

# Chapitre 4 : Energie solaire photovoltaïque

12/12/2024

# Table des matières

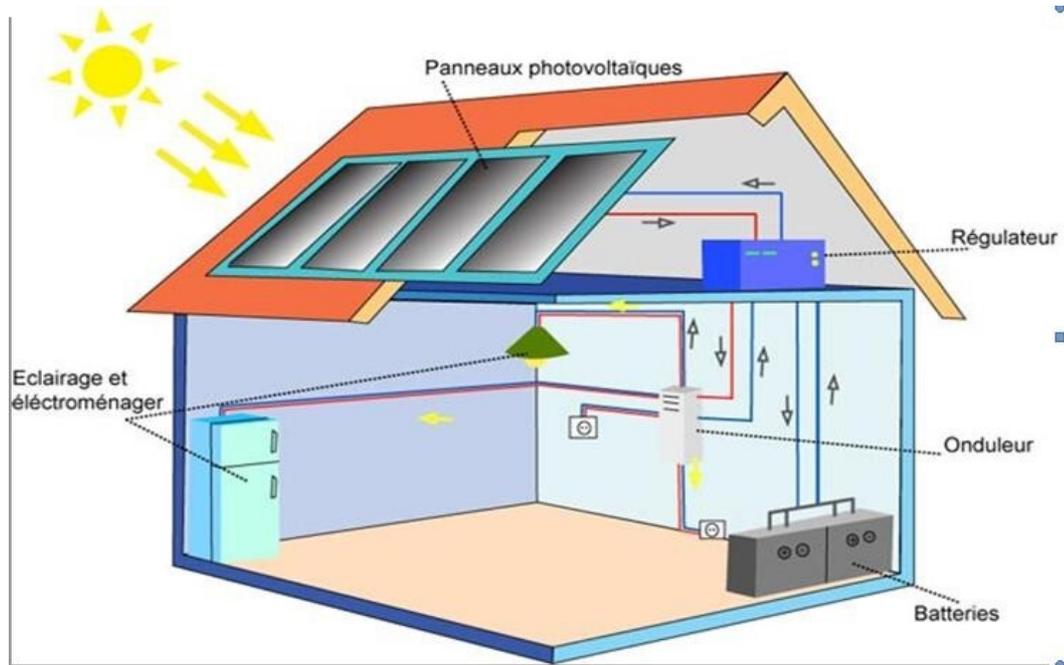
<b>I - Principe d'une installation photovoltaïque</b>	<b>3</b>
<b>II - le gisement solaire en Algérie</b>	<b>4</b>
<b>III - Technologies des cellules photovoltaïques</b>	<b>6</b>
<b>IV - LE MPPT maximum power point tracker</b>	<b>10</b>
<b>V - Caractéristiques et connectique photovoltaïque</b>	<b>12</b>
1. connectique photovoltaïque .....	13
<b>VI - Normes</b>	<b>15</b>
<b>VII - L'onduleur (rôle, principe, caractéristiques et rendement)</b>	<b>16</b>
<b>VIII - Exemple d'une installation photovoltaïque</b>	<b>18</b>

# Principe d'une installation photovoltaïque



Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité par *effet photovoltaïque* qui a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel. La puissance d'un module photovoltaïque est exprimée en Watt-crête. Le nombre de Watt-crête d'un panneau solaire correspond au nombre de Watt que ce panneau fournit lorsqu'il est utilisé dans des conditions standards. Ensuite, il faut stocker l'électricité produite. Dans une installation solaire photovoltaïque, il faut souvent stocker l'énergie produite pour l'utiliser plus tard. Pour cela on utilise des batteries qui seront chargées quand les panneaux solaires produiront de l'électricité et déchargées quand l'utilisateur la consommera. La quantité d'énergie stockée s'exprime en Watt-heure (Wh) mais les fabricants indiquent souvent la capacité de leurs batteries en Ampère-heure (Ah). Dans ce cas, il faut multiplier ce chiffre par celui de la tension aux bornes des batteries (en général 12 Volt) pour obtenir une équivalence en Watt-heure. Si nécessaire, il faut transformer l'électricité. Les panneaux solaires produisent du courant continu. Le courant stocké et restitué par les batteries est également du courant continu. Sauf, s'ils sont conçus spécifiquement pour être alimentés par une installation solaire, les appareils électriques consomment l'électricité distribuée sur le réseau public, c'est à dire du courant alternatif dont la tension est de 110 ou 220 Volts. Il va donc falloir convertir l'électricité produite par les panneaux solaire pour l'utiliser. Pour cela on utilise un onduleur. Finalement, tous ces éléments sont à relier avec un régulateur.

