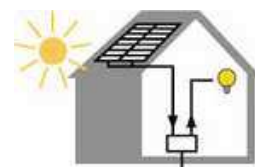




Production d'énergie électrique :

ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

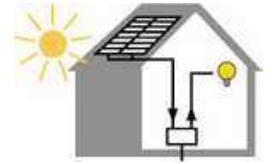


SOMMAIRE

1- L'ENERGIE SOLAIRE	2
ÉCLAIREMENT OU IRRADIANCE.....	2
RAYONNEMENT, IRRADIATION OU ENERGIE INCIDENTE.....	2
2- LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE	5
2.1 HISTORIQUE.....	5
2.2 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES.....	5
2.2.1 Les modules photovoltaïques au silicium.....	6
2.2.2 Les autres modules photovoltaïques composites et organiques	7
2.2.3 Comparatif des différentes technologies.....	8
2.2.4 Les modules PV double face.....	9
2.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	9
2.4 ASSOCIATION DE CELLULES : LE PANNEAU SOLAIRE (<i>EXTRAIT D'UN COURS MAGISTRAL DE STEPHAN ASTIER PROFESSEUR DES UNIVERSITES- INPT-ENSEEIH</i>).....	11
2.5 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	13
2.5.1 Caractéristiques $I=f(U)$	13
2.5.2 Caractéristiques $P=f(U)$	13
3- LES DIFFERENTS TYPES D'UTILISATION DE GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES.....	14
3.1 ALIMENTATIONS ELECTRIQUES FAIBLES PUISSANCES	14
3.2 INSTALLATIONS ELECTRIQUES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES	14
3.3 INSTALLATIONS ELECTRIQUES PHOTOVOLTAÏQUES RACCORDEES AU RESEAU	15
3.3.1 Installation PV raccordée au réseau sans injection (« auto-consommation »).....	15
3.3.2 Installation PV raccordée au réseau avec injection des excédents de production.....	16
3.3.3 Tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque.....	16
3.3.4 Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite.....	17
4- PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE EN SITE ISOLE.....	17



Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE



Préambule :

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée des cours du brut, la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des **énergies renouvelables**.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : **La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.**

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'**énergie solaire photovoltaïque**. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme :

- Villages, maisons isolées (un tiers de la population mondiale n'a pas accès à l'énergie électrique).
- Relais de communication,
- Pompage de l'eau
- Refuges,
- ...

Certains pays comme la France mettent en place des mesures pour inciter à produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Et dans ce cadre là, l'énergie produite est achetée à prix attractif (prix du kWh produit plus élevé que le prix du kWh consommé et facturé par le fournisseur d'énergie).

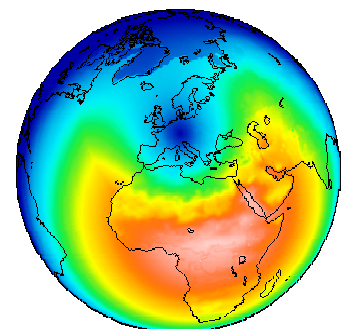


1- L'ENERGIE SOLAIRE

Unités utilisées

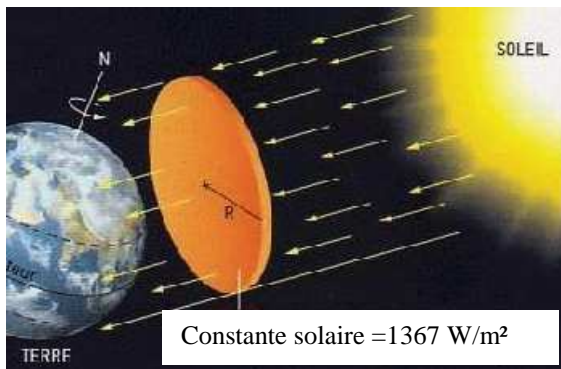
L'éclairement ou irradiance est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m^2 (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E.

L'irradiation ou rayonnement est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en J m^{-2} (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H. D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 (watt-heure par mètre carré) bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI).



Rayonnement solaire

Unités	
Éclairement ou Irradiance G exprimé en W/m^2	Rayonnement, irradiation ou énergie incidente H exprimé en Wh/m^2 ou J/m^2



Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m^2 .

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée

par le nombre de masse d'air AM.

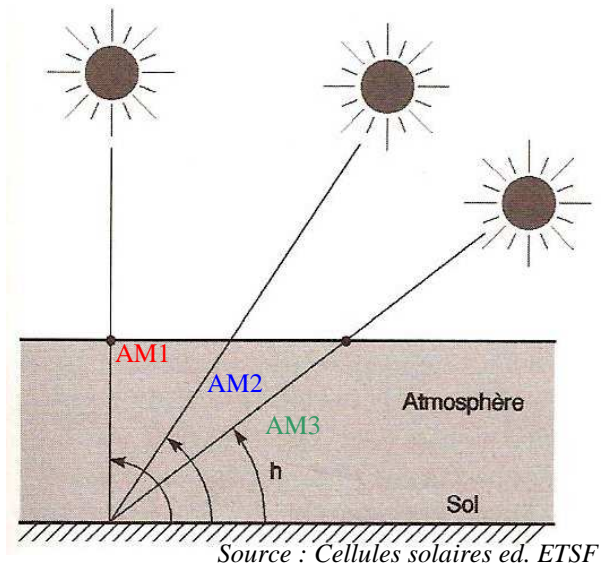
Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 .

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant

rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.



