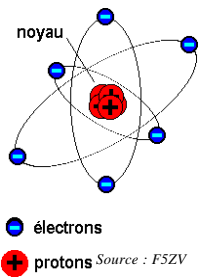


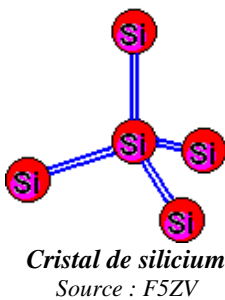
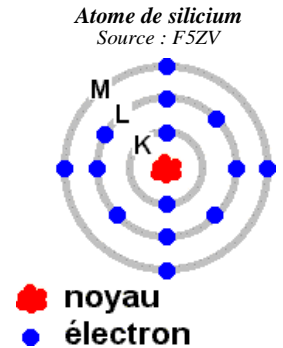
## Introduction :



La matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse se compose de molécules qui sont des groupements d'atomes.

Conventionnellement on représente l'atome comme constitué d'électrons gravitant autour d'un noyau, comme le feraient des satellites autour d'une planète. Le noyau est constitué de protons et de neutrons. La charge électrique du neutron est nulle. Le proton a une charge positive égale en valeur absolue à celle de l'électron qui lui, est négatif. A son état normal un atome est électriquement neutre, le nombre d'électrons étant égal au nombre de protons.

Les électrons, de charge négative, sont répartis par couches. Chaque couche ne peut comporter qu'un nombre limité d'électrons. Par exemple la couche K qui est la plus proche du noyau est saturée avec 2 électrons. C'est sur la couche la plus à l'extérieur (couche de valence) que les électrons ont le moins d'attraction avec le noyau, ce qui permet les liaisons avec les atomes voisins autorisant la cohésion de la matière. La couche de valence de la plupart des atomes n'est pas complète (sauf pour les gaz rares), elle peut ainsi accepter (provisoirement) des électrons, ou éventuellement en perdre. C'est le cas lors de l'ionisation d'un atome. La figure ci-contre représente dans un plan les 14 électrons d'un atome de silicium gravitant autour du noyau composé de 14 protons et 14 neutrons. Les atomes sont susceptibles de se charger électriquement en gagnant ou en perdant un ou plusieurs électrons : on parle alors d'ions. Si un atome gagne un ou plusieurs électrons, la charge de l'atome devient négative (anion), et s'il en perd, la charge de l'atome devient positive (cation).



Dans le cristal de silicium (un cristal est un solide formé d'atomes régulièrement disposés et fermement liés les uns aux autres), chaque atome est lié à 4 atomes voisins avec lesquels il partage les quatre électrons de sa couche M. La répartition étant régulière on peut considérer qu'un atome est au centre d'un tétraèdre et que ses 4 voisins sont placés au sommet de ce tétraèdre.



Cellule PV polycristalline  
Source : Wikipédia

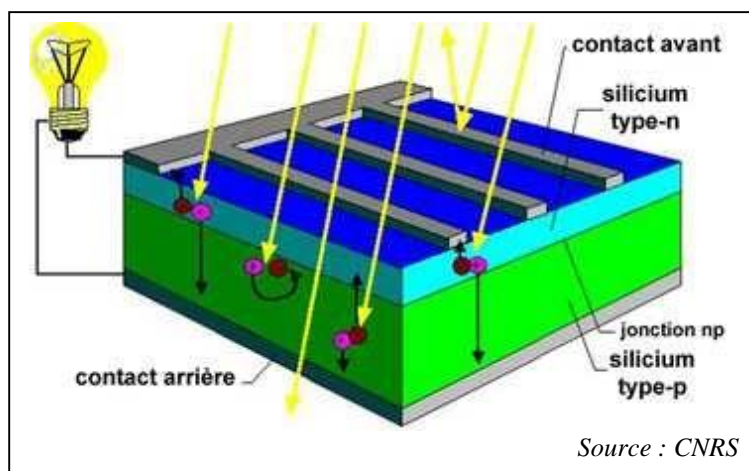
Les semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le silicium est un semi-conducteur.

Conduction intrinsèque : Lorsque la température s'élève, sous l'effet de l'agitation thermique, des électrons réussissent à s'échapper et participent à la conduction. Ce sont les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau qui s'impliquent dans les liaisons covalentes. Dans le cristal, ces électrons se situent sur des niveaux d'énergie appelée *bande de valence*. Les électrons qui peuvent participer à la conduction possèdent des niveaux d'énergie appartenant à la *bande de conduction*. Entre la bande de valence et la bande de conduction peut se situer une *bande interdite*. Pour franchir cette bande interdite l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon...). Pour les isolants la bande interdite est quasi infranchissable, pour les conducteurs elle est inexistante. Les semi-conducteurs ont une bande interdite assez étroite. L'atome qui a perdu un électron devient un ion positif et le *trou* ainsi formé peut participer à la formation d'un courant électrique en se déplaçant.. Si l'électron libre est capté par un atome, il y a *recombinaison*. Pour une température donnée, ionisation et recombinaison s'équilibrent ; la résistivité diminue quand la température augmente. Un semi-conducteur dont la conductivité ne doit rien à des impuretés est dit *intrinsèque*. En revanche, le fait de rajouter des impuretés (dopage), la conductivité du semi-conducteur est *extrinsèque*.

