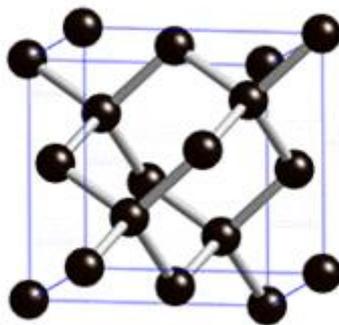


Les cellules photovoltaïques

1) Le silicium :

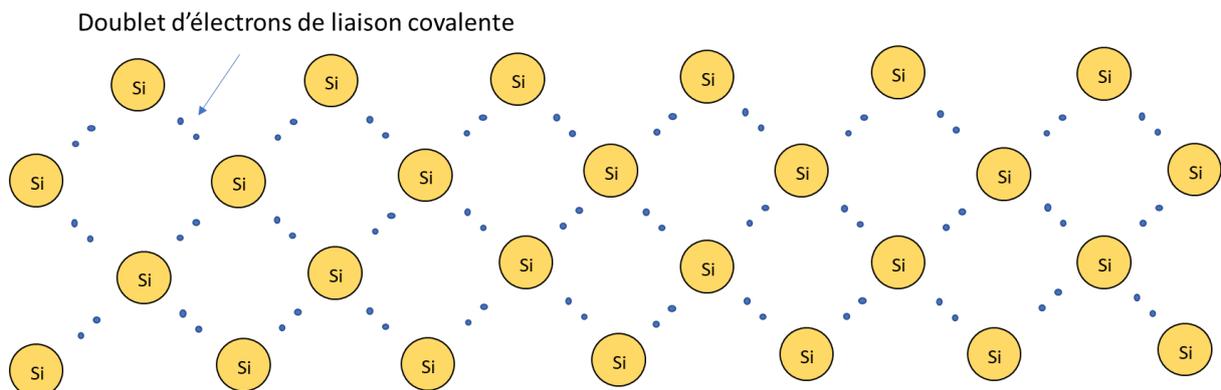
Le silicium est un élément très abondant sur Terre, le plus abondant après l'oxygène et représente environ un quart de la masse de la croûte terrestre. Il est extrait de la silice qui est le principal composant du sable et a une formule cristalline SiO_2

Après traitement pour le séparer de l'oxygène, par réduction avec du carbone dans un four électrique à 2000 K, il cristallise dans un système cubique à faces centrées incluant quatre atomes dans la maille situés au centre de tétraèdres, soit la même structure que le diamant.



Un atome de silicium, comme le montre la maille, échange des électrons avec 4 de ses voisins. On dit qu'il est de valence 4.

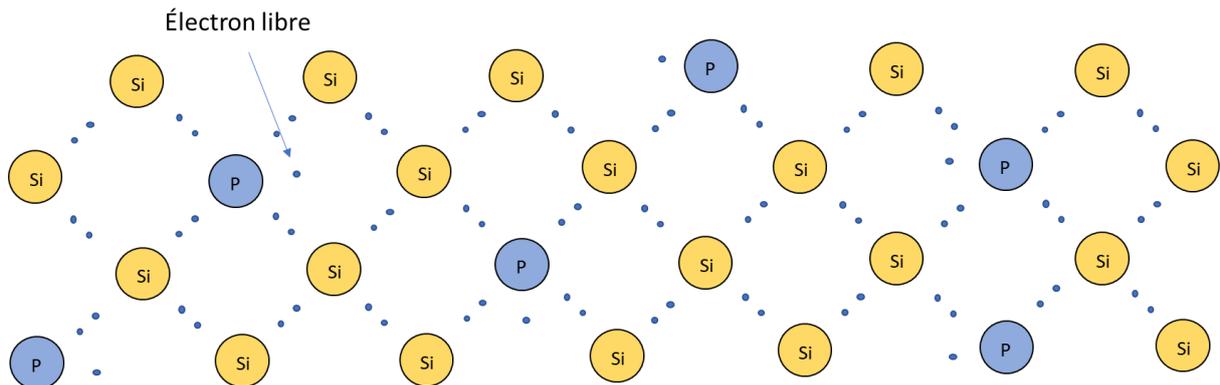
Afin de simplifier la description du principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, on convient de représenter en vue plane ce réseau de la façon (même si impropre) suivante :



