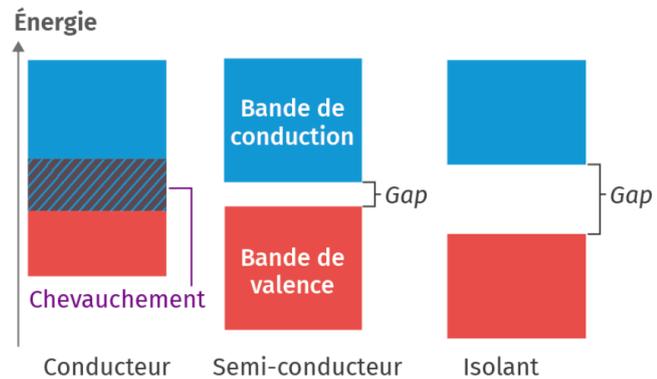


1. CONDUCTEURS – SEMI-CONDUCTEURS - ISOLANTS

1.1. Bandes d'énergie

Le comportement électrique des conducteurs, des semi-conducteurs et des isolants est modélisé par la théorie des bandes énergétiques.

Selon ce modèle, les niveaux d'énergie des électrons périphériques des atomes d'une structure cristalline forment des bandes d'énergie : les électrons de la bande de valence (BV) servent aux liaisons entre les atomes, **seuls les électrons de la bande conduction (BC) peuvent servir à conduire le courant.**



Pour les conducteurs, les bandes de valence et de conduction se chevauchent. Ainsi, certains électrons sont libres d'évoluer dans la structure cristalline (cas des métaux).

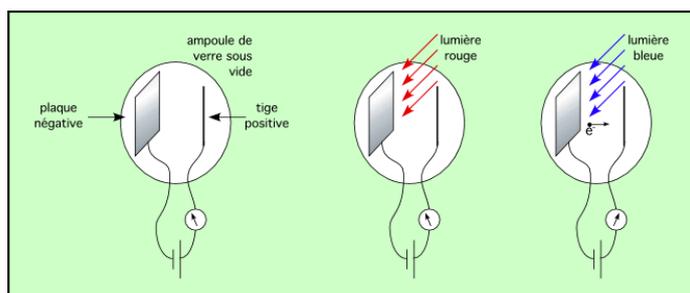
En revanche, **pour les semi-conducteurs et les isolants, les bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite (Gap).** La différence entre semi-conducteur et isolant est due à la valeur énergétique E_{Gap} de cette bande interdite, voisine de 1 eV pour les semi-conducteurs et de 6 eV pour les isolants.

Remarque : L'électronvolt (eV) est une unité d'énergie : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

1.2. Interaction de la lumière avec la matière.

L'effet photoélectrique découvert par Hertz (1887)

On place dans une cellule de verre sous vide, une plaque et une tige métalliques qui ne se touchent pas. La plaque est connectée au pôle négatif d'une pile, la tige au pôle positif. Un ampèremètre est placé en série dans le circuit. Lorsqu'on éclaire la plaque avec une lumière rouge, si intense soit-elle, il ne se passe rien. Si on éclaire avec une lumière bleue, un courant passe !



Hertz est perplexe !

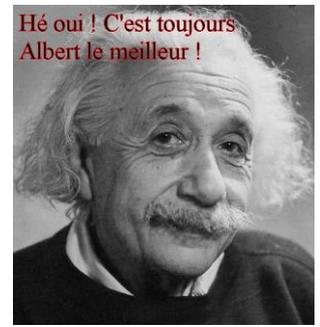
Voir [animation](#) Voir [expérience de cours avec l'électroscope](#).

Cette expérience est inexplicable en utilisant la physique classique.

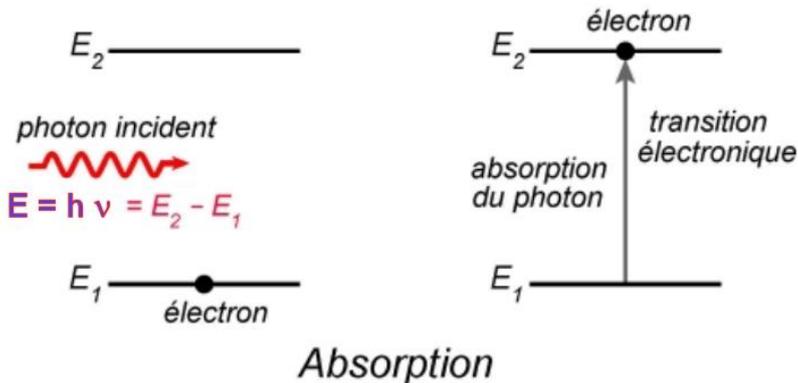
Einstein explique l'effet photoélectrique (1905)

La lumière est constituée de particules appelées photons ayant une énergie quantifiée $E = h\nu$

Unités : l'énergie E (en J), la constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s , la fréquence de la lumière « nu » ν (en Hz).