### Principe de fonctionnement

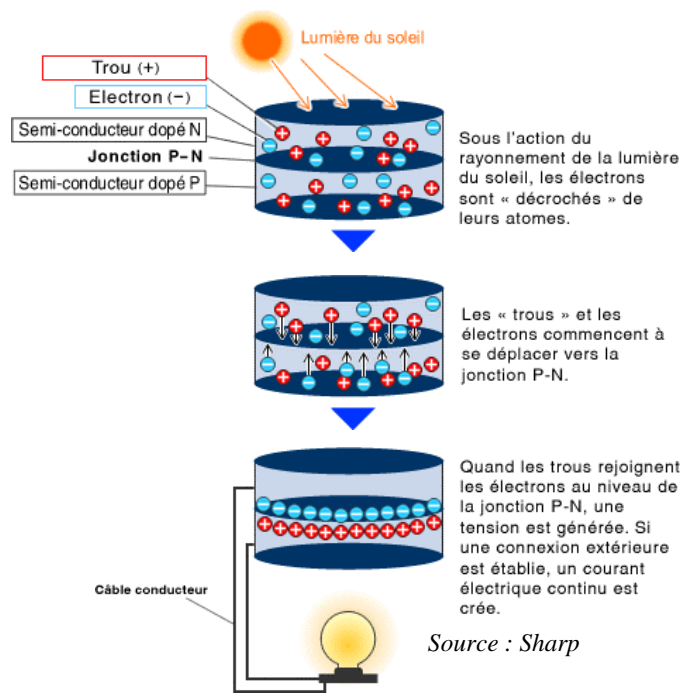
L'**effet photovoltaïque** utilisé dans les **cellules solaires** permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'**électrons** et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès

dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une **jonction PN** a été formée.



Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.



**Association de cellules : le panneau solaire (Extrait d'un cours magistral de Stéphane ASTIER Professeur des Universités- INPT-ENSEEIH)**

Dans un groupement de  $n_s$  cellules en série, toutes sont traversées par un même courant. La Figure 7 montre la caractéristique résultante ( $I_{sc}$ ,  $V_{sc}$ ) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour  $n_s$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant :  $V_{sc} = n_s * V_{co}$ .

Pour un groupement de  $n_p$  cellules identiques en parallèle (fig. 8) :  $I_{pcc} = n_p * I_{cc}$

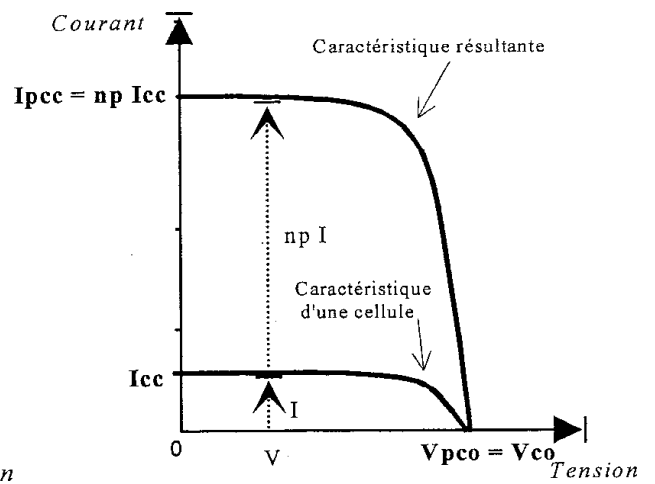
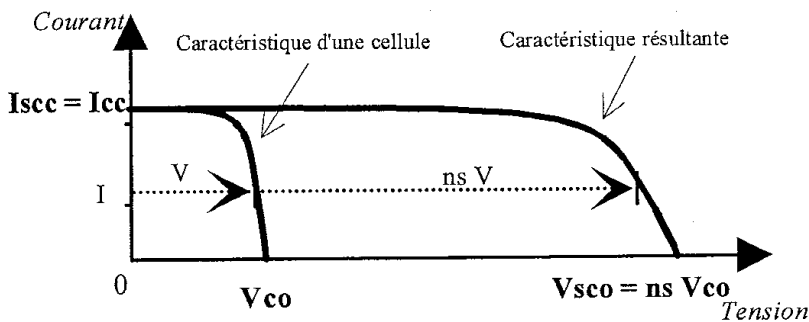


Figure 7 et 8 : caractéristiques de groupements série ou parallèle de cellules photovoltaïques identiques

En revanche en cas de déséquilibre, tel n'est plus le cas. Particulièrement, dans un groupement série, la cellule de plus faible courant photovoltaïque impose celui-ci à l'ensemble du groupement, une propriété qui peut pénaliser très fortement la conversion globale si elle n'est pas prise en compte.