Source : Cellules solaires ed. ETSF

Normalisation : Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclairement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

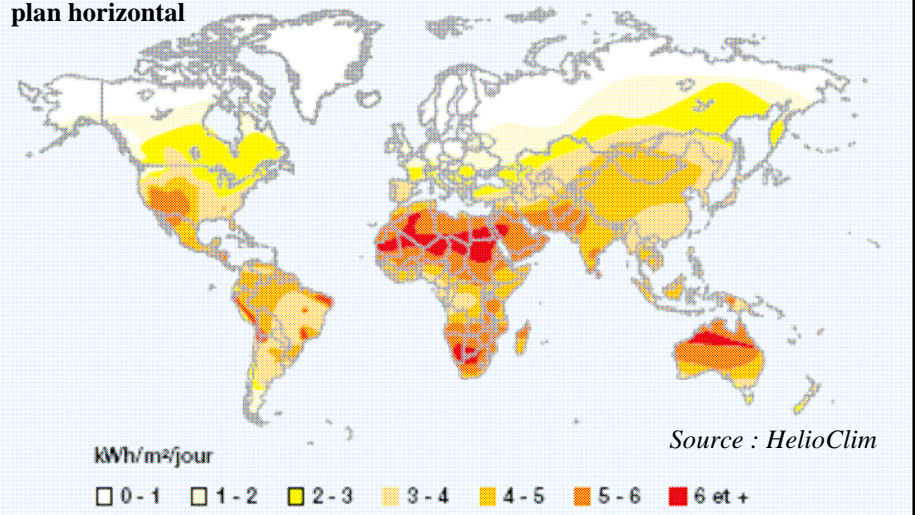
Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions).

Signalons que, **autre l'incidence de l'atmosphère**, l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- de la latitude du lieu et son degré de pollution,
- de la période de l'année,
- de l'instant considéré dans la journée,
- de la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année.

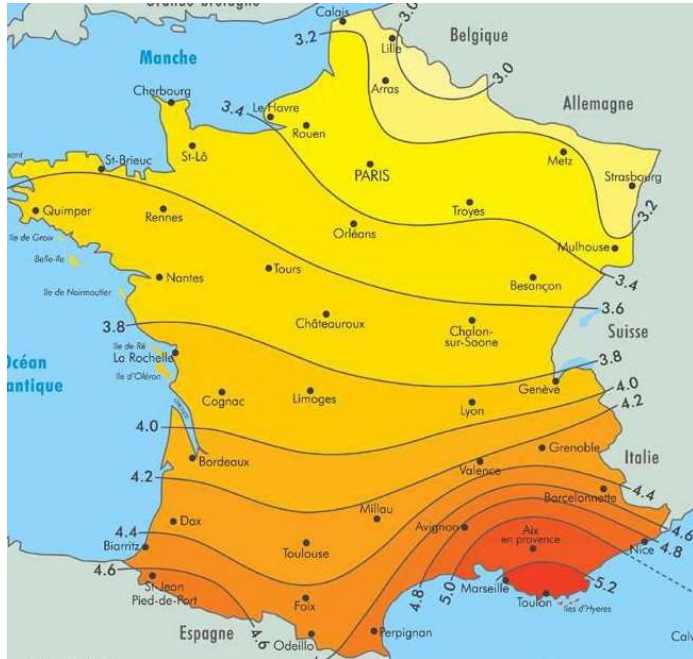
Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en $\text{kWh/m}^2/\text{jour}$ sur un plan horizontal



Source : HelioClim

La **meilleure inclinaison** des panneaux solaires photovoltaïques pour un usage à longueur d'année est celle de la latitude de l'endroit où sont installés les capteurs (donc environ 45° en France). Toutefois, ce sont souvent les dispositions constructives de l'habitation qui déterminent l'inclinaison.

Carte de France de l'irradiation moyenne: Énergie reçue sur une surface orientée au sud et inclinée d'un angle égal à la latitude (49° à Paris, 43° à Nice) en kWh/m²/jour



Source : TECSOL

Carte de France du gisement solaire* (en kWh/m²/an)

* Valeur de l'énergie du rayonnement solaire reçue sur une surface orientée au sud et inclinée d'un angle égal à la latitude

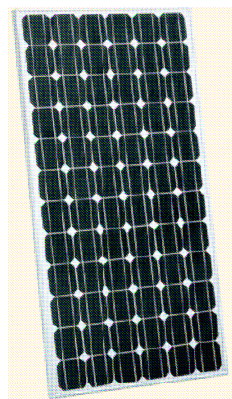


Source : ADEME

L'**énergie solaire photovoltaïque** désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme *photovoltaïque* peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.



cellule photovoltaïque
(monocristalline)



Panneau photovoltaïque



Champ photovoltaïque
Source : Tenesol

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

2- LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

2.1 Historique

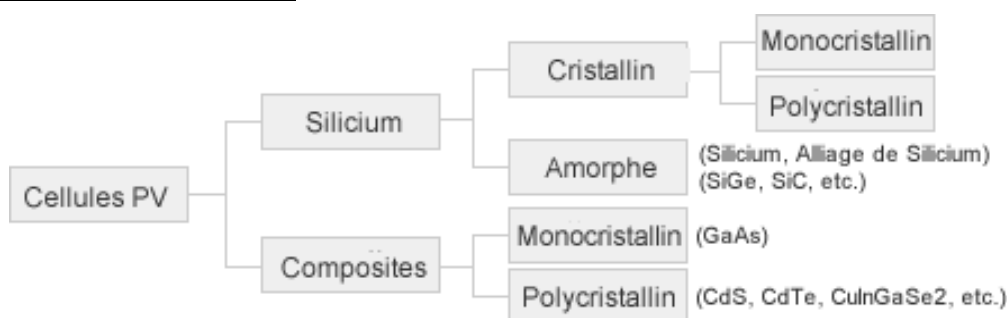
Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un [article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs](#). Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954** : **Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.**
- **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première [cellule photovoltaïque \(ou photopile\)](#) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.



