

EXEMPLE

Dans une centrale électrique, l'énergie primaire (nucléaire, combustibles fossiles, etc.) sert à faire tourner le rotor de l'alternateur, ce qui permet de produire l'énergie électrique.

B Le rendement d'un alternateur

Le rendement d'un alternateur est égal au rapport entre la puissance électrique qu'il produit et la puissance mécanique qu'il absorbe.



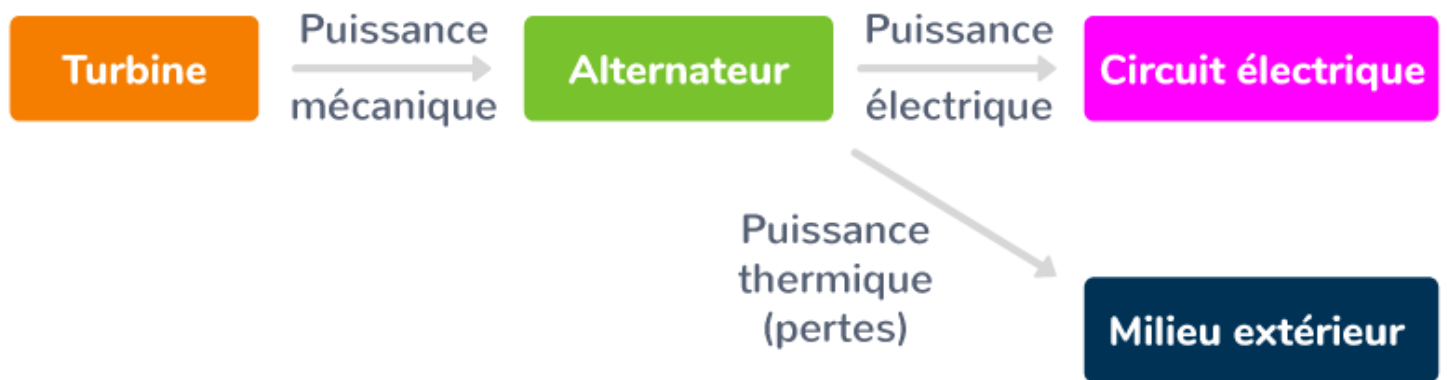
REMARQUE

L'énergie et la puissance sont des grandeurs proportionnelles :

$$E = P \times \Delta t$$

Lorsqu'un alternateur convertit la puissance mécanique (provenant d'une turbine par exemple) en puissance électrique, une partie de la puissance est dissipée sous forme thermique (chaleur).

Chaîne énergétique d'un alternateur



FORMULE

Rendement d'un alternateur

Le rendement d'un alternateur est égal au rapport entre la puissance électrique qu'il produit et la puissance mécanique qu'il absorbe :

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

EXEMPLE

Le rendement d'un alternateur d'une centrale électrique qui produit une puissance électrique de 90 MW à partir d'une puissance mécanique de 100 MW est :

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{mécanique}}} \\ \eta &= \frac{90}{100} \\ \eta &= 0,90 = 90 \%\end{aligned}$$

Le rendement d'un alternateur est un indicateur de l'efficacité de la conversion qu'il réalise. En général, les rendements des alternateurs sont très bons.

EXEMPLE

Les rendements des alternateurs que l'on trouve dans les centrales électriques sont de l'ordre de 95 %.

II Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs à base de semi-conducteurs qui convertissent l'énergie lumineuse, renouvelable, en énergie électrique. Les spectres atomiques permettent de déterminer si l'absorption d'un photon est possible. Le principe de la conversion photovoltaïque repose sur l'absorption d'un photon incident permettant le transfert d'énergie nécessaire à un électron de valence pour passer dans la bande de conduction. Les propriétés électriques des cellules photovoltaïques sont déterminées par leur caractéristique $I = f(U)$.

A Les spectres atomiques

Les spectres atomiques d'émission ou d'absorption de la lumière présentent des raies dont les longueurs d'ondes sont caractéristiques de l'élément chimique. Chacune de ces raies correspond à une transition possible entre deux niveaux d'énergie de l'atome considéré.

L'énergie d'un atome est quantifiée, elle ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées. Ces niveaux d'énergie dépendent de la nature de l'atome et sont représentés sur un diagramme d'énergie.