Pour faire travailler ensemble ces différents composants, il faut un cerveau à l'installation solaire. C'est le rôle du régulateur solaire. Le régulateur va notamment faire en sorte que les batteries ne soient ni complètement déchargées ni surchargées. Certains modèles peuvent aussi permettre de maximiser la puissance fournie par les panneaux solaires quelque soit les conditions climatiques ou de charge.

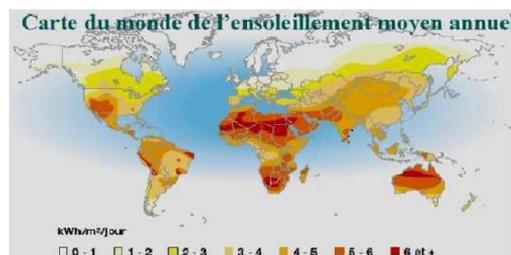


# le gisement solaire en Algérie



C'est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme.



Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit

169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau ci dessous selon l'ensoleillement reçu annuelle

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

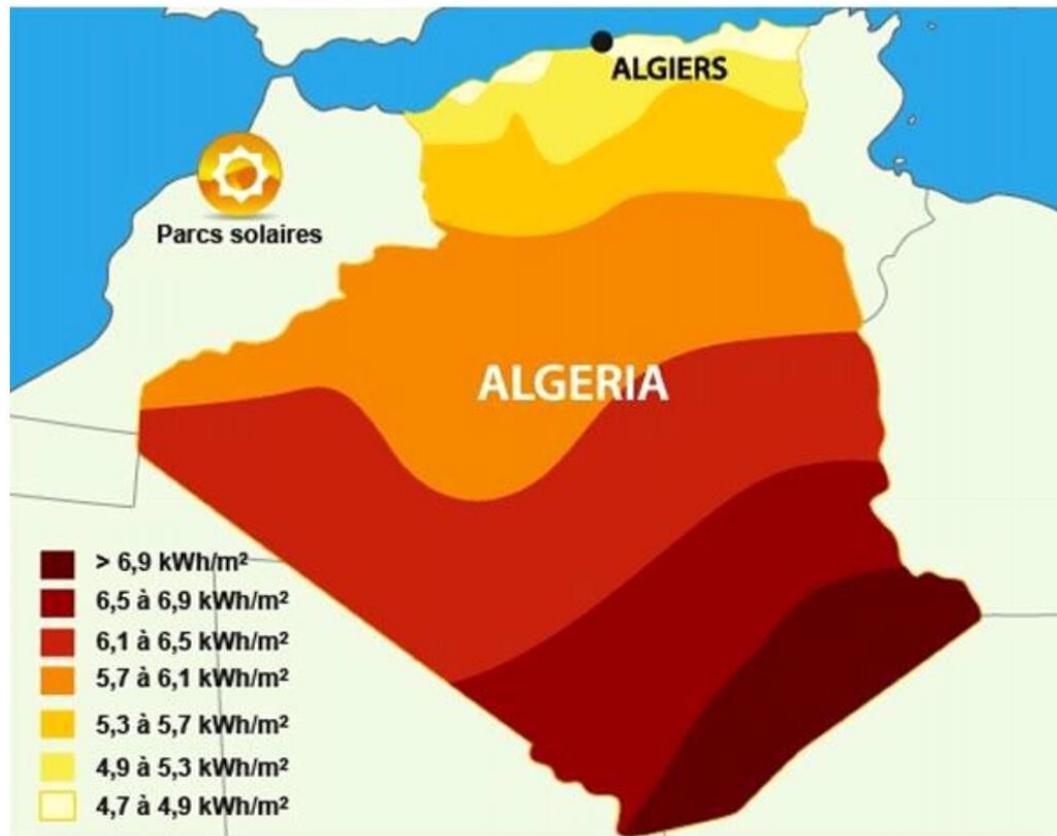
Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée d'ensoleillement (h/an)	2650	300	3500
Energie moyenne recue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau 2: La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien

En figure ci dessous est représentée la carte du gisement solaire Algérien de l'année 2010. L'Algérie est un pays qui possède une richesse d'ensoleillement.

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

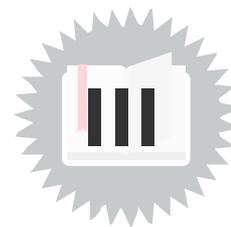
La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.



*carte du gisement solaire de l'Algérie*

L'Algérie dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA (en anglais Middle East and North Africa) et l'un des plus importants au monde.

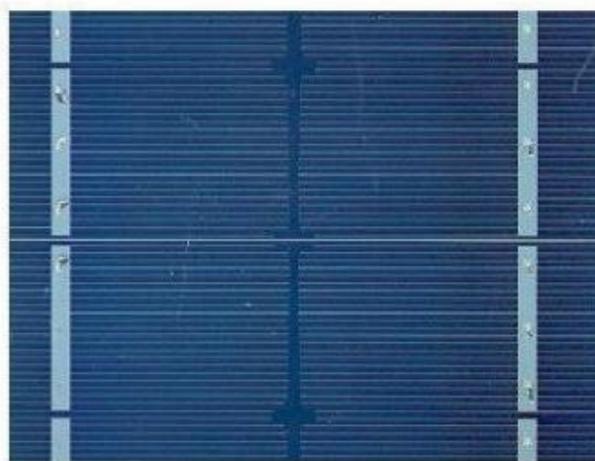
# Technologies des cellules photovoltaïques



Il existe plusieurs types de cellules solaires. Le rendement utilisé est celui de conversion entrevu. On citera :

## **Cellule en silicium mono cristallin**

Le rendement de ce matériau photovoltaïque (15 % à 17 %) est légèrement supérieur à celui du silicium polycristallin. En revanche, sa fabrication est plus délicate donc plus coûteuse.



*Cellule au Silicium mono cristallin.*

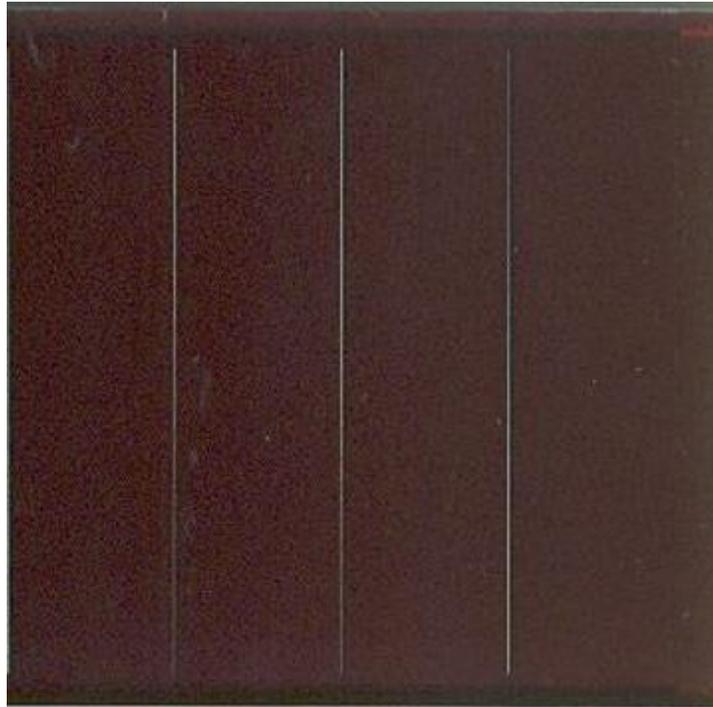
## **Cellule en silicium polycristallin**