Dans certaines conditions d'éclairement non uniforme et de fonctionnement proche du court-circuit, une cellule du groupement série peut même être soumise à la tension des (ns-1) autres cellules appliquée en inverse et ainsi fonctionner en récepteur en dissipant une puissance importante qui peut la détruire si la contrainte thermique est trop forte ou si la tension d'avalanche est dépassée. Pour éviter cela, il faut disposer une diode Dp connectée en parallèle, appelée "diode by-pass", aux bornes d'un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum. L'amorçage spontané de cette diode parallèle, dès apparition d'une tension en inverse aux bornes du groupement limite cette dernière à la valeur Vd de la tension directe de conduction de la diode choisie et la puissance dissipée à Vd.Is. Des modules commercialisés incluent maintenant ces diodes parallèles de protection contre les tensions inverses. De façon duale, une diode anti-retour Dr doit protéger des voies en parallèle des courants inverses. Finalement la Figure 10 montre le câblage typique d'un réseau de cellules ou de modules photovoltaïques munis de ces diodes protections.

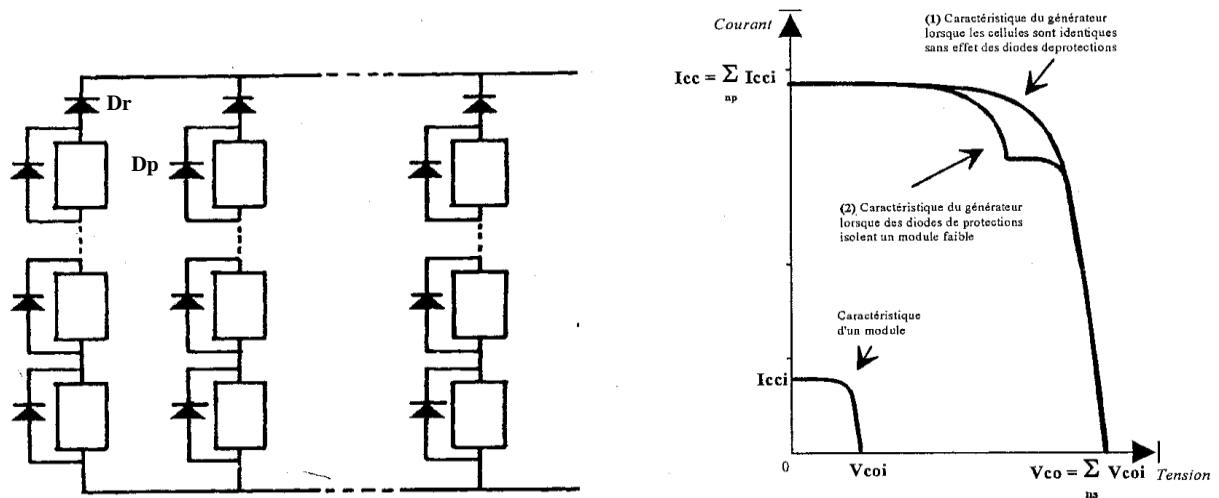
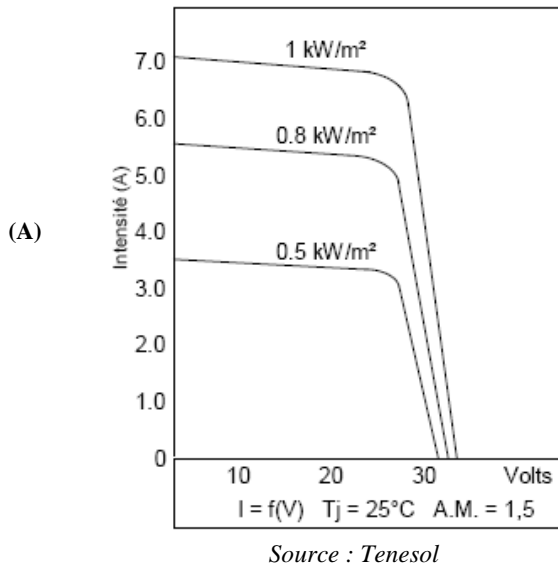


Figure 10 et 11: câblage série / parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protection. Caractéristiques d'un générateur à  $np \times ns$  cellules en parallèle et série identiques. Effet des diodes de protection avec cellules faibles