On distingue :

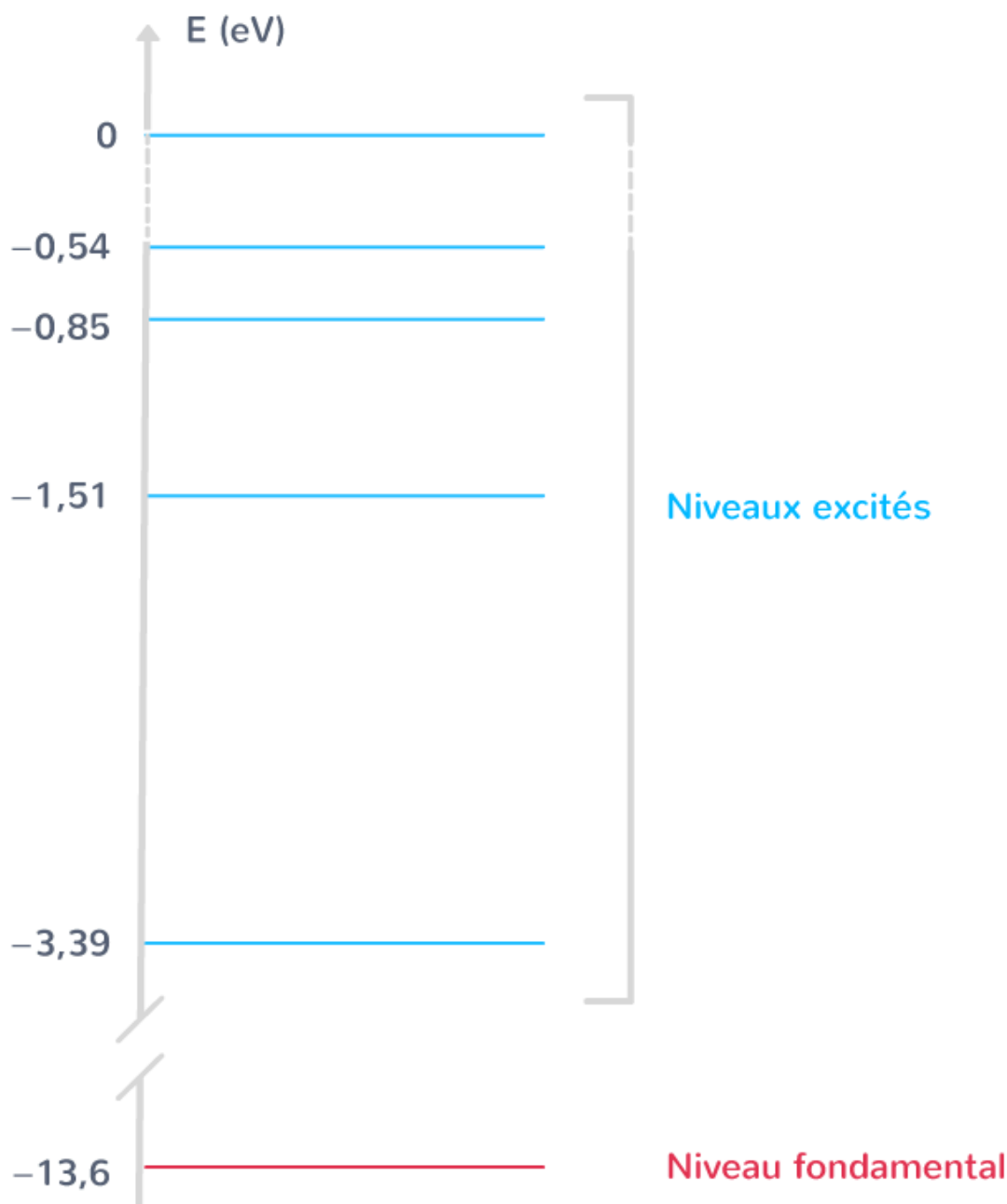
- l'état fondamental d'un atome, qui correspond à son état d'énergie minimale, dans lequel l'atome possède la stabilité maximale ;
- les états excités d'énergie supérieure.