2.2 Les différentes technologies

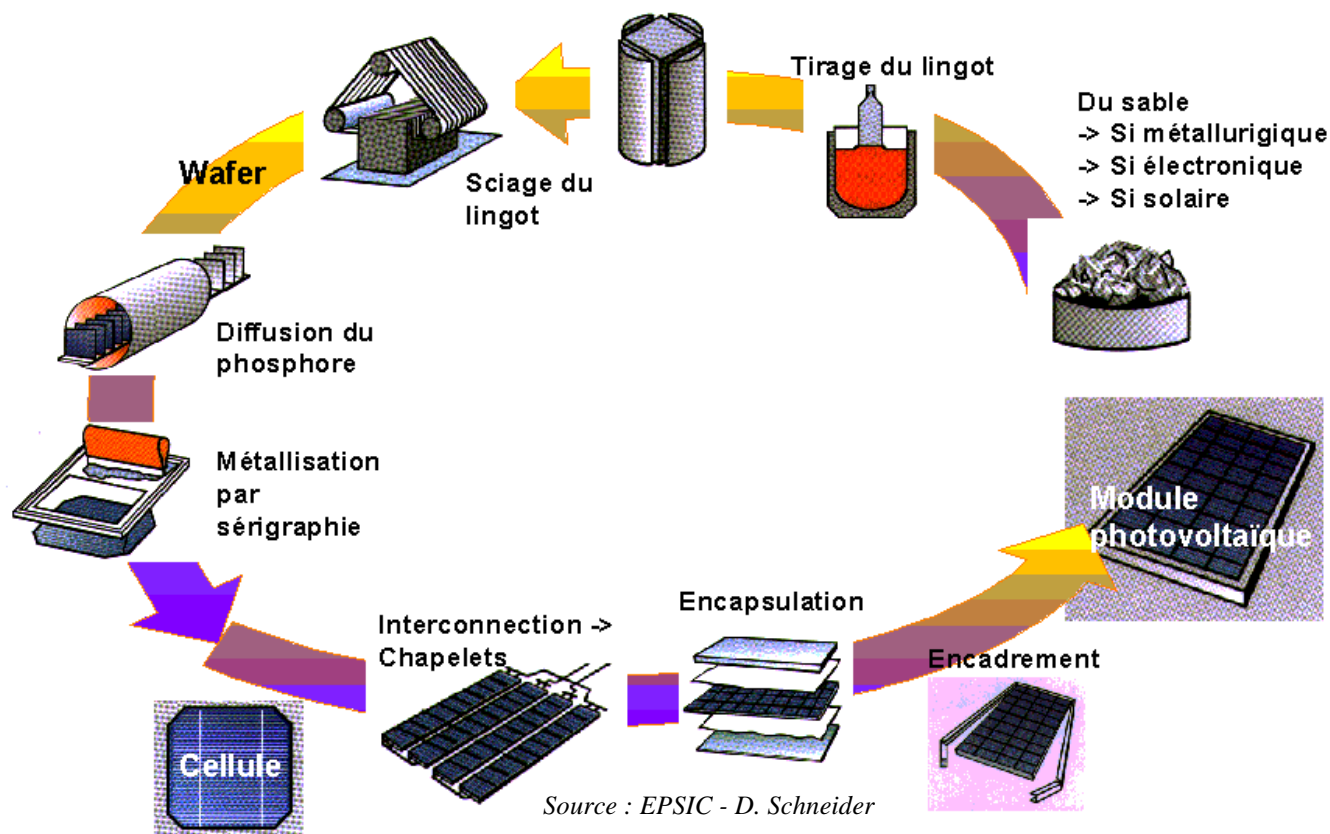


Il existe un grand nombre de technologies mettant en oeuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

2.2.1 Les modules photovoltaïques au silicium

Processus de fabrication :



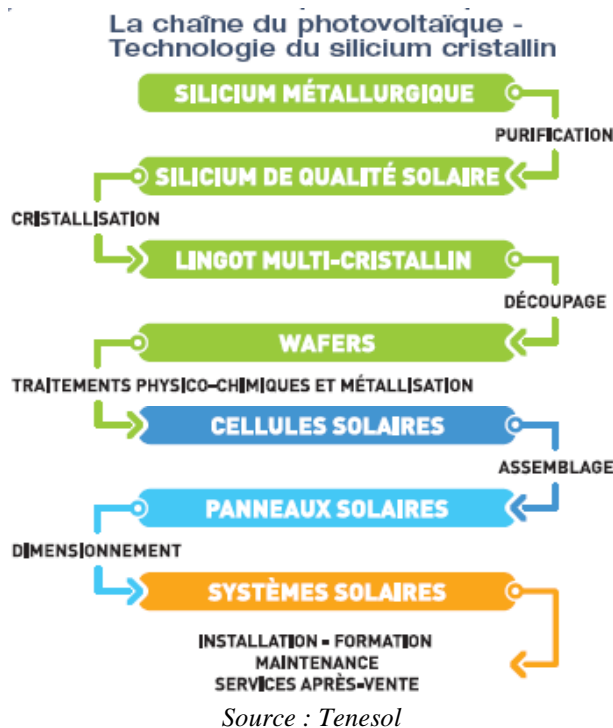
Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four



électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être



enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

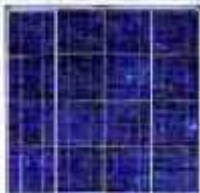




Les cellules monocristallines et polycristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module. Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, mais la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté et son coût intervient de façon importante dans le coût de revient total. La pénurie actuelle (2006) de silicium de qualité, a créé une tension sur le marché et une augmentation du prix des cellules.