Il s'agit du matériau photovoltaïque le plus utilisé (à lui seul plus de 50% du marché mondial). Il offre un bon rendement (de 12% à 14 %)



*Cellule en silicium polycristallin.*

## **Cellule en silicium amorphe**



*Cellule en silicium amorphe*

La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ». Le rendement de ce matériau photovoltaïque est bien inférieur (6%). Son coût est faible.

#### **Cellule tandem**



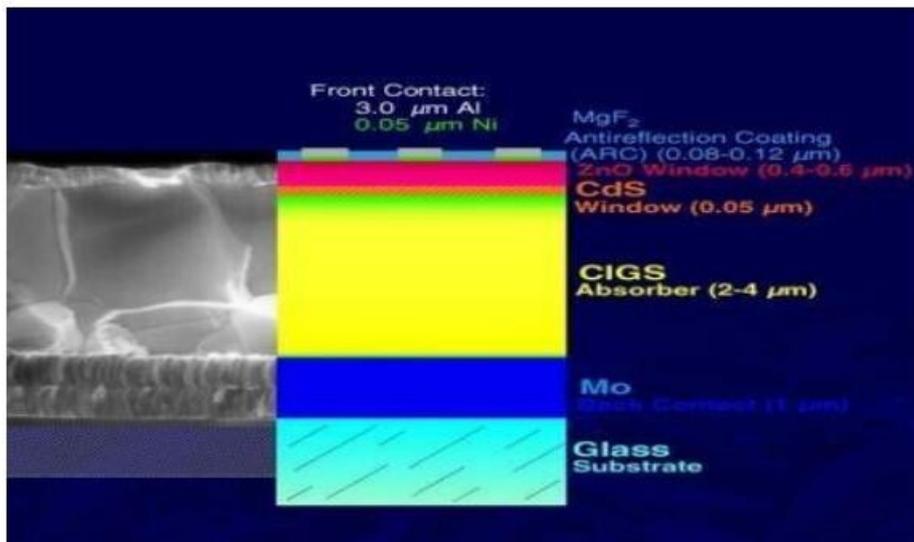
*Cellule tandem*

C'est l'empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux connexes, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

Par ces avantages, elle a un rendement de 12% et une sensibilité élevée sur une large plage de longueurs d'onde.

#### **Cellule CIGS**

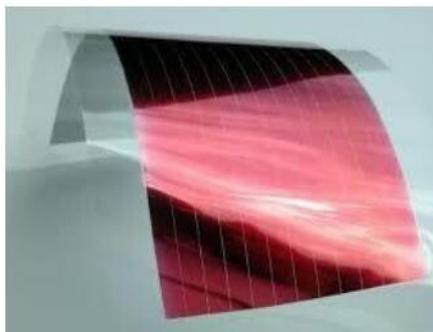
La technique consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium sur un support. Le rendement s'établit respectivement à 15 et 17%.



Cellule CIGS

### Cellule organique

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Elle a un rendement minimum de 15% .



Cellule organique.

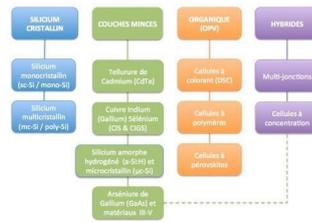
### Cellule multi-jonction

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. C'est l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé. Ça génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire. Le rendement est de 32 % à 39 % . Elles sont caractérisées par un coût très élevé.



Cellule multijonction

Le tableau ci-dessous résume la plupart des filières technologiques de la cellule solaire.