Par convention, l'état de plus haute énergie, qui correspond à un atome ionisé, est associé à une énergie nulle. Les énergies des autres états, plus faibles, sont donc négatives et leurs valeurs sont exprimées en électronvolts (eV), une unité dont la règle de conversion est :

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

EXEMPLE

Diagramme énergétique de l'atome d'hydrogène



D'après son diagramme d'énergie, les énergies des états excités de l'atome d'hydrogène peuvent prendre les valeurs $-3,39$, $-1,51$, $-0,85$ et $-0,54$ eV.

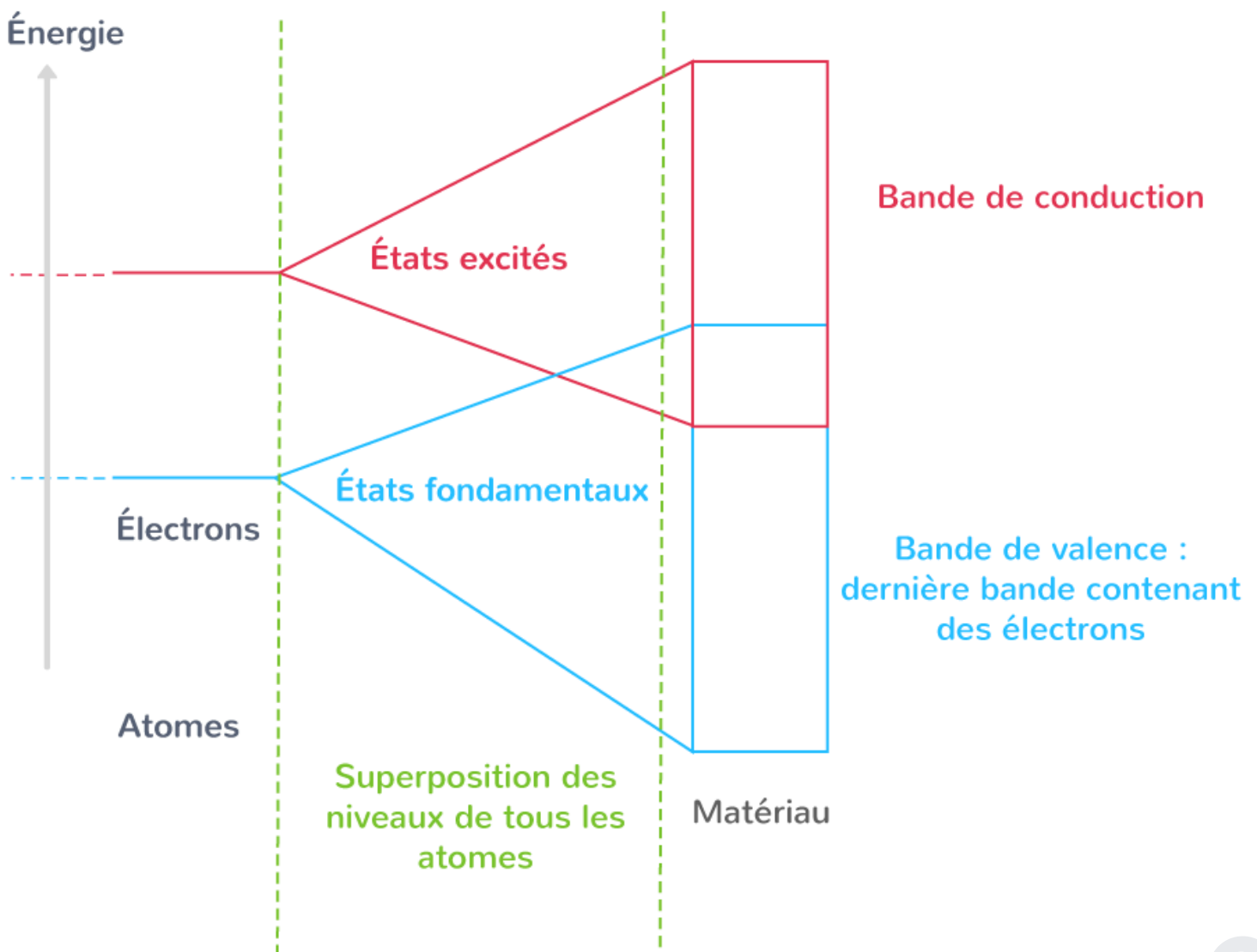
B Les semi-conducteurs

Les bandes de valence et de conduction des semi-conducteurs sont non jointes mais assez proches. Selon les conditions, ces matériaux peuvent réagir comme des isolants ou comme des conducteurs électriques.