Soit un électron qui est dans un état d'énergie E_1 . Si un photon lui apporte exactement l'énergie correspondante à la différence d'énergie avec un état E_2 , alors le photon est absorbé par l'atome, et l'électron effectue une transition.



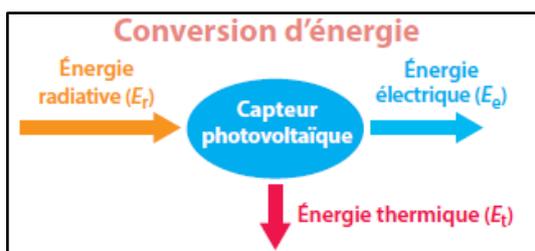
Application

Un photon bleu a une fréquence $\nu_{\text{bleu}} = 6,7 \cdot 10^{14}$ Hz, calculer son énergie E_{bleu} en joules puis en eV
Calculer l'énergie E_{rouge} un photon rouge de fréquence $\nu_{\text{rouge}} = 420$ THz. Convertir en eV

Si cette énergie est supérieure au E_{Gap} d'un semi-conducteur alors ce matériau absorbe ce photon, il lui donnera assez d'énergie pour le monter dans la bande de conduction et permettre à cet électron de produire un courant électrique.

2. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique. Comment fonctionnent-elles ?



2.1. Fonctionnement

L'effet photovoltaïque est le processus par lequel deux matériaux différents en contact étroit produisent une tension électrique lorsqu'ils sont frappés par la lumière. Contrairement à l'effet photoélectrique, les électrons ne sont pas éjectés mais ils passent d'un matériau à l'autre. Cet effet peut être observé dans les semi-conducteurs.

2.2. Les matériaux pour faire des cellules photovoltaïques

Un réseau monocristallin d'atomes de silicium, **Si**, est un semi-conducteur.

L'atome de silicium ayant quatre électrons de valence, il établit quatre liaisons covalentes avec quatre atomes voisins. Un semi-conducteur au silicium a une conductivité du courant quasi nulle. Afin d'augmenter sa conductivité, on insère dans la structure cristalline des atomes d'autres éléments, appelés dopants.

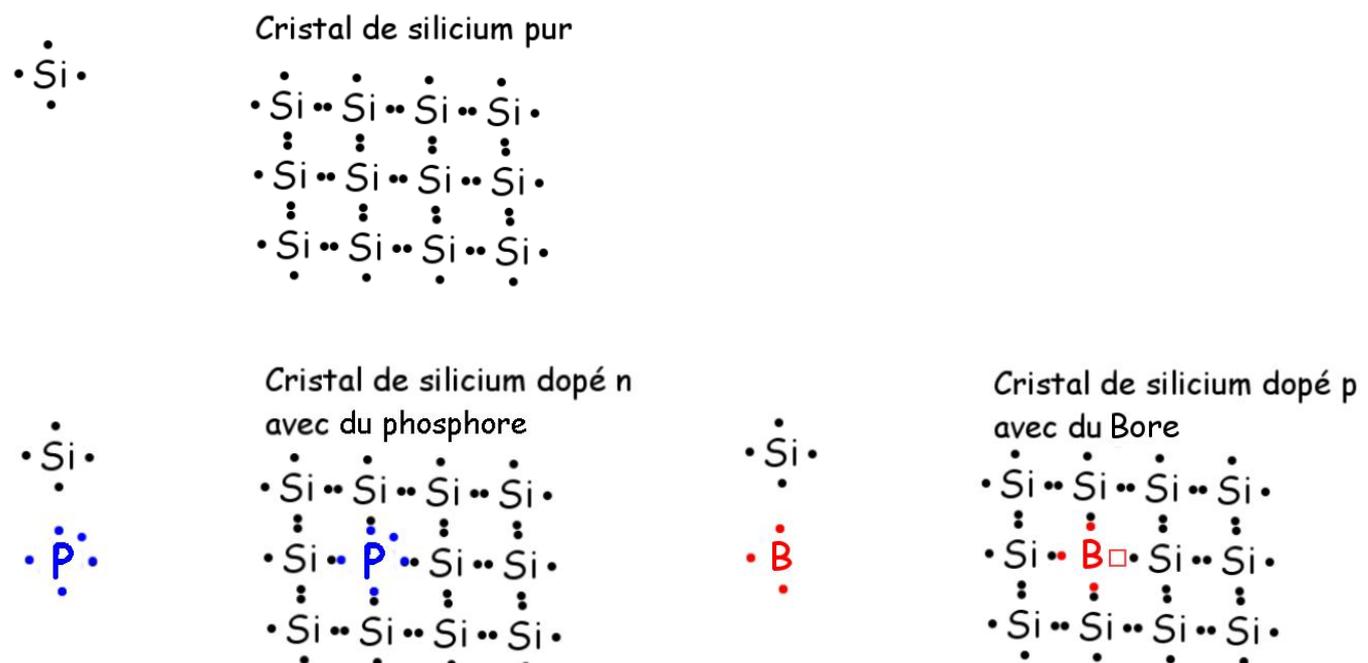
Pour un semi-conducteur au silicium dopé au phosphore, un atome de phosphore, **P**, remplace un atome de silicium dans le réseau.