*Classification des principales technologies de cellules solaires PV*

# LE MPPT maximum power point tracker

---



Lors de la conception des systèmes photovoltaïques, on essaie souvent d'obtenir le maximum d'énergie solaire afin de répondre aux besoins énergétiques des divers récepteurs utilisés. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension.

Les variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et la charge un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale. Pour intégrer les modules au niveau système, le champ PV peut être associé à un organe MPPT (Maximum Power Point Tracking). Il permet d'ajuster, en chaque instant, la puissance électrique fournie par le champ à sa valeur maximale (dans les conditions d'ensoleillement et de température de l'instant considéré) en déplaçant le point de fonctionnement du module sur sa courbe caractéristique.

Deux types de convertisseurs électriques peuvent être utilisés pour la connexion du GPV au système dans lequel il est intégré.

Des convertisseurs DC/DC ainsi que les systèmes de poursuite du point de puissance maximum (MPPT) sont utilisés pour éviter les pertes en puissance. Le convertisseur DC/DC, pour notre cas permet le suivi et le maintien du point maximum de puissance de module photovoltaïque indépendamment de la température, de l'irradiance et de la charge reliée. Ceci pourrait être une bonne pratique d'amélioration du rendement global du système énergétique vert photovoltaïque.

Cette qualité d'adaptation détermine le degré d'exploitation des cellules solaires.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale.

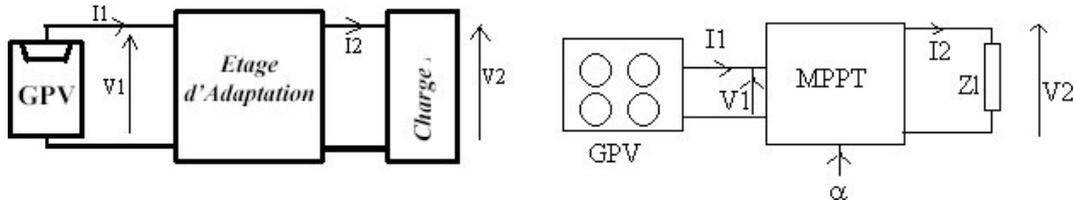
Le fonctionnement du générateur dépend fortement des caractéristiques de la charge avec laquelle il est associé. En effet, pour différentes valeurs de charges, l'adaptation optimale se produit pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximale (*MPP*). Celui-ci correspond à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe courant-tension *I-V* donnée. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe *source-charge*, le rendement de l'ensemble est alors optimal lorsque le système fonctionne à son MPP.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale.

Or, les changements brutaux d'ensoleillement et de charge peuvent survenir. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée ainsi que son MPP. Le MPPT doit suivre ces changements.

Le MPPT est un système qui fera la recherche du MPP du GPV. Ce système est intercalé entre le GPV et la charge. Il fournit un degré de liberté noté ' $\alpha$ ' qui nous permettra d'agir sur la caractéristique électrique de la charge vue par le GPV à n'importe quel moment. En exploitant ce degré de liberté, on pourra assurer le transfert de la puissance maximale du GPV vers la charge.

Le MPPT est un convertisseur transformant les grandeurs de l'entrée en des grandeurs de sortie tel montré en figure ci-dessous:



LE MPPT

Donc, un MPPT (maximum power point tracker) est un convertisseur (CS) statique dont le principe de fonctionnement s'apparente à celui d'un transformateur. Il convertit les grandeurs d'entrée courant et tension  $I_1$ ,  $V_1$  en des grandeurs de sortie respectivement  $I_2$  et  $V_2$  de même nature selon les équations suivantes:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

### HACHEUR

Pour un hacheur dévolteur (ou série), la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $E$  du GPV

math.odf

Pour un hacheur survolteur (ou parallèle), la tension moyenne de sortie  $V_s$  est supérieure à la tension d'entrée.

math\_04.odf

La tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée  $E$  du GPV. En supposant que le MPPT est un dévolteur idéal, on a:

math\_03.odf

math\_05.odf

$Z_1$  étant la charge à approvisionner par voie solaire, on a :

math\_06.odf

$Z_e$  est la transformée de  $Z_1$  par le *Maximum Power Point Tracker* (MPPT).