Les états énergétiques des différents atomes qui composent un matériau se superposent, ce qui crée deux types de bandes électroniques d'énergie différente :

- la bande de valence regroupe les électrons dans leur état de plus basse énergie, l'état fondamental ;
- la bande de conduction regroupe les électrons de plus haute énergie : ceux qui sont dans un état excité.

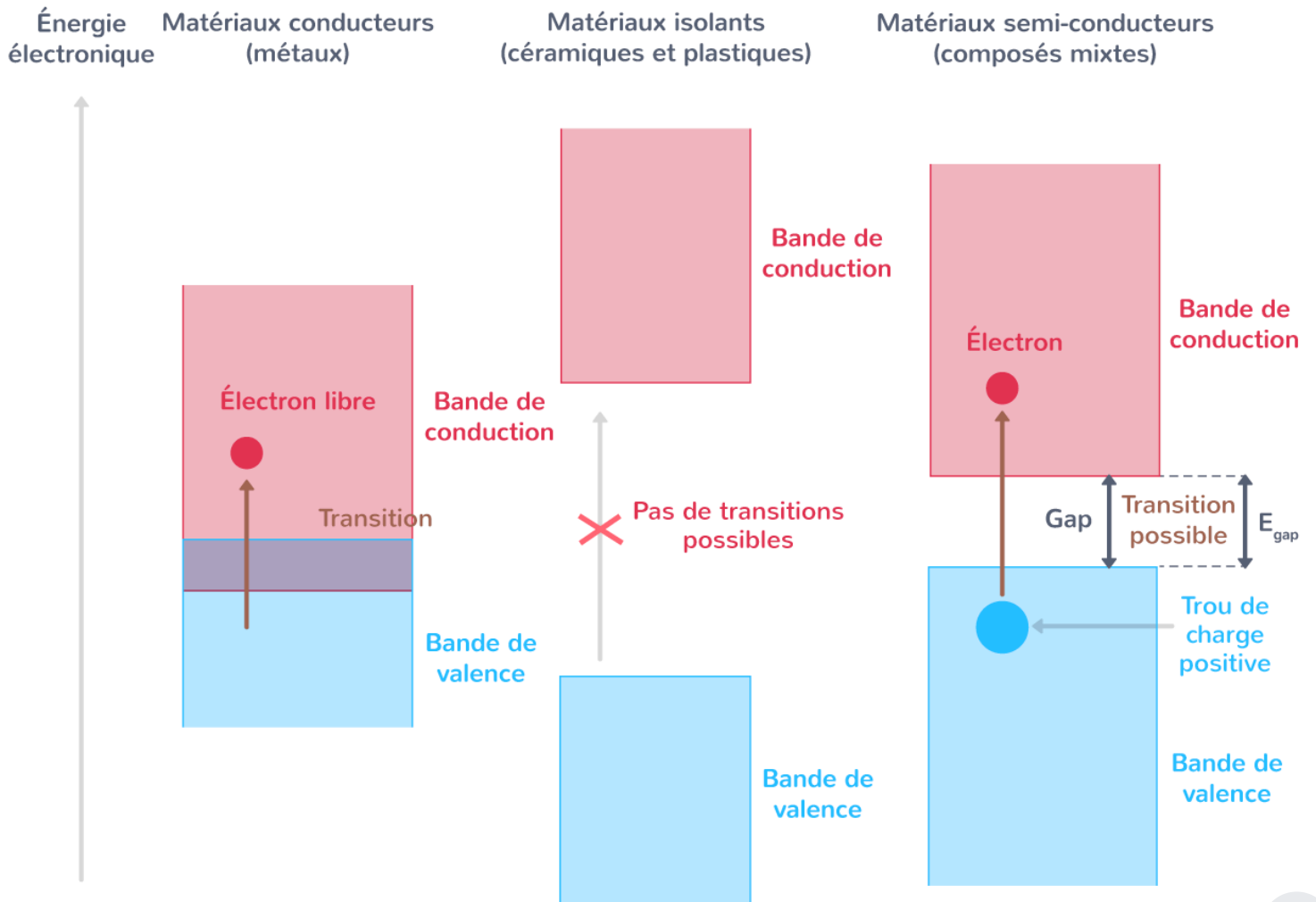
Bandes électroniques d'un matériau



Un matériau permet la circulation du courant électrique s'il possède des électrons dans sa bande de conduction. L'existence de ces électrons dépend de la structure des bandes d'énergie électroniques du matériau :