Les panneaux PV avec des **cellules monocristallines** sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un mono-cristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.



Les panneaux PV avec des **cellules polycristallines** sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans. Un **cristal** est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.



Les modules photovoltaïques **amorphes** ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surface à bas coût en utilisant peu de matière première.

Nota : En chimie, un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les verres sont des composés amorphes.

Les cellules PV au silicium cristallin (mono ou multi) représentent la majorité de la production mondiale (29 et 51% de la production mondiale).

2.2.2 Les autres modules photovoltaïques composites et organiques

Plusieurs technologies de cellules photovoltaïques autre que la technologie « silicium » existent mais ne sont pas représentatives de la production actuelle mais plutôt du domaine de la recherche. Voici quelques unes d'entre-elles.

Thin film au silicium amorphe ou CIS (cuivre-indium-sélénium)

Le thin film met en oeuvre 1% seulement du silicium utilisé pour la fabrication de modules cristallins équivalents. Les cellules thin film sont plutôt utilisées pour des applications "courant faible". Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir car le rendement ne chute pas avec la température. Cependant, le rendement est de l'ordre de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Il y a un risque de toxicité vis-à-vis de l'environnement pour les modules CIS qui présentent un meilleur rendement que l'amorphe pur.

Les cellules photovoltaïques en plastique, composites et organique ; Technologie Flexcell



Déroutement et
positionnement des
lés d'EVALON-Solar

2.2.3 Comparatif des différentes technologies

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> * Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse. 	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> * Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial. 	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> * Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois. 	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> * Lourd, fissure facilement 	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe₂, etc.)	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

2.2.4 Les modules PV double face

Certain fabricants proposent des panneaux solaires **comportant des cellules solaires sur les deux faces, sur la face avant exposée au soleil et sur la face arrière du panneau**. Les cellules sont en général montées sur une vitre, encapsulées dans un cadre aluminium. Ces panneaux sont adaptés aux sites ayant des albédos importants des lacs, mers, les déserts, les surfaces enneigées. La puissance du module double face est le double de la puissance du même module simple face mais l'énergie moyenne annuelle produite par le module double face n'est que supérieure que de 10 % plus élevée à celle produite par le même module simple face (le coût d'investissement par contre a presque doublé !!).

Albédo : capacité d'une surface à réfléchir la lumière notamment celle du soleil. (on l'exprime par un chiffre compris entre 0 et 1 ; 1 pour un corps qui réfléchit totalement la lumière reçue).

Source : Krasnoe Znamya



Face avant

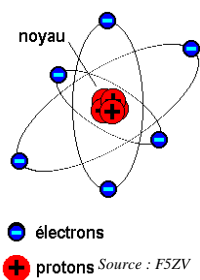


Face arrière

Face avant et arrière d'un module PV double face 36 Vcc

2.3 Principe de fonctionnement

Rappels :

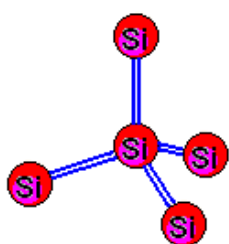
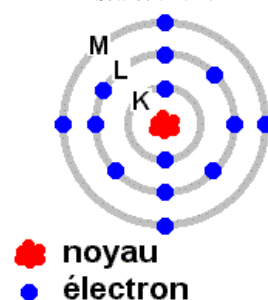


La matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse se compose de molécules qui sont des groupements d'atomes.

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).

Atome de silicium
Source : F5ZV



Cristal de silicium
Source : F5ZV

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

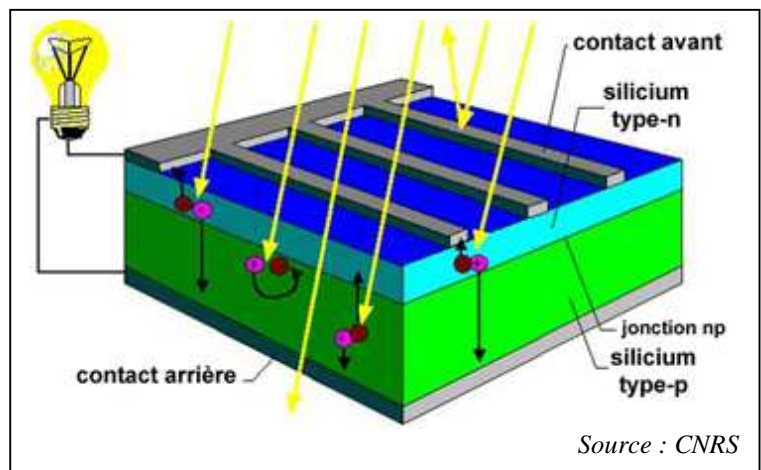
Les semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le silicium est un semi-conducteur.

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

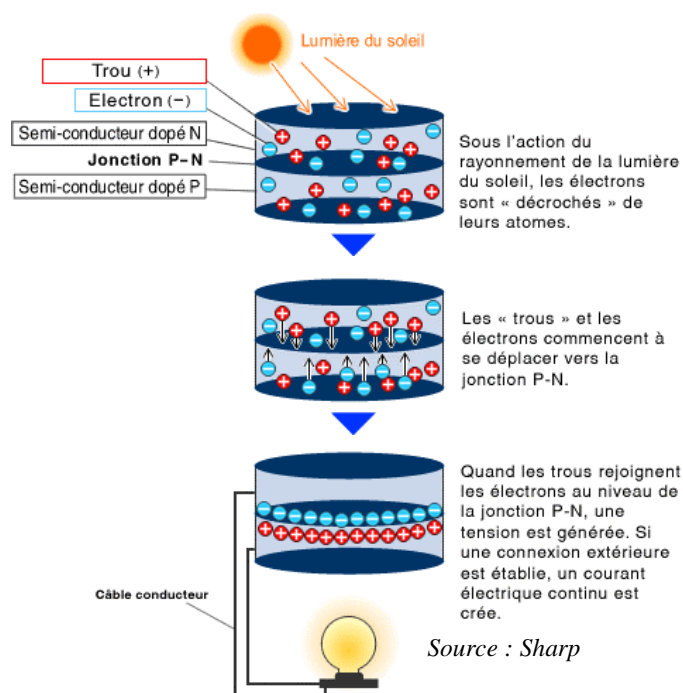
dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*.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



Source : CNRS

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.