2) La cellule photovoltaïque

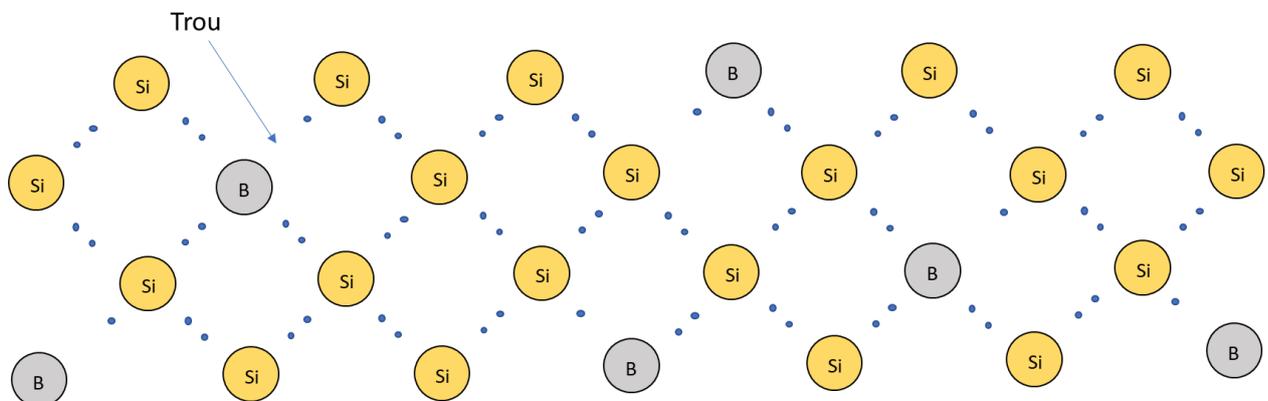
Afin de créer une cellule photovoltaïque, il va falloir créer deux types de couches. Une couche de silicium dopée N et une couche de silicium dopée P

Le dopage N consiste à introduire dans le réseau cristallin du silicium des atomes ayant une valence supérieure à celle du silicium, généralement des atomes pentavalents comme le phosphore qui possède 5 électrons sur sa couche externe. Toutefois, une fois inséré dans le réseau du silicium, il ne peut produire que 4 liaisons covalentes en mobilisant 4 de ses électrons. Il lui en reste donc un de libre. Voilà l'allure du cristal une fois le dopage effectué :



Des électrons non impliqués dans des liaisons covalentes peuvent donc circuler librement dans le cristal et être engagés dans la conduction du courant électrique.

Le dopage P consiste à introduire dans le réseau cristallin du silicium des atomes ayant une valence inférieure à celle du silicium, généralement des atomes trivalents comme le bore qui possède 3 électrons sur sa couche externe. Toutefois, une fois inséré dans le réseau du silicium, il ne peut produire que 3 liaisons covalentes en mobilisant 3 de ses électrons. Il y a donc un trou, c'est-à-dire, la possibilité d'accepter un électron pour établir la liaison covalente manquante :