- Dans un matériau conducteur, les bandes de valence et de conduction se recouvrent partiellement : la bande de valence contient toujours des électrons, même à basse température, et ceux-ci peuvent conduire le courant électrique.
- Dans un matériau isolant électrique, les bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite appelée « gap » (« fossé », en anglais). Ce gap étant trop important, aucun électron de la bande de valence n'a assez d'énergie pour passer dans la bande de conduction.
- Dans un matériau semi-conducteur, ce gap est faible. Le matériau est normalement isolant mais si l'on transmet à ses électrons de valence une énergie supérieure à celle de son gap, ils peuvent passer de bande de valence à la bande de conduction. Le matériau devient alors conducteur électrique.

Bandes d'énergie des différents types de matériaux



C Le principe de la conversion photovoltaïque

Lors de la conversion photovoltaïque, un semi-conducteur absorbe un photon incident. Un électron de valence du matériau passe ainsi dans sa bande de conduction. Pour savoir si un semi-conducteur est susceptible de constituer un capteur photovoltaïque, il faut comparer son spectre d'absorption à celui de la lumière solaire.

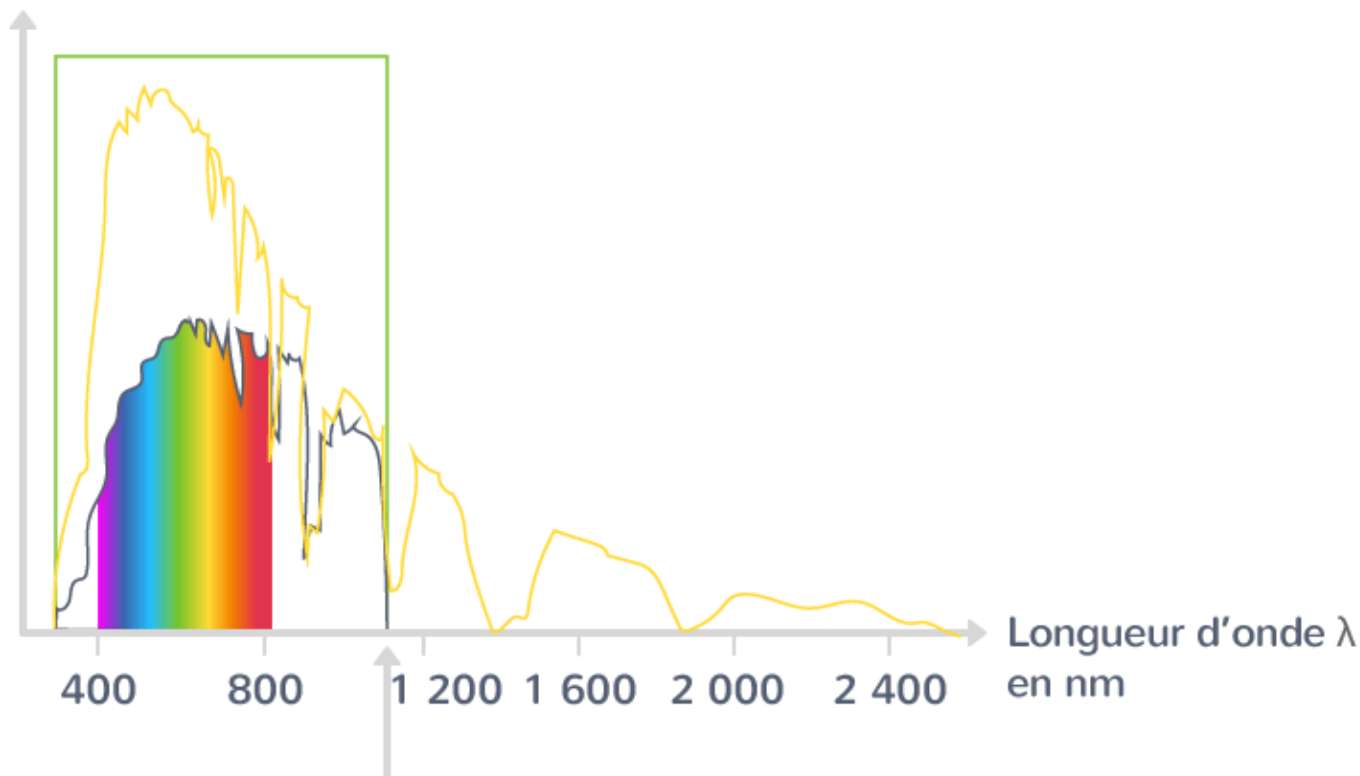
Pour qu'un semi-conducteur soit susceptible d'être utilisé pour fabriquer un capteur photovoltaïque, il faut que le rayonnement solaire incident puisse transférer à ses électrons de valence l'énergie nécessaire pour qu'ils transitent dans sa bande de conduction. Il faut donc vérifier que le spectre solaire contient des radiations d'une énergie supérieure à celle du gap.