Pour  $\alpha = \alpha_{opt}$ , on a

$$V_1 = V_{opt} \text{ \& } I_1 = I_{opt}$$

# Caractéristiques et connectique photovoltaïque



La technologie photovoltaïque présente un nombre d'avantages et d'inconvénients.

## Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

D'abord, une haute fiabilité. Elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées.

Ensuite, le caractère modulaire des cellules photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances variables.

Les entretiens sont réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Cette énergie est gratuite.

## Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%). Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

Il y'a le problème d'intermittence et le caractère aléatoire.

## Association des cellules photovoltaïques

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque (PV), ne produit qu'une très faible puissance électrique. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. On le définit comme étant le regroupement de plusieurs cellules solaires en série, fournissant de la sorte des grandeurs de sortie appréciables (tensions).

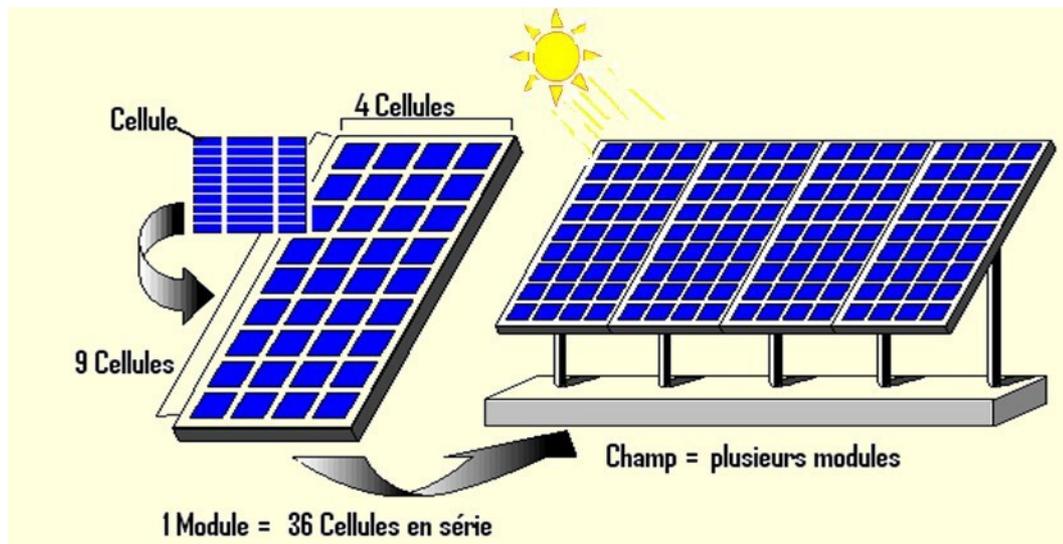
Les connexions en série de plusieurs modules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module et au nombre de modules connectés en parallèle. En associant les modules PV en série (*somme des tensions de chaque cellule*) et/ou en parallèle (*somme des intensités de chaque cellule*), on peut constituer un générateur ou champ PV, selon les besoins des applications visées.

On appellera **Ns**, le nombre de modules photovoltaïques connectés en série formant une branche. On appellera **Np** le nombre de branches mises en parallèle. Le produit :

$$Nt = Np \cdot Ns$$

donnera le nombre total de modules utilisés.

Pour notre cas, le générateur photovoltaïque GPV est composé de plusieurs modules ou panneaux connectés soit en série, soit en parallèle, soit en configuration mixte (série et parallèle). Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque(GPV), des équipements et de la charge.



*Notion de module PV, de générateur PV*

## 1. connectique photovoltaïque

La connectique regroupe toutes les techniques liées aux connexions physiques des liaisons électriques.

Les modules photovoltaïques d'une installation sont reliés électriquement par des fils électriques. Sur la face arrière des modules se trouve un boîtier duquel s'échappent deux câbles unipolaires.