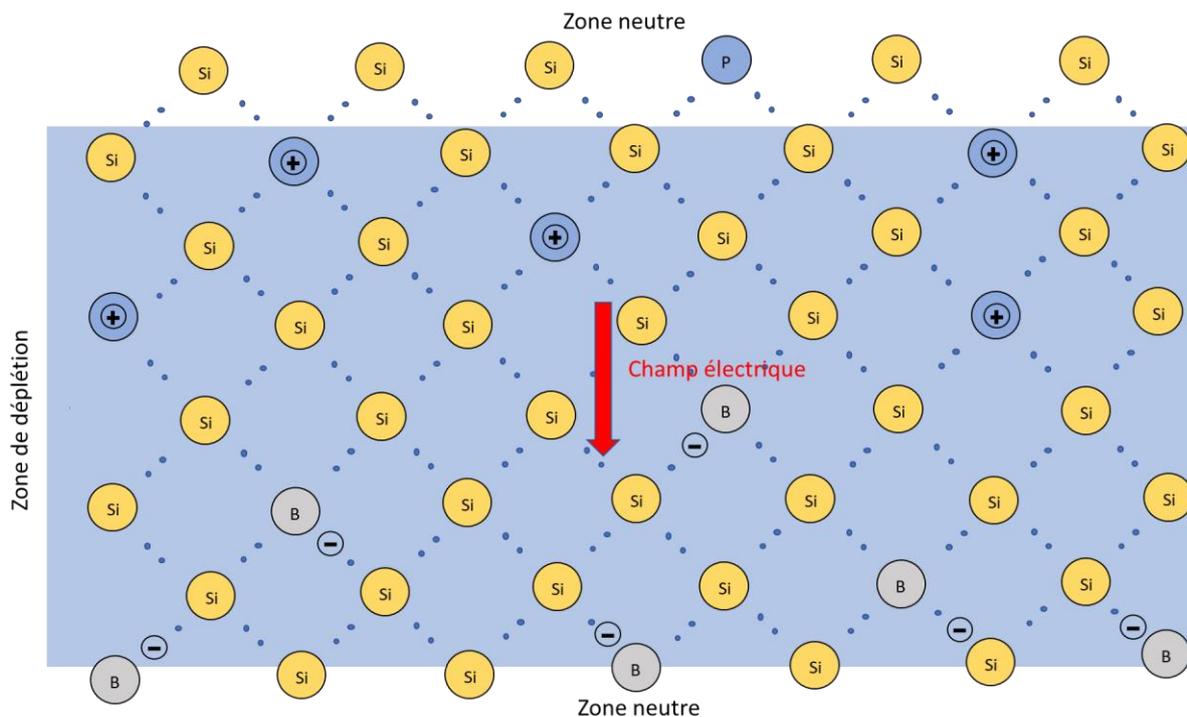


Le principe d'une cellule photovoltaïque consiste alors à accoler deux plaques de silicium, l'une dopée N, tournée face à la lumière solaire ou du jour et l'autre dopée P, plus épaisse, située de façon accolée juste en dessous.

Ce faisant, les électrons libres de la région dopée N située à la frontière entre les deux plaques tendent à diffuser dans la région voisine dopée P pour venir combler un trou et participer à une liaison covalente, ce qui est une évolution naturelle car dans la liaison covalente, un électron a une énergie plus basse que lorsqu'il est libre.

Il s'établit alors une zone de transition qualifiée de zone de déplétion ou zone de charge d'espace (ZCE), dépourvue d'électrons libres et de trous, mais chargée électriquement du fait des réassociations d'électrons libres d'atomes de phosphore avec des trous d'atomes de bore. Ces charges produisent dans cette zone un champ électrique \vec{E} , c'est-à-dire à dire que tout porteur de charge libre de se déplacer comme le serait un électron libre de cette zone, de charge $-e$, serait soumis à une force opposée à ce champ, d'expression mathématique :

$$\vec{F} = -e \vec{E}$$



Mais alors, puisqu'il n'y a pas de porteurs de charge libre dans cette zone de déplétion, comment faire pour qu'y apparaissent des électrons libres, qui se dirigeront vers la partie supérieure, là où il y a le plus de charges positives, créant ainsi une force électromotrice, ce qui est le propre d'une pile ? C'est précisément le rôle de la lumière de générer ces électrons libres, nous allons voir comment, après un détour vers les niveaux d'énergie des électrons dans les semi-conducteurs