EXEMPLE

Le silicium est un semi-conducteur dont l'énergie de gap est 1,1 eV, ce qui correspond à une longueur d'onde de 1 100 nm. Il peut être utilisé pour produire des capteurs photovoltaïques car une partie du rayonnement solaire est composée de radiations de longueur d'onde inférieure à 1 100 nm (et donc d'énergie supérieure à 1,1 eV) :

Principe de la conversion photovoltaïque

Puissance du rayonnement



Gap du silicium
1 100 nm ~ 1,1 eV

- Partie du rayonnement solaire pouvant être convertie par le silicium
- Spectre solaire

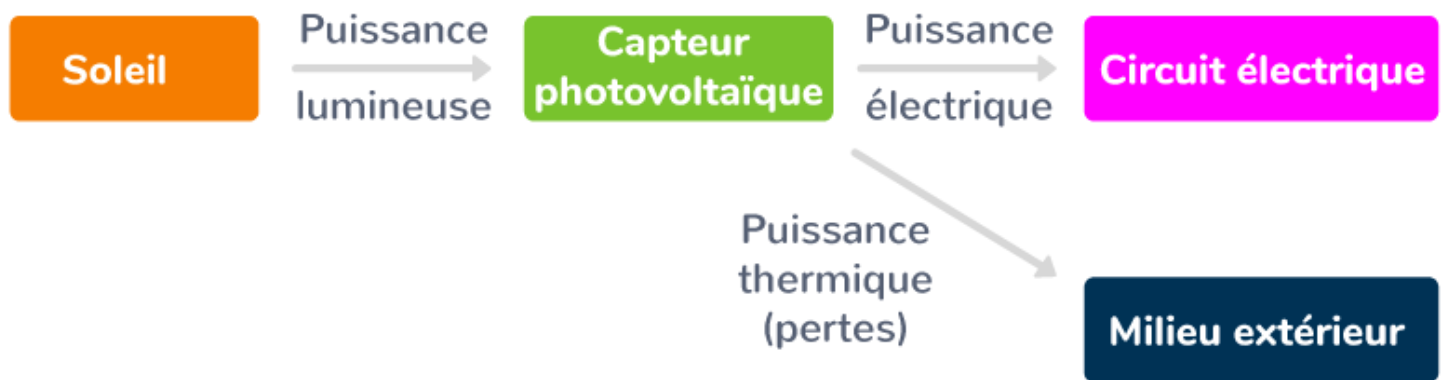


REMARQUE

Les raies d'absorption présentes dans le spectre solaire sont dues aux gaz présents dans l'atmosphère.

Le capteur photovoltaïque convertit alors la puissance lumineuse incidente en puissance électrique, avec des pertes inévitables sous forme de chaleur :

Chaîne énergétique d'un capteur photovoltaïque



FORMULE

Rendement d'un capteur photovoltaïque

Le rendement d'un capteur photovoltaïque est égal au rapport entre la puissance électrique qu'il produit et la puissance lumineuse qu'il absorbe :

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

EXEMPLE

Le rendement d'un capteur photovoltaïque qui produit une puissance électrique de 68 W à partir d'une puissance lumineuse de 400 W est :

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

$$\eta = \frac{68}{400}$$

$$\eta = 0,17 = 17 \%$$

Les capteurs exploités actuellement sont en silicium et à jonction simple. Leur rendement est assez faible, de l'ordre de 20 %, et diminue d'environ 1 % par an. De plus, la théorie montre que le rendement de ces capteurs ne peut dépasser la valeur limite de 31 % car une partie du rayonnement solaire est systématiquement perdue par transformation en chaleur.