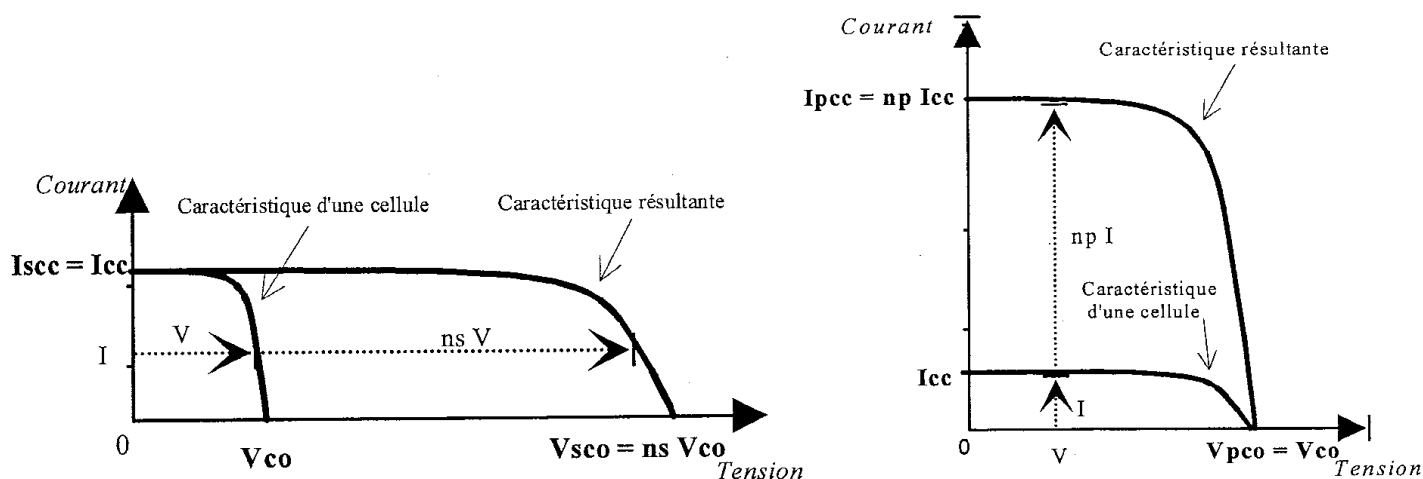
Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "débranchés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.



2.4 Association de cellules : le panneau solaire (Extrait d'un cours magistral de Stéphan 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 : $V_{sc} = n_s \cdot V_{co}$.

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



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 D_p 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 V_d de la tension directe de conduction de la diode choisie et la puissance dissipée à $V_d \cdot I_s$. Des modules commercialisés incluent maintenant ces diodes parallèles de protection contre les tensions inverses. De façon duale, une diode anti-retour D_r 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.