3) Niveaux d'énergie dans un semi-conducteur

Albert Einstein est le premier à avoir apporté une réponse au mystère de l'effet photo-électrique, que nous résumons brièvement ici. Une plaque de zinc, éclairée même faiblement avec une lumière ultraviolette émet des électrons alors que ce n'est pas le cas si elle est éclairée avec de la lumière visible et, même avec une forte intensité. Albert Einstein fit l'hypothèse que la lumière ne peut être absorbée ou émise par les atomes que sous forme de quantités bien précises d'énergie qu'on appelle quanta, portés par des photons, et qui sont reliés à la couleur des rayonnements absorbés ou émis par la formule :

$$E = h \nu$$

où $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ SI}$ est la constante de Planck, ν la fréquence en Hertz de la radiation émise ou absorbée et E l'énergie du photon correspondant.

Un peu plus tard, l'observation des spectres de raie d'émission de l'hydrogène fit apparaître que ces quanta émis ou absorbés étaient la différence de quantités dépendant de nombres entiers qu'on a nommé niveaux d'énergie.

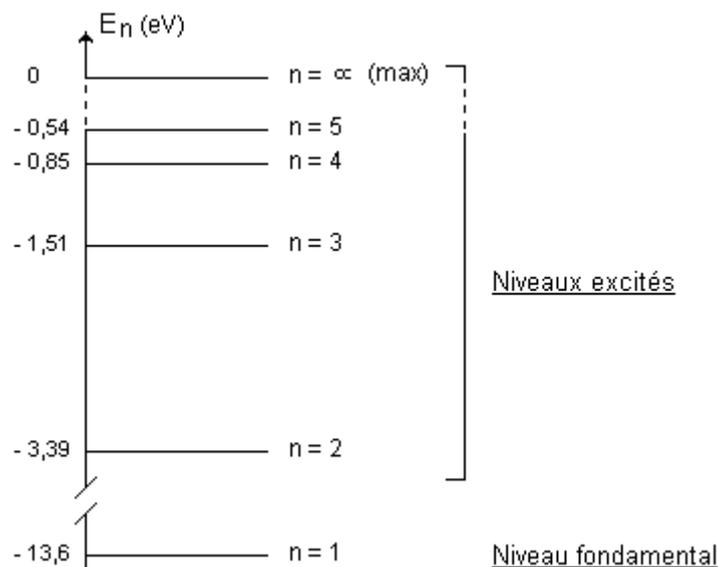
Ainsi, pour l'atome d'hydrogène, lorsqu'une radiation d'une couleur donnée, donc d'une fréquence donnée, est émise, la quantité $h \nu$ évaluée en électron-volt ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$), unité d'énergie plus pratique, se présente expérimentalement sous la forme :

$$h \nu = \frac{-13,6}{n^2} - \left(\frac{-13,6}{m^2} \right)$$

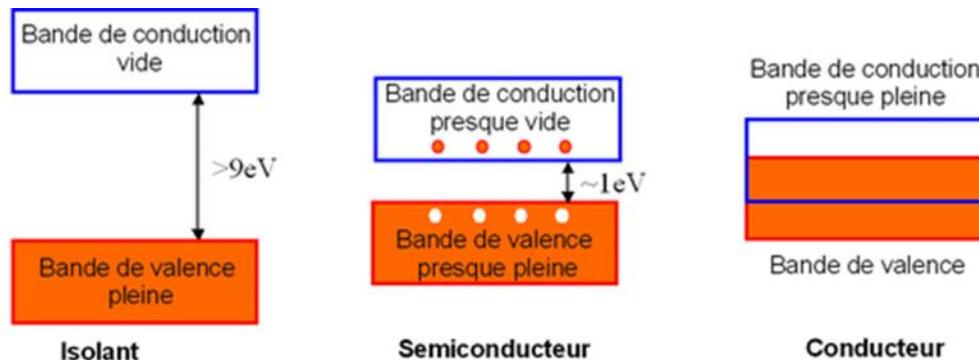
où n, m sont deux entiers naturels non nuls.

