

Energie solaire photovoltaïque

Chapitre 4 : Énergie Solaire Photovoltaïque

Définitions et fonctionnement

Le mot « **photovoltaïque** » est la combinaison de deux mots : « **photo** », mot d'origine grecque qui signifie lumière : et « **voltaïque** », qui vient de « volt » et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique.

Les systèmes photovoltaïques sont basés sur les cellules pour convertir les radiations solaires en électricité.



Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (le silicium).

Cet effet met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés :

- l'absorption de la lumière dans le matériau
- le transfert d'énergie des photons aux charges électriques
- la collecte des charges.

1- l'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- La réflexion : la lumière est envoyée par la surface de l'objet
- La transmission : la lumière traverse l'objet
- L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'est ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

L'énergie d'un photon est donnée par :

$$E = h \times \nu = h \times \frac{C}{\lambda}$$

Avec : h : constante de Planck ($6.62.10^{-34}$ J.s)

ν : Fréquence(Hz)

C : vitesse de la lumière (3.108m/s)

λ : Longueur d'onde (m).

2- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Comment l'énergie lumineuse est-elle convertie en électricité?

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous le rayonnement solaire sont des électrons, charges négatives élémentaires contenus dans la matière semi conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons vont absorber leur énergie aux électrons périphériques, ce qui leur permet de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur.

3- La collecte des charges

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

Le matériau semi-conducteur comporte deux couches, 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**.

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.

Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composantes électroniques qui transforment les rayons lumineux du soleil en électricité.

Ces cellules ont des puissances unitaires assez faibles (de l'ordre de 1 W).



Procédé de fabrication de la cellule photovoltaïque

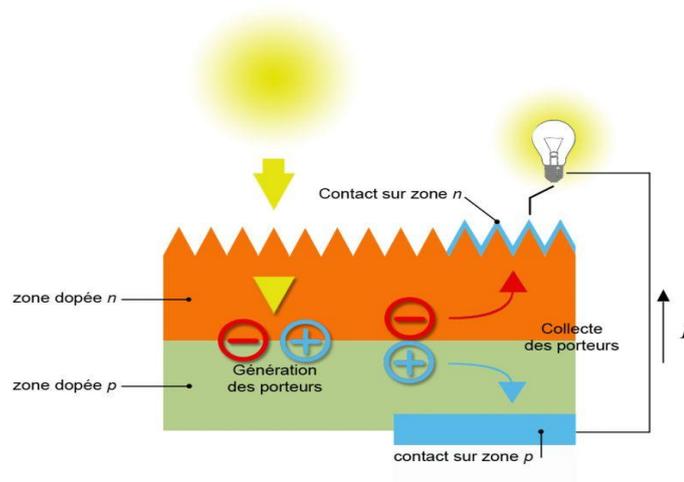
Les cellules photovoltaïques sont généralement réalisées à base de silicium cristallin, soit tranchées à partir de lingots, soit sous forme de rubans de **silicium**, soit en couches minces déposées sur un support à bas-coût.



Principe d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont composées de plusieurs couches.

- La couche supérieure est composée de silicium dopé par un élément contenant plus d'électrons que lui. Cette couche contient donc plus d'électrons qu'une couche de silicium pur, cette couche est appelée. Semi-conducteur de type N.
- La couche inférieure est composée de silicium dopé par un élément contenant moins d'électrons que lui. La couche contient donc moins d'électrons qu'une couche de silicium pur, elle est appelée semi-conducteur de type P.
- La mise en contact de ces deux couches met en place une jonction PN qui permet le passage des électrons d'une couche à l'autre. Lorsque la lumière (les photons plus particulièrement) arrive sur le module photovoltaïque, il se crée un apport d'énergie qui vient arracher un électron de la couche N, qui vient ensuite se placer dans la couche P.