L'atome P ayant cinq électrons de valence, il forme quatre liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins ; il reste un électron libre qui peut participer à la conduction électrique.

L'atome de phosphore étant donneur d'électron, on parle de dopage de type n (n pour négatif).

- Par un raisonnement analogue, un atome dopant possédant trois électrons de valence, comme le bore **B**, conduit à un déficit d'électron de valence dans le réseau, appelé trou. Ce trou peut être comblé par un électron de valence d'un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. L'atome de bore étant accepteur d'électron, on parle de dopage de type p (p pour positif).

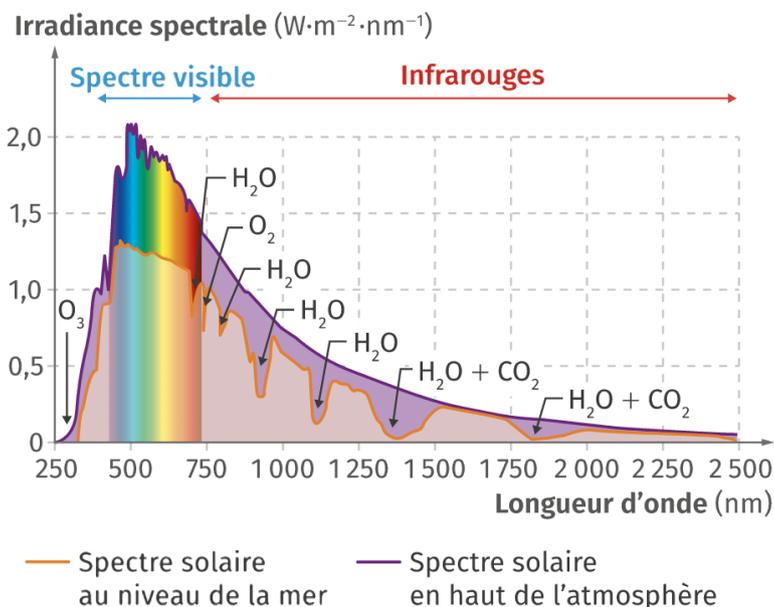
Les éléments dopants génèrent des niveaux d'énergies dans la bande interdite ce qui diminue le gap et donc l'énergie nécessaire pour passer dans la bande de conduction. On peut alors créer des nouveaux matériaux qui auront des propriétés électriques améliorées.



Remarque : Le Silicium est le 2^{ème} élément le plus abondant sur Terre mais pour les cellules solaires il faut le raffiner à une très haute pureté ce qui est une opération complexe. La Chine produit 71% du silicium dans le monde, la France 3%.

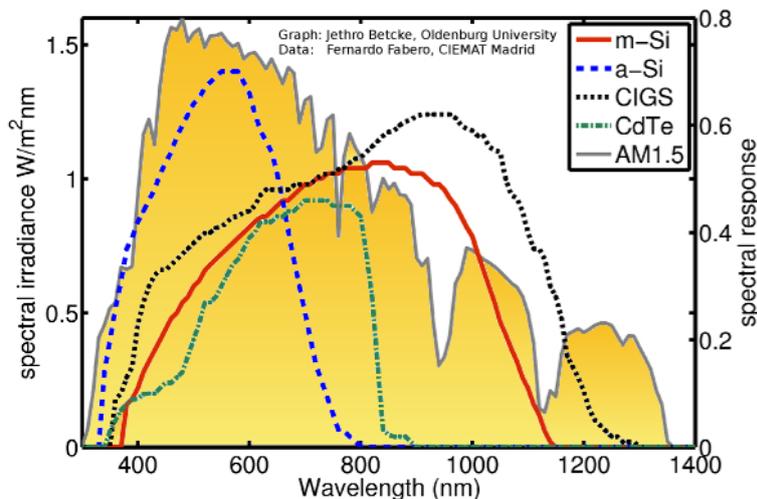
2.3. Choix des semiconducteurs

Le meilleur matériau sera celui qui absorbera le mieux les rayonnements que le Soleil émet :



La capacité d'absorber le rayonnement solaire dépend de la nature du semi-conducteur. Le graphique ci-contre montre les différentes réponses spectrales de différentes technologies solaires comparé à la puissance de la lumière du soleil de différentes longueurs d'onde au niveau de la mer à des latitudes moyennes de la Terre (appelée AM1.5).