On interprète cela comme des transitions d'électrons d'un niveau d'énergie $E_1 = \frac{-13,6}{m^2}$ vers un niveau d'énergie $E_2 = \frac{-13,6}{n^2}$, un peu comme un satellite terrestre, pour pouvoir changer d'orbite, devrait recevoir ou perdre une quantité d'énergie mécanique (potentielle et cinétique).

Les niveaux d'énergie des électrons périphériques des atomes sont représentés dans un diagramme sous forme de barres horizontales, l'axe servant d'origine correspondant au niveau d'énergie nulle (c'est le plus élevé néanmoins car les niveaux d'énergie sont négatifs). Pour l'hydrogène, cela donne



Les niveaux d'énergie se regroupent par bandes pour certains types d'atomes et font apparaître deux ou trois types de bandes.



Pour les isolants et les semi-conducteurs comme le silicium, il y a deux bandes bien séparées :

- La bande de valence : elle contient les électrons impliqués dans les liaisons entre atomes
- La bande de conduction : elle contient les électrons libres, donc susceptibles d'être déplacés pour former un courant électrique

Entre ces deux bandes, il y a une bande interdite. Dans le cas d'un isolant, la largeur de cette bande appelée gap, est telle, qu'il est impossible pour un électron de la bande de valence de pouvoir se retrouver dans la bande de conduction après avoir absorbé un photon ou sous l'effet de l'agitation thermique. En revanche pour un semi-conducteur, le gap entre les deux bandes étant plus petit, quelques électrons de la bande de valence peuvent sauter dans la bande de conduction, le rendant de ce fait partiellement conducteur, d'où l'appellation de semi-conducteur.

Dans un conducteur, il n'y a pas de bande interdite. Bandes de valence et bande de conduction se chevauchent, ce qui fait que la probabilité de trouver des électrons dans la bande de conduction est bien plus élevée et rend le matériau conducteur.

Dans le cas du silicium cristallin utilisé dans les cellules photo-électriques, le gap d'énergie (largeur de la bande interdite) est de 1,12 eV. On peut alors calculer la fréquence minimale que doit avoir une radiation lumineuse pour pouvoir amener un électron de la bande de valence à la bande de conduction et en faire ainsi un électron libre en posant :

$$h \nu = 1,12 \times 1,6 \times 10^{-19}$$

soit :

$$\nu = \frac{1,12 \times 1,6 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} = 2,7 \times 10^{14}$$

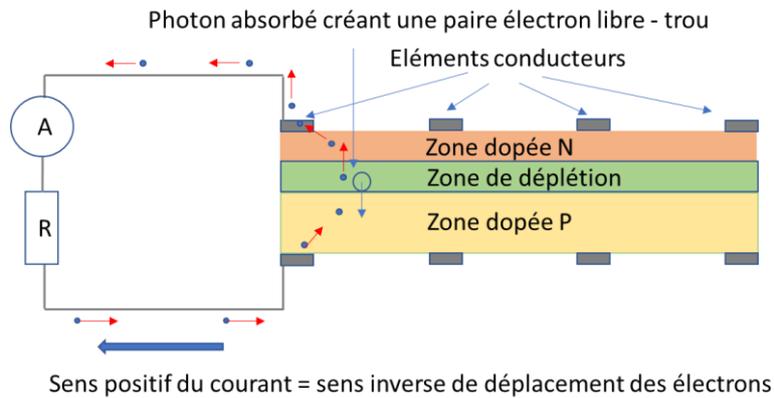
Cela correspond à une longueur d'onde dans le vide de :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{2,7 \times 10^{14}} = 1,11 \times 10^{-6} \text{ m} = 1110 \text{ nm}$$