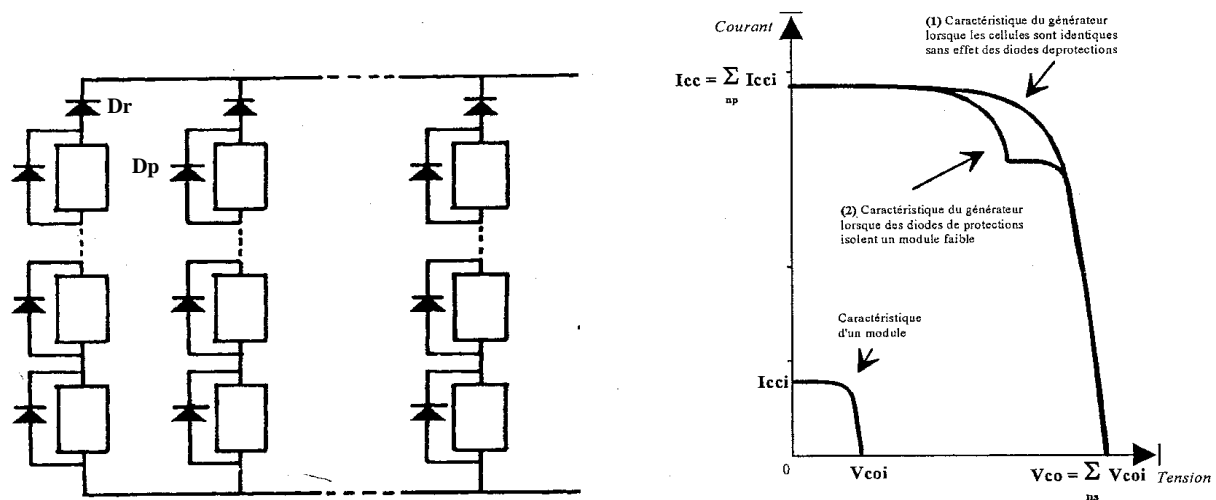


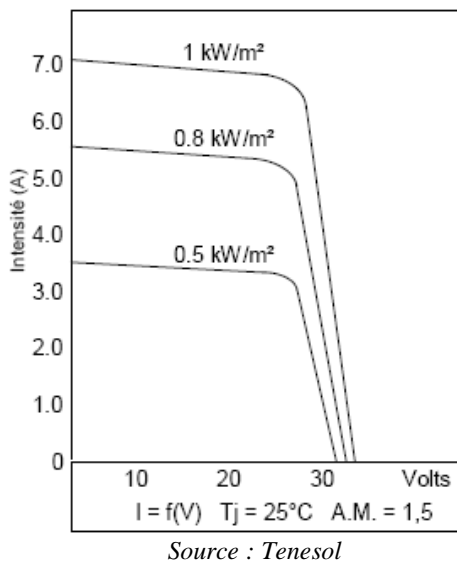
Figure 10 et 11: câblage série / parallèle de modules photovoltaïques avec leurs diodes de protection. Caractéristiques d'un générateur à $np \times ns$ cellules en parallèle et série identiques. Effet des diodes de protection avec cellules faibles

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.

2.5 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

2.5.1 Caractéristiques $I=f(U)$

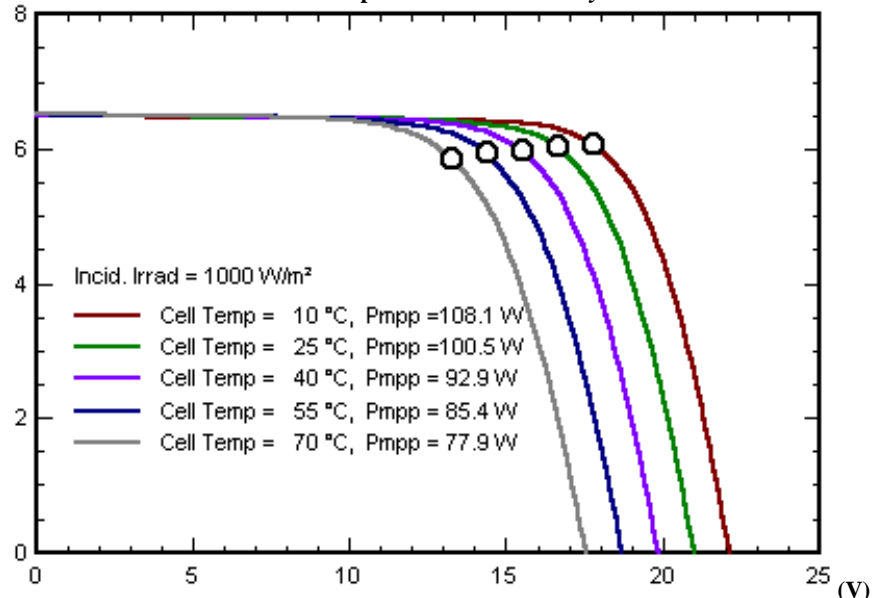
(A)



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

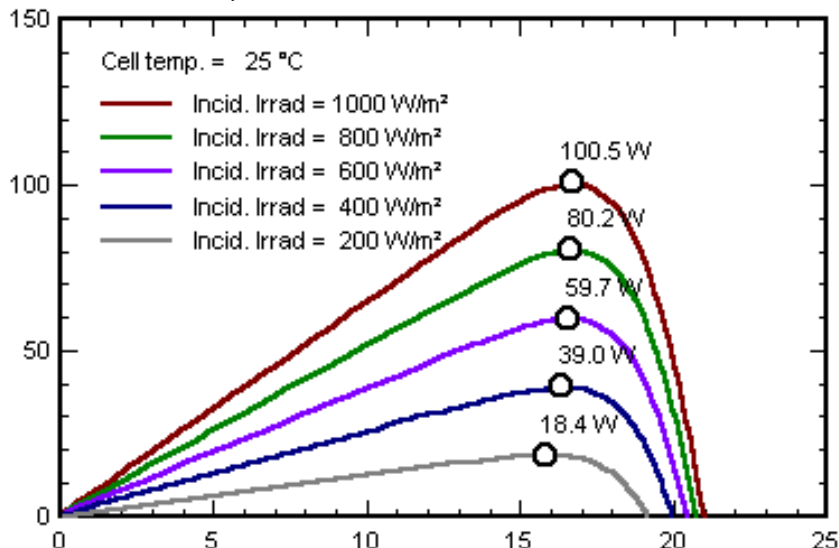
Effet de la température :

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



2.5.2 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 kW / m² ;
- température de la cellule PV égale à + 25 °C.
- Masse d'air AM 1,5

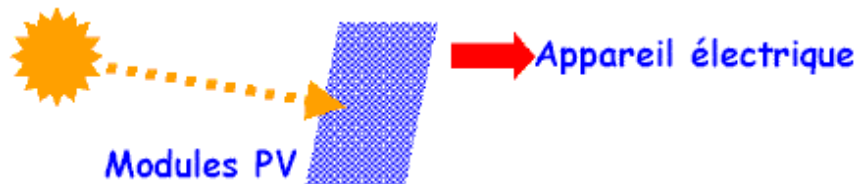
Utilisation optimale d'une cellule, détermination du MPPT (Maximum Power Point Tracking)

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)

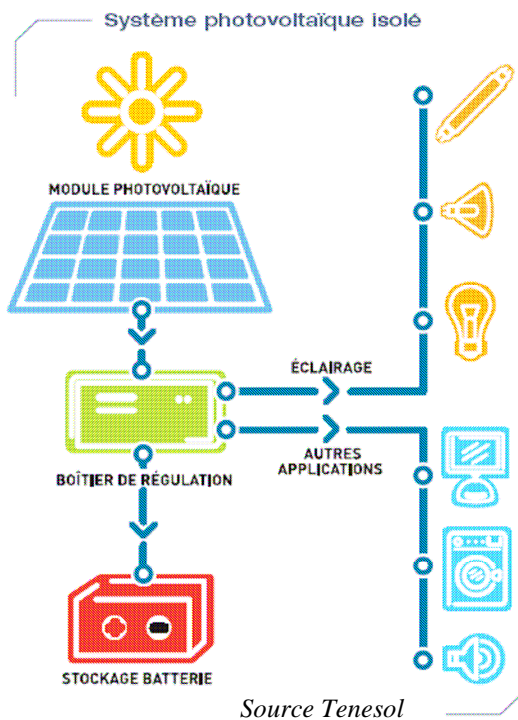
3- LES DIFFERENTS TYPES D'UTILISATION DE GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES

3.1 Alimentations électriques faibles puissances

Les alimentations électriques faibles telles que les calculatrices ou les chargeurs de piles. Des modules PV peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.