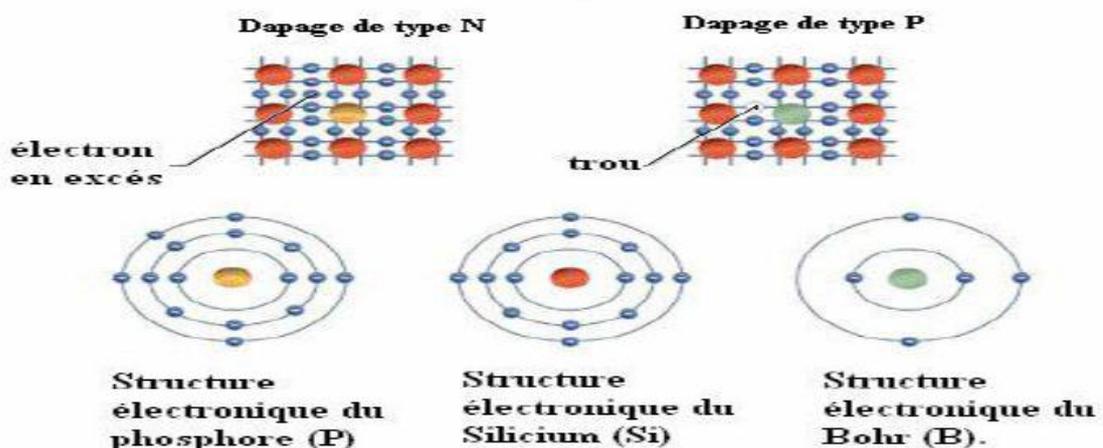


Dopage de type P, et de type N :

Il existe donc deux types de dopage :

- le dopage de **type N**, qui consiste à produire un excès d'électrons, qui sont **négativement** chargés ;
- le dopage de **type P**, qui consiste à produire un déficit d'électrons, donc un excès de trous, considérés comme **positivement** chargés.

Les schémas suivants présentent des exemples de dopage du silicium respectivement par du phosphore (dopage *N*) et du bore (dopage *P*). Dans le cas du phosphore (à gauche), un électron supplémentaire est amené. Dans le cas du bore (à droite), il manque un électron ; c'est donc un trou d'électron qui est amené.



Performances d'une cellule solaire

La performance d'une cellule solaire se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité.

$$\eta(\text{rendement}) = \frac{\text{la puissance produite}}{\text{la puissance du rayonnement capté}}$$

Il dépend essentiellement de **la puissance maximale** du panneau solaire, de **l'intensité de l'ensoleillement**, du **nombre d'heures** d'exposition, de **l'angle d'incidence des rayons** sur le panneau et de **la température**.

La température extérieure influence le rendement du panneau d'environ 15% ; plus il fait froid et mieux on pourra produire.

Le paramètre qui joue le plus est l'angle d'incidence des rayons lumineux: ils doivent arriver perpendiculairement au panneau.

Les cellules solaires les plus répandues dans le commerce ont un rendement de 15%.

Présentation des technologies photovoltaïque

Composition du panneau solaire

Le but des panneaux solaires est de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Ils sont composés de cellules photovoltaïques, on constate **trois types** :

- a) **les cellules monocristallines** : constituées d'un cristal à doubles couches, le plus souvent du silicium, elles ont un rendement entre 15 et 22% mais ont un coût élevé
- b) **les cellules poly-cristallines** : elles sont constituées de plusieurs cristaux, ce qui diminue leur prix de fabrication. Cependant leur rendement est de 10 à 13%.
- c) **Les cellules amorphes** : leur prix est très bas mais elles ont un rendement très faibles (5 à 10%)

Technologie du silicium cristallin

Les cellules en silicium cristallin sont composées de fines tranches coupées à partir d'un seul cristal de silicium (monocristallin) ou d'un bloc de cristaux de silicium (polycristallin). Elle représente aujourd'hui environ 90% du marché.

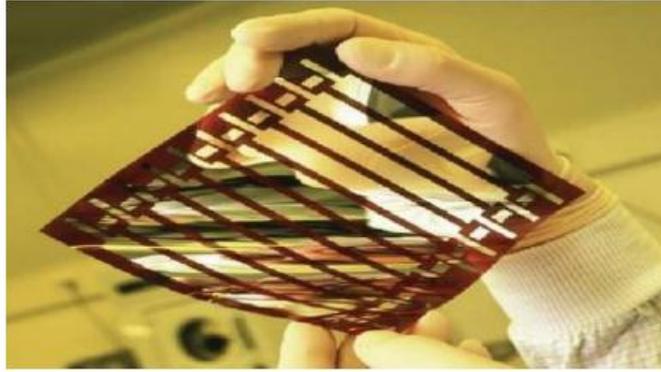
Technologie des couches minces (Thin film)

Les modules en couches minces sont constitués de très fines couches d'un matériau photosensible déposées sur un support à bas-coût tel que le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Les coûts de production du procédé des couches minces sont inférieurs à ceux de la technologie cristalline leurs rendements généralement moins élevés (entre 5% et 13%).