Le silicium monocristallin (marqué m-Si) est comparé à différentes technologies solaires à couches minces basées sur le silicium amorphe (a-Si), le sélénure de cuivre-indium-gallium (CIGS) et le tellure de cadmium (CdTe) :



2.4. Rendement

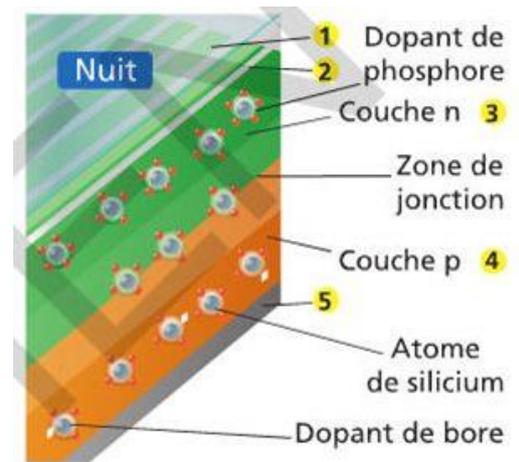
Le rendement énergétique moyen d'une cellule photovoltaïque est de l'ordre de 20 %.

Application :

Sachant qu'en Lorraine l'irradiance solaire moyenne annuelle est de 1100 kWh/m², quelle énergie va me fournir 6 m² de panneaux photovoltaïques pendant une année ?

2.5. Fonctionnement (coin des experts)

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique d'épaisseur comprise entre 0,2 et 0,3 mm, et de 10 cm de côté environ. Elle est composée de cinq couches différentes : une couche antireflet **1**, deux couches conductrices (cathode en forme de grille **2** et anode compacte **5**) et deux couches de silicium dopée n **3** et dopée p **4**.

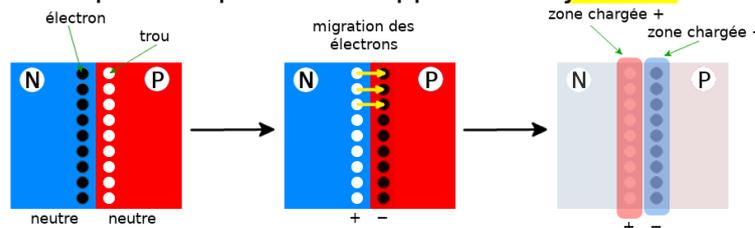


- La couche de silicium supérieure **3**, exposée au Soleil, est dopée avec des atomes de **phosphore** possédant **5 électrons périphériques**, soit 1 de plus que les atomes de silicium.

- La couche de silicium inférieure **4** est dopée avec des atomes de **bore** ayant **3 électrons périphériques**, soit un de moins que les atomes de silicium.

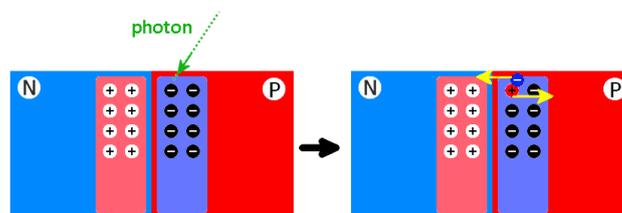
- La couche **3** est donc excédentaire en électrons et la couche **4** est déficitaire.

- Lorsque les deux couches sont mises en contact, les électrons en excès de la couche **3** diffusent dans la couche **4**. Ainsi, la couche **3** se charge positivement, tandis que la couche **4** se charge négativement. Un équilibre se crée et un champ électrique interne apparaît à la **jonction** des 2 couches.



Migration des électrons aux jonctions PN.

Le rôle du Soleil



Les photons du Soleil qui pénètrent dans la cellule photovoltaïque peuvent arracher des électrons aux atomes de silicium présents dans la **jonction**. Le champ électrique interne à la cellule entraîne les électrons libérés vers la couche **3** et la cathode **2** (-), où ils empruntent un circuit extérieur, générant ainsi un courant électrique qui alimente, par exemple, une ampoule électrique. Les électrons rejoignent ensuite l'anode **5** (+), où ils se recombinaient avec des trous (charges +) de la couche **4**.

Plus le nombre de photons absorbés est important, plus le nombre d'électrons libérés, et donc le courant généré, est important. Les cellules sont regroupées en modules formant des panneaux solaires. Aujourd'hui, les rendements énergétiques moyens des panneaux solaires sont de l'ordre de 20 %.