3.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes

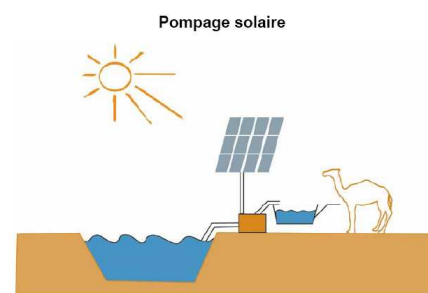


En site isolé le champ photovoltaïque peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique en l'absence de soleil.

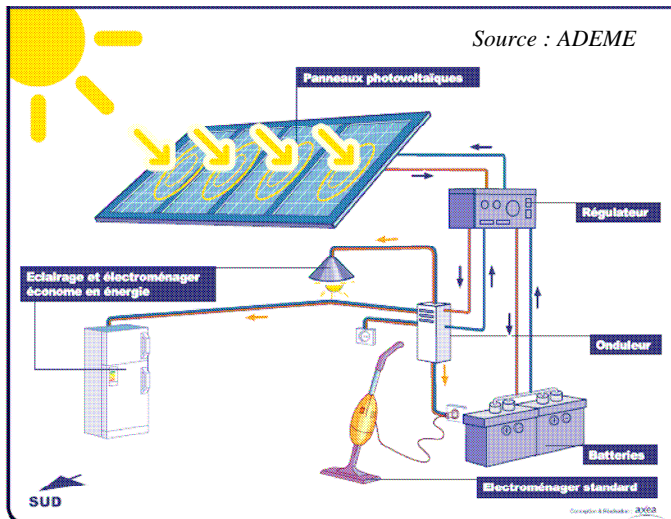
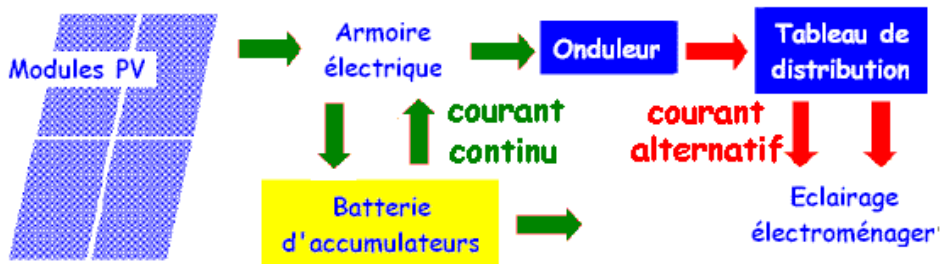
Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques:

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en oeuvre réduits.



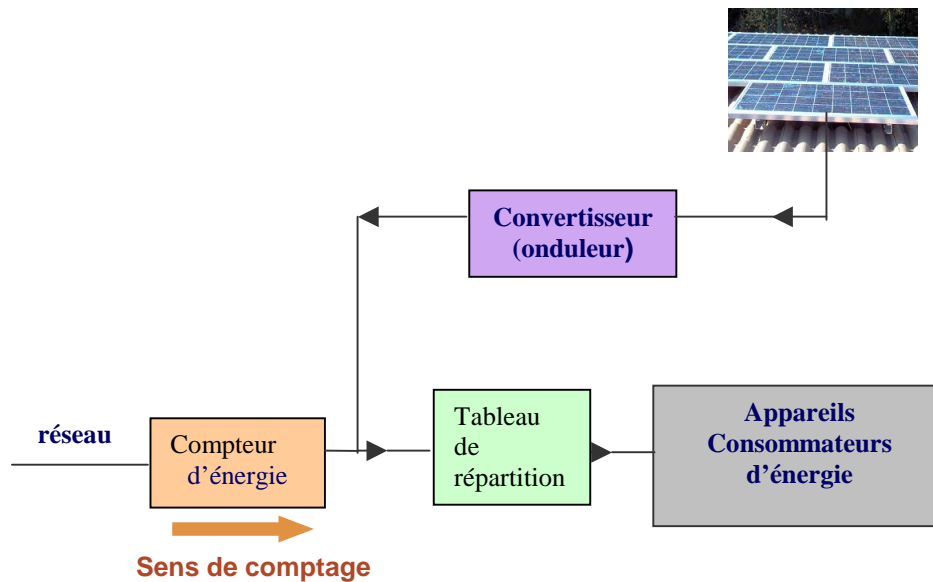
En site isolé on peut utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur.