Autres types de cellules :

Cellules organiques et plastiques

La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0.95% de rendement de conversion. Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).



Les composants d'un système photovoltaïque

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque (dépendent de l'application considérée) :

- **Les cellules solaires**
- **Les batteries**

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par les batteries. Celles-ci sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des systèmes autonomes (site isolé)

Elles sont de type plomb-acide. Le choix du type de batterie se fait d'après une approximation de la puissance moyenne journalière et du temps de stockage nécessaire.

La caractéristique des batteries s'adapte assez bien à celles des générateurs photovoltaïques, car elles fonctionnent à tension quasi constante. Il suffit de dimensionner la batterie pour se placer au point de puissance maximale, puisque sa tension U_{pmax} (tension correspondant à la puissance maximale) varie relativement peu avec l'éclairement.

- **Les régulateurs de charge**

Plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Le régulateur contrôle les flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaires) et décharges profondes (utilisateur). Il doit assurer la surveillance et la sécurité de l'installation.

- **Les convertisseurs**

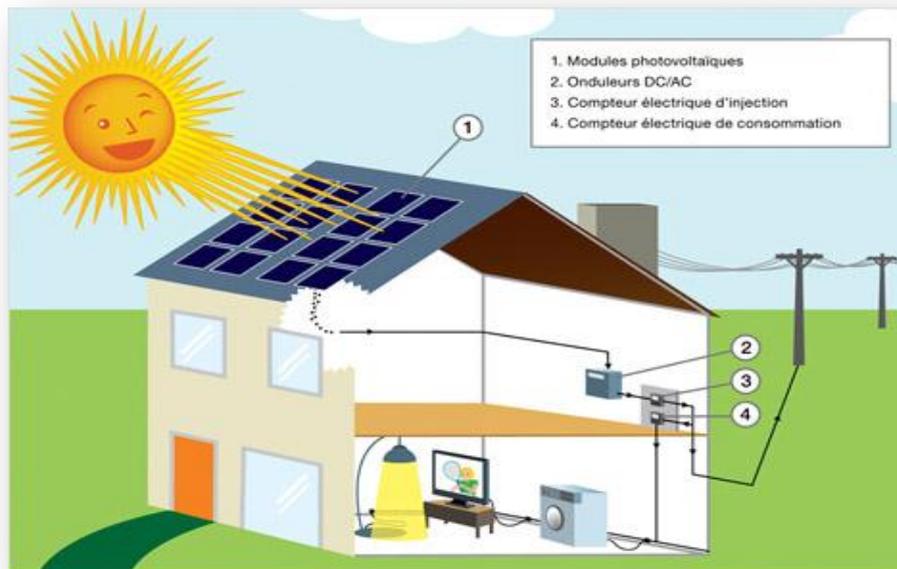
Il existe principalement les convertisseurs qui fournissent à la charge une tension DC différente de la tension générée par les panneaux et les convertisseurs DC/AC qui produisent une tension alternative pour les charges correspondantes.

Applications photovoltaïques

Il existe trois types de systèmes photovoltaïques: les systèmes connectés à un réseau, systèmes autonomes (isolés) et hybrides.

1. Systèmes connectés au réseau

Il s'agit du système photovoltaïque le plus populaire pour les maisons et entreprises situées en zones développées. La connexion au réseau local d'électricité permet **d'injecter et de revendre** l'électricité produite.



En cas d'ensoleillement insuffisant, l'électricité est importée du réseau. Un onduleur est utilisé pour transformer le courant continu produit par le système photovoltaïque en courant alternatif afin d'alimenter les équipements électriques standards.