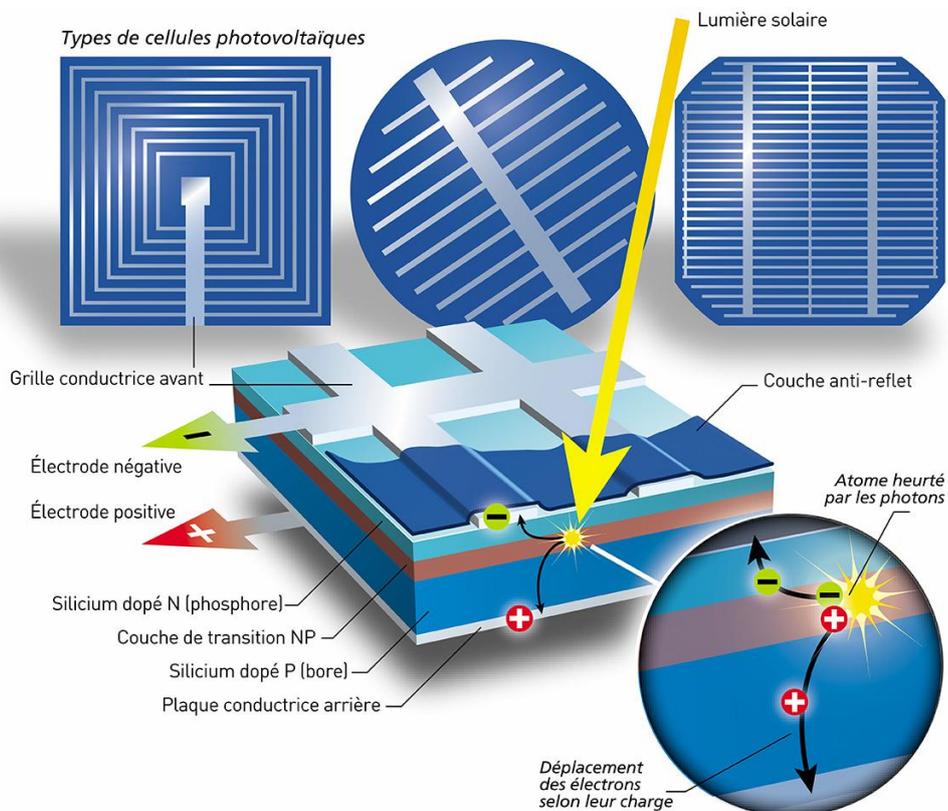
Rappelons que le spectre de la lumière visible va de 400 à 800 nm. Les photons absorbés dans ce domaine ont une énergie supérieure à 1,12 eV. Il sont donc aptes à faire passer des électrons d'un cristal de silicium dopé P ou dopé N de la bande de valence à la bande de conduction.

4) Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en générateur de courant continu.

Adoptons un modèle plus schématisé d'une cellule photovoltaïque, en y incluant des éléments conducteurs sur les surfaces supérieures et inférieures du panneau et relier ces surfaces par un circuit électrique incluant un résistor et un ampèremètre.