*Câbles unipolaires du module PV*

Le branchement en série de deux modules s'effectue simplement en branchant le pôle positif de l'un sur le pôle négatif de l'autre. Aujourd'hui, la très grande majorité des fabricants de modules intègrent avec leur produit des connecteurs mâles et femelles afin de faciliter le câblage.

Pour les connecteurs, il y'a les :

Connecteurs MC3

Connecteurs MC4

Connecteurs TYCO

MC signifie Multi-Contact. Multi-Contact AG est une société qui fabrique et commercialise des connecteurs et des systèmes de connexions électriques. Pour la connexion des modules photovoltaïques entre eux, Multi-Contact AG propose une gamme de connecteurs, nommé MC3, permettant de connecter rapidement et sûrement les modules, ainsi qu'illustré sur la photo ci-dessous.



*Connecteurs MC3*

Multi-Contact AG propose aussi des connecteurs encore plus sûr, nommé MC4. Les connecteurs MC4 sont une évolution des connecteurs MC3. Ils disposent en effet d'une fonction de verrouillage dit "Snap-In". Les connecteurs mâles et femelles restent ancrés l'un dans l'autre et ne peuvent être déconnectés qu'en actionnant un processus de déverrouillage mécanique.



*Connecteurs MC4*

Une autre société se démarque dans la conception et la fabrication de connecteurs : Tyco Electronics.



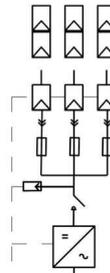
*Connecteurs Tyco*

# Normes



La figure ci-dessous résume celles ci:

<b>Modules PV</b> NF EN 61215 : Qualification et homologation NF hEN 61730-1 et -2 : Sécurité de fonctionnement NF EN 61701 et NF EN 62716 : corrosion au brouillard salin et à l'ammoniac (NF EN 50548), NF EN 62790 : Boîtes de jonction CEI TS 62804-1 : PID NF EN 50380 : Plaques constructeur NF EN 62759-1 : Transport
<b>Câbles PV</b> NF hEN 50618, UTE C32-502
<b>Connecteurs PV</b> (NF EN 50521), NF EN 62852
<b>Fusibles PV</b> NF hEN 60269-6
<b>Parafoudres PV</b> NF EN 50539-11
<b>Onduleurs PV</b> NF hEN 62109-1 et -2 : Sécurité électrique DIN VDE 0126-1-1 : Découplage NF EN 50530 : Efficacité NF EN 61557-8 : Contrôleur d'isolement NF EN 50524 : Fiche technique et plaque d'identification



Normes (exemple)