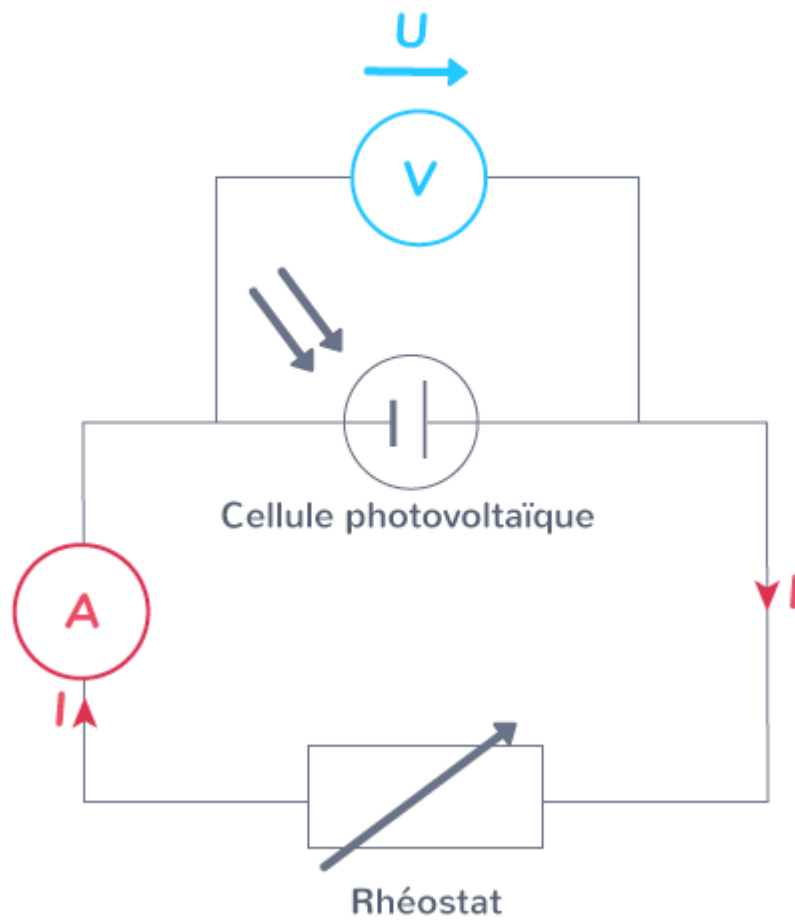
D Les propriétés électriques des cellules photovoltaïques

La caractéristique $I = f(U)$ d'une cellule photovoltaïque permet de déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée.

Pour tracer la caractéristique $I = f(U)$ d'une cellule photovoltaïque :

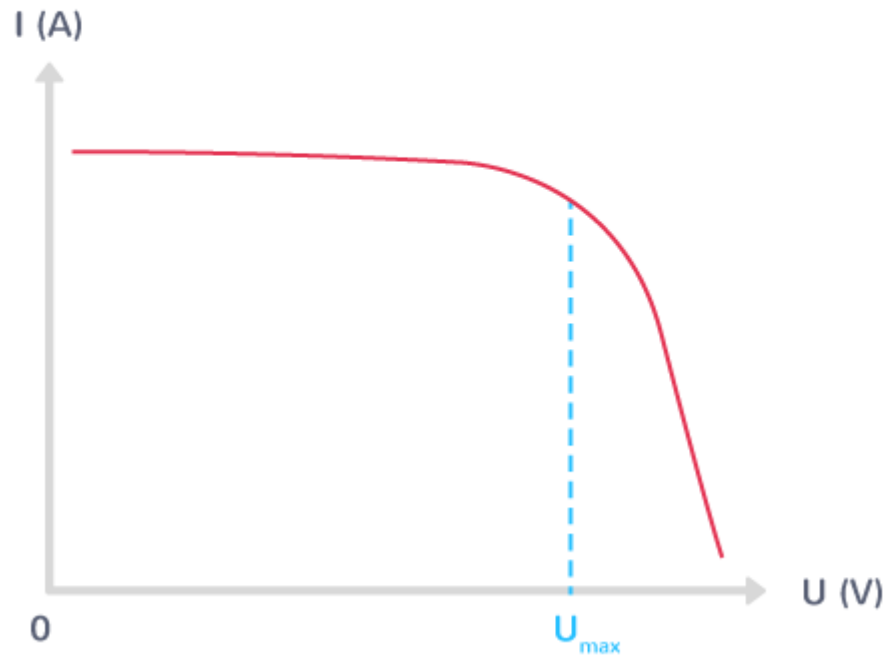
- on l'expose à un rayonnement lumineux ;
- on la relie à une résistance variable, appelée rhéostat ;
- on mesure la tension aux bornes de la cellule (avec un voltmètre) et l'intensité qu'elle délivre (avec un ampèremètre) pour différentes valeurs de la résistance du rhéostat.