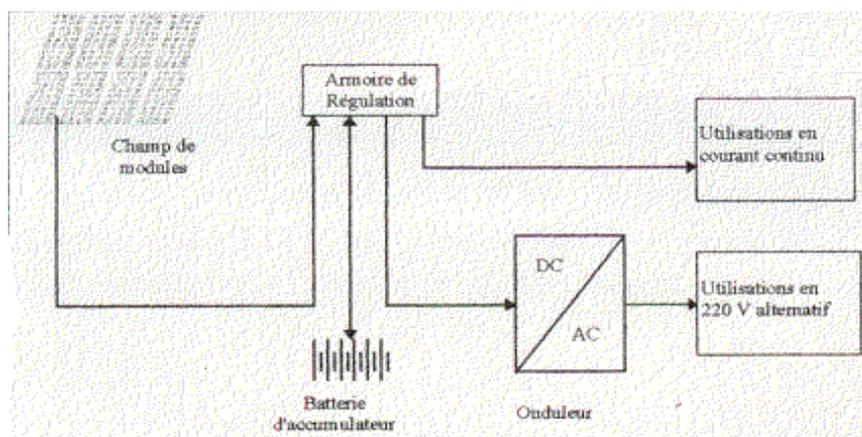
Remarque : il existe également **des centrales connectées au réseau** qui produisent une grande quantité d'électricité photovoltaïque. La taille de ces installations varie de plusieurs centaines de kilowatts à plusieurs mégawatts. Certaines sont situées sur de grands bâtiments industriels tels que des aéroports ou des gares ferroviaires. Ceci permet à la fois d'utiliser des espaces disponibles et de compenser en partie l'électricité consommée par ces activités énergétiques

Une centrale photovoltaïque est un ensemble de panneaux photovoltaïques connectés en séries ou en parallèles en vue de délivrer une puissance élevée. Ce type de centrales est généralement utilisé pour l'électrification des régions éloignées du réseau et avec le minimum de coût.



2. Systèmes isolés

En mode autonome, le générateur photovoltaïque représente la seule source d'énergie électrique pour alimenter des récepteurs. Ce mode est adopté lorsque le réseau n'est pas disponible ou lorsque le fonctionnement des récepteurs dépend uniquement du fil de soleil (pompage, éclairage, climatisation, chauffage, etc.).



Dans ce cas, le système photovoltaïque est connecté à une batterie via un contrôleur de charge. Un onduleur peut être utilisé pour fournir du courant alternatif.

3. Systèmes hybrides

Un système photovoltaïque peut être combiné à une autre source de production d'électricité : une éolienne ou générateur diesel, cela va nous permettre de garantir un approvisionnement constant en électricité. Un système hybride peut être relié au réseau, fonctionner en autonomie ou être soutenu par le réseau.

Remarque

- L'intensité maximum du courant produit dépend de la surface de la cellule et de la valeur de l'éclairement.
- La tension produite par la cellule diminue de façon sensible lorsque la température augmente
- Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle décroissante, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière. Si E_{inc} est l'énergie incidente, l'énergie restante à la profondeur d s'écrit :

$$E = E_{inc} e^{-\alpha d}$$

Donc l'énergie absorbée dans l'épaisseur d (cm) est égale à :

$$E_{abs} = E_{inc} - E_{inc} e^{-\alpha d} = E_{inc} (1 - e^{-\alpha d})$$

Le coefficient d'absorption α (cm^{-1}) dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente.

Exemple : Silicium cristallin : $\alpha = 4.5 \times 10^3 cm^{-1}$ et silicium amorphe : $\alpha = 2.4 \times 10^3 cm^{-1}$.

- Un électron possédant l'énergie E_1 appartient à la bande de valence et se trouve lié à l'atome. S'il reçoit une énergie (sous la forme d'un photon par exemple) qui lui permet d'atteindre le niveau E_2 , énergie correspondant à la bande de conduction, il devient libre et peut alors participer à un courant électrique. Cette énergie, nécessaire pour que l'électron devienne libre, est notée E_g . On la donne le plus souvent en électronvolt (eV) et elle est donnée par : $E_g = E_2 - E_1$
- Le rendement énergétique est défini par le rapport de la puissance électrique maximum fournie, à la puissance du rayonnement incident que reçoit la photopile. Il donne un facteur de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{G \cdot S}$$

G : Eclairement solaire

S : Surface de la cellule solaire