La caractéristique électrique globale courant / tension d'un générateur photovoltaïque se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des  $ns \cdot np$  cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $ns$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $np$  parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure 11,  $ns$  et  $np$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

## Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

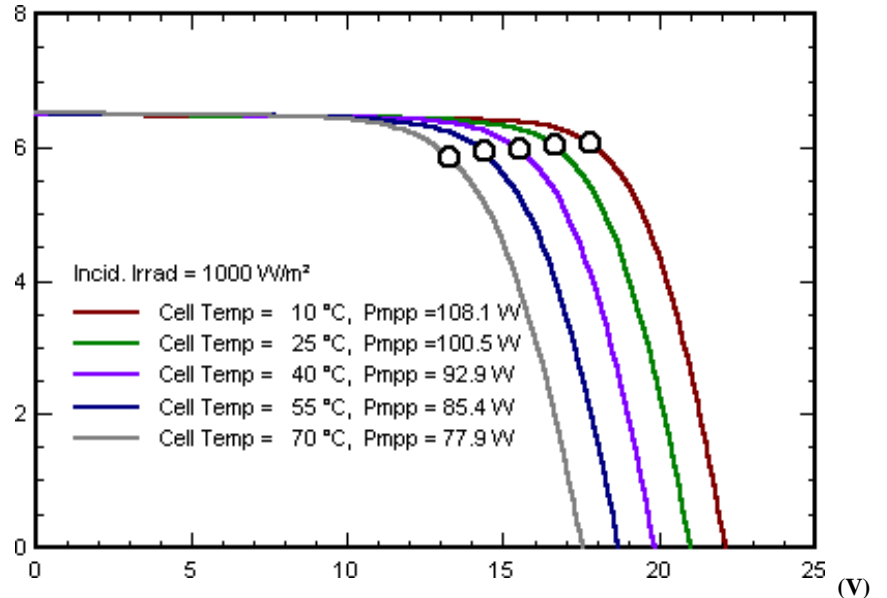
### Caractéristiques $I=f(U)$



Réseau de caractéristique  $I=f(U)$  suivant un éclairement variable (pour un température de jonction de  $25^{\circ}\text{C}$  et une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5.

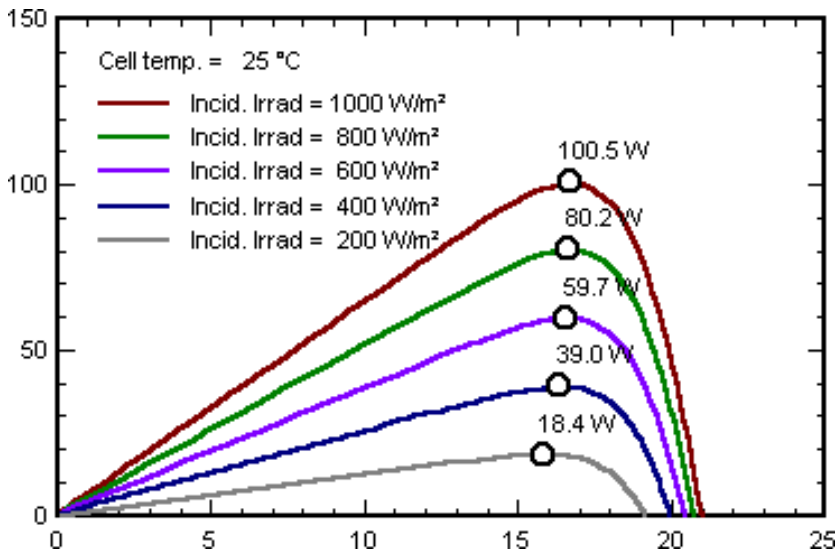
### Effet de la température :

Caractéristiques courant – tension  $I=f(V)$  d'un panneau PV à éclairement constant en fonction de la température – Source Ecosystèmes



### Caractéristiques $P=f(U)$

Courbes de puissance en fonction de la tension aux bornes d'un panneau PV Source Ecosystèmes



**La puissance crête d'une cellule PV, notée  $W_c$  (Watt crête) ou  $W_p$  (Watt peak),** représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :

- éclairement solaire de  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$  ;
- température de la cellule PV égale à  $+ 25^{\circ}\text{C}$ .
- Masse d'air AM 1,5

### Utilisation optimale d'une cellule, détermination du MPPT (Maximum Power Point Tracking)

De la caractéristique courant-tension on peut déduire la caractéristique de la puissance électrique générée par la cellule en fonction de la tension à ses bornes. Il existe une valeur de photo courant correspondant à une tension aux bornes de la cellule pour laquelle cette puissance électrique générée est optimum. Ce point s'appelle le MPPT (Maximum Power Point Tracking)