**Circuit électrique permettant de tracer
la caractéristique d'une cellule photovoltaïque**



La caractéristique $I = f(U)$ montre qu'une cellule photovoltaïque délivre une intensité électrique quasi constante jusqu'à une certaine tension, notée U_{\max} , qui dépend de la nature du semi-conducteur utilisé :

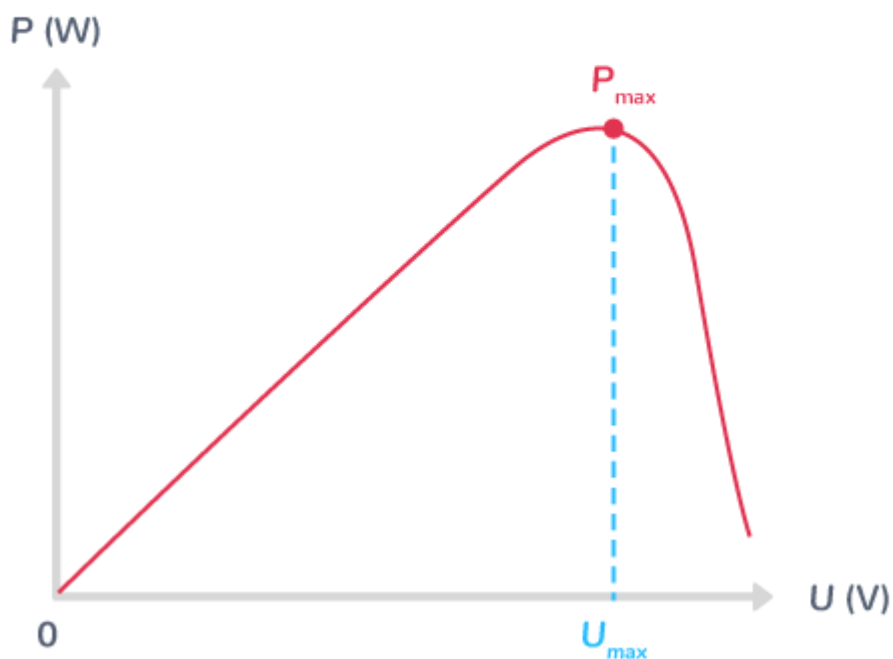
Caractéristique d'une cellule photovoltaïque



La formule donnant la puissance électrique fournie par la cellule photovoltaïque est : $P_{(W)} = U_{(V)} \times I_{(A)}$

Le graphique représentant la puissance électrique fournie en fonction de la tension montre que pour la valeur U_{max} , la puissance fournie est maximale :

Puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque



Pour maximiser la puissance électrique délivrée par la cellule photovoltaïque, la puissance reçue par la résistance doit être égale à la puissance P_{\max} :

$$P_{\text{reçue}} = P_{\max}$$

Il est ainsi possible de déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée. En effet, lorsqu'une résistance est associée à une cellule photovoltaïque, la puissance que reçoit et dissipe une résistance électrique a pour expression :

$$P_{\text{reçue}} = U \times I = R \times I \times I = R \times I^2$$

On a donc :

$$R \times I^2 = P_{\max}$$

La valeur de la résistance est alors :

$$R = \frac{P_{\max}}{I^2}$$

EXEMPLE

On souhaite alimenter une résistance avec une cellule photovoltaïque qui délivre une puissance maximale de 270 W avec une intensité de 150 mA.

La résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée est alors :

$$R = \frac{P_{\max}}{I^2}$$

$$R = \frac{270}{(150 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$R = 1,2 \cdot 10^4 \, \Omega$$