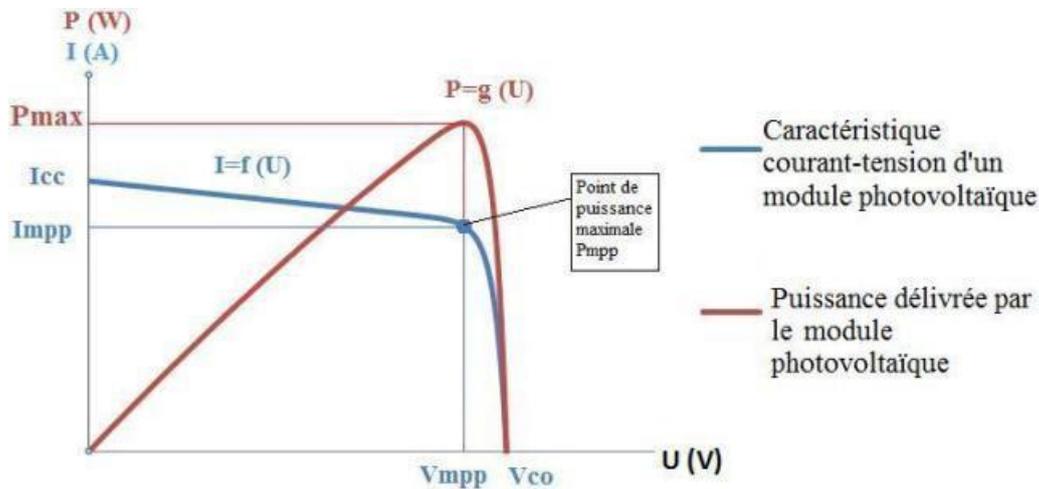


On constate, par l'ampèremètre, que le panneau produit un courant électrique continu sortant de la zone dopée P pour rejoindre, via le circuit, la zone dopée N. En intégrant un voltmètre aux bornes du panneau, on peut mesurer la puissance électrique que le panneau distribue au circuit.



5) Caractéristique d'un panneau photovoltaïque

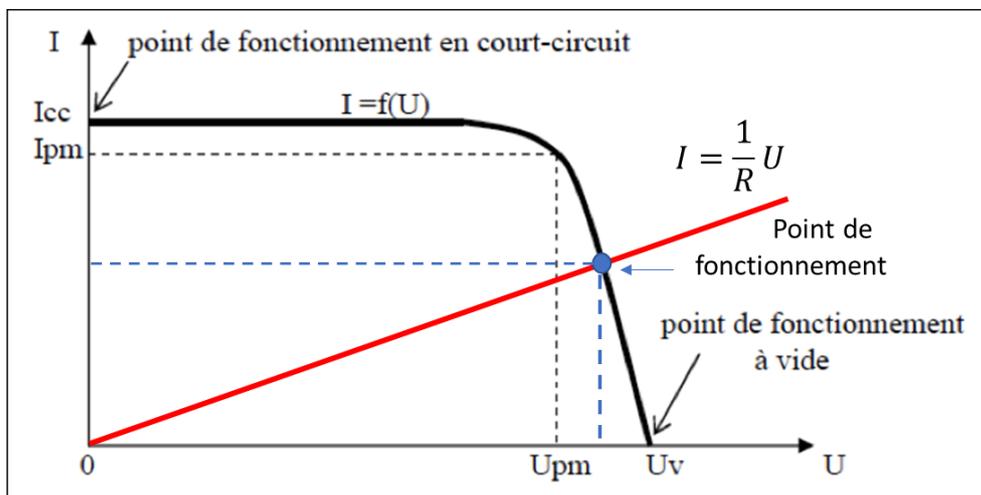
L'intensité et la tension délivrée par un panneau photovoltaïque dépend de la charge mise en série avec le panneau, résistance, appareil électrique, etc... Il faut veiller à bien adapter la charge au panneau, ou l'inverse, le panneau à la charge, en mettant plusieurs panneaux en série et en parallèle, afin d'optimiser le rendement de ce panneau, ce qui revient à maximiser, pour un panneau donné, la puissance qu'il délivre.



La puissance P délivrée par un panneau étant égale au produit tension intensité $U I$, la caractéristique fait apparaître le point de fonctionnement idéal, pour lequel le rectangle défini par les points de coordonnées $(0,0)$, $(U,0)$, (U,I) , $(0,I)$ a une aire maximale. On peut aussi, comme sur le graphique ci-dessus, porter la fonction puissance délivrée en fonction de la tension $P = g(U)$.

I_{cc} est l'intensité de court-circuit, c'est-à-dire l'intensité mesurée si on relie les bornes du panneau directement entre elle.

Pour connaître le point de fonctionnement du panneau avec un appareil donné, il suffit de porter la caractéristique de l'appareil sur celle du panneau. L'intersection des deux courbes est alors le point de fonctionnement qui n'est pas forcément le point idéal. Un exemple avec un résistor de résistance R pour lequel la caractéristique est donnée par la loi d'Ohm $U = R I$ soit $I = 1/R U$.



Le point de fonctionnement en court-circuit correspond s'obtient avec une résistance nulle et celui de fonctionnement à vide correspond à une résistance très grande (on dit souvent infinie en exagérant). Dans ces deux cas, la puissance délivrée est nulle.