# L'onduleur (rôle, principe, caractéristiques et rendement)

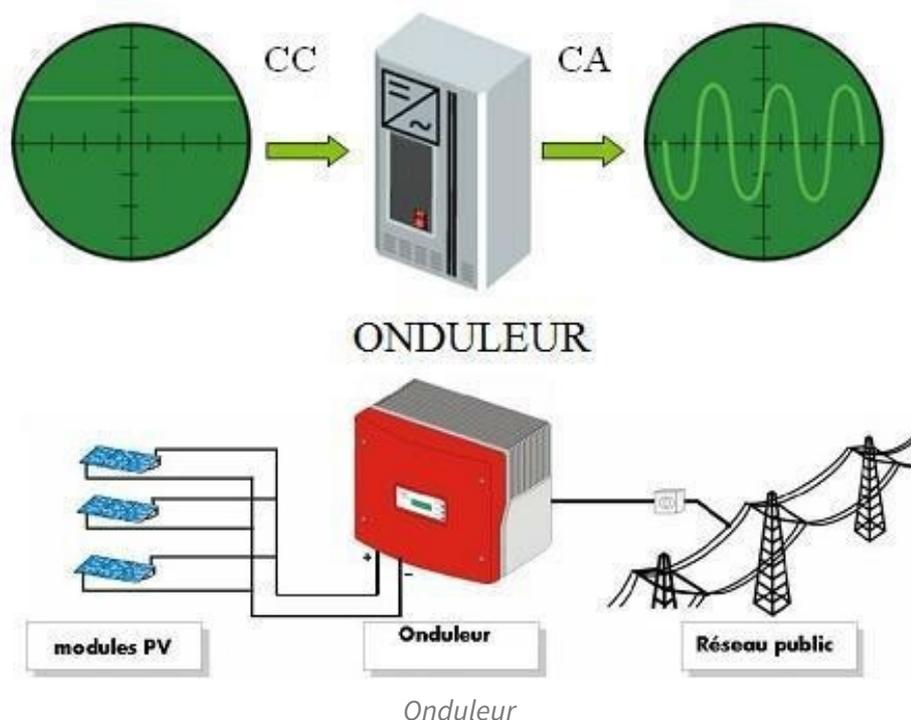


Dans une installation photovoltaïque raccordée au réseau, l'onduleur occupe une place centrale. Il va transformer le courant et la tension continus, délivrés par le champ photovoltaïque, en un courant et une tension alternatifs compatibles avec le réseau. On distinguera donc toujours la partie continue notée CC (Courant Continu), en amont de l'onduleur, et la partie alternative notée CA (Courant Alternatif), en aval de l'onduleur.

Un onduleur possède un rendement supérieur à 94 %. Son remplacement est à prévoir tous les 10 ans environ.

Un onduleur photovoltaïque doit remplir plusieurs fonctions essentielles dans une installation photovoltaïque raccordées au réseau :

- La conversion du courant et de la tension continus en courant et tension alternatifs compatibles avec le réseau
- La recherche du point de puissance maximum du champ photovoltaïque
- La protection de découplage
- Le contrôle de l'isolement de la partie CC de l'installation photovoltaïque



L'onduleur peut être utilisé pour la recherche du point de puissance maximum (charge de type AC).

Il est à noter que le point de fonctionnement d'un générateur dépend de la charge à ses bornes.

Ses critères de choix sont:

En entrée :

- a puissance maximale,

- la tension maximale,
- la plage de tension d'entrée,
- le nombre maximal de string raccordables.

En sortie :

- la puissance maximale et la puissance nominale,
- la tension nominale et la fréquence nominale
- le rendement.

# Exemple d'une installation photovoltaïque



La pile à combustible est un convertisseur fonctionnant selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau.

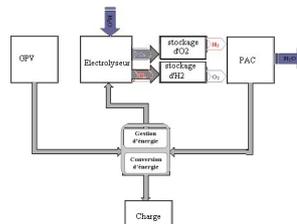
L'hydrogène est le principal combustible envisagé qui peut être produit à partir de sources énergétiques diverses.

On passe directement de l'électricité à l'hydrogène et inversement, par la réaction réversible en Figure 25, au moyen de procédés électrochimiques propres et efficaces, impliquant respectivement des électrolyseurs ou des piles à combustibles.



### Complémentarité électricité – hydrogène

L'architecture du système considéré comme exemple, en Figure 26 est composé d'un générateur solaire et d'un système de stockage d'énergie constitué d'un électrolyseur, d'une unité de stockage des gaz et d'une pile à combustible. Le champ photovoltaïque (PV) alimente directement la charge. L'excédent solaire est stocké sous forme chimique. Un électrolyseur (EL) dissocie l'eau en hydrogène et oxygène. Le gaz est stocké sans perte. Dans cette architecture, l'électrolyseur est alimenté directement du générateur photovoltaïque. Les produits de l'électrolyseur (H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>) seront utilisables pour une pile à combustible. Lorsque le champ solaire ne peut pas fournir la totalité de la demande d'électricité, la pile à combustible est connectée. Elle régénère l'électricité stockée en recombinaison l'hydrogène et l'oxygène. La pile à combustible produit de l'eau pure qui est stockée pour approvisionner l'électrolyseur.



### Exemple d'une architecture du système considéré

Les inconvénients majeurs sont le coût d'investissement de l'installation, le rendement et la complexité des composants électrochimiques.