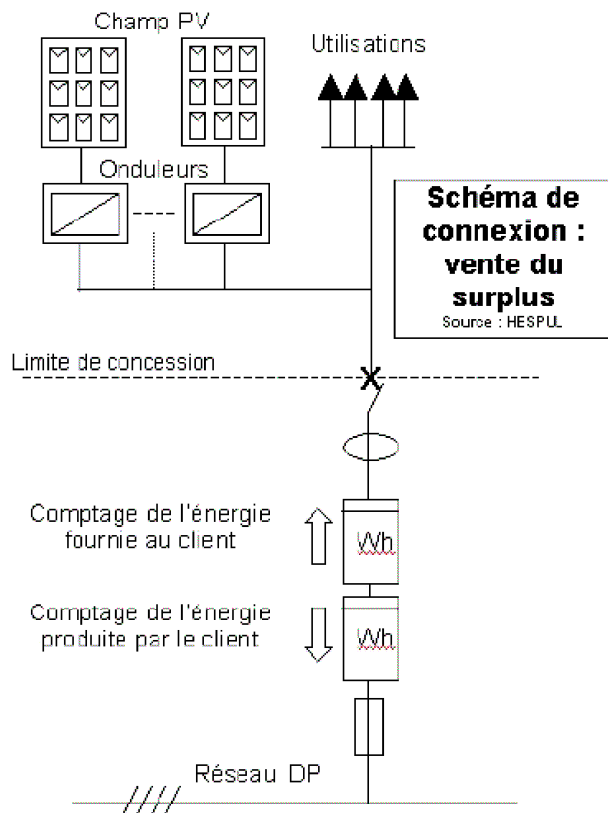
Un **onduleur** est un dispositif électronique et statique qui convertit le courant électrique continu en courant alternatif avec la fréquence souhaitée.

3.3 Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau

3.3.1 Installation PV raccordée au réseau sans injection (« auto-consommation »)



3.3.2 Installation PV raccordée au réseau avec injection des excédents de production



Le propriétaire de l'installation doit établir deux contrats pour être en mesure de vendre une partie de l'électricité photovoltaïque produite à tarif bonifié :

- un contrat de raccordement au réseau public de distribution de l'électricité,
- un contrat d'achat de l'électricité par « l'acheteur » (EDF).

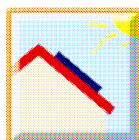
Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie (EDF ...) et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque votre production dépasse votre consommation.

Le compteur de vente qui enregistre le courant injecté est installé sur la partie de ligne appartenant au réseau de distribution publique DP.

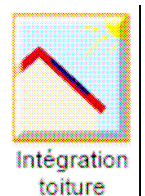
3.3.3 Tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque

le tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque a été fortement revalorisé en 2006 (Le décret d'application est paru au journal officiel le 26/07/2006). Soit :

- 0,30 e / kWh pour les installations de type "surimposé" (par exemple sur le toit existant d'une maison)
- 0,55 e / kWh pour les installations dites "intégrées" au bâtiment.

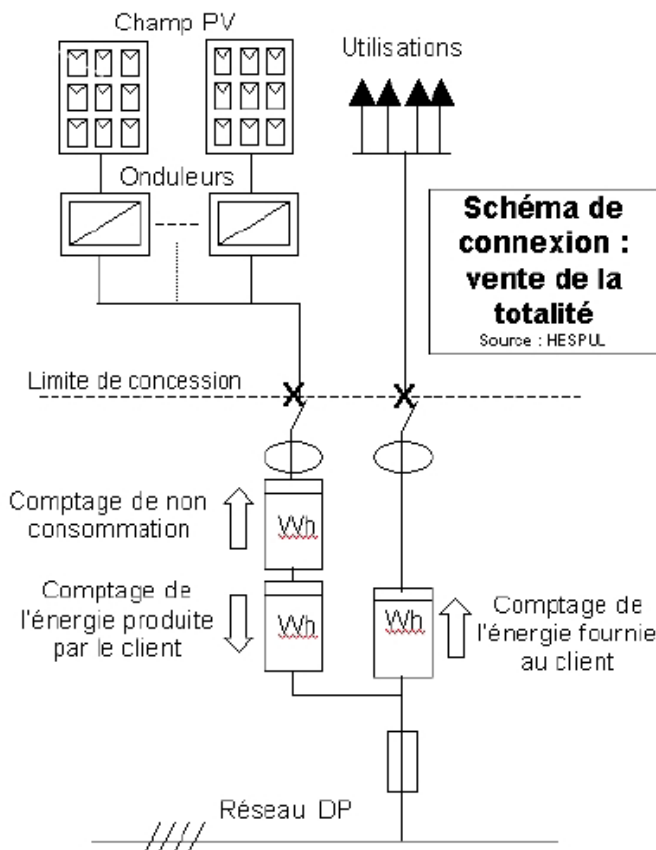


Posé sur
toiture



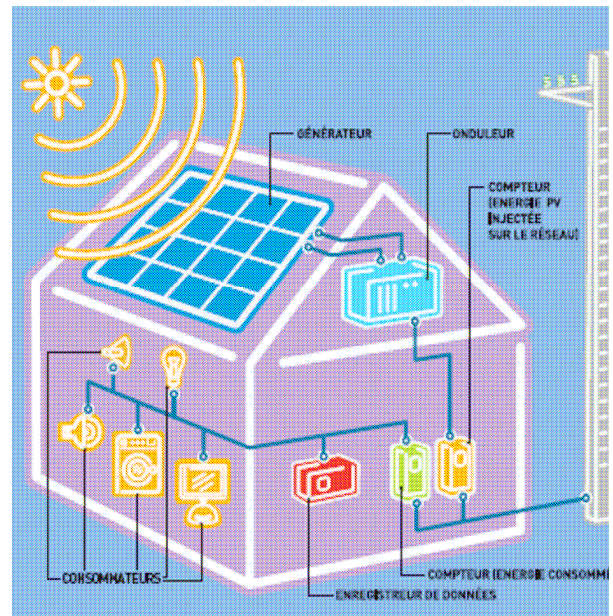
Intégration
toiture

3.3.4 Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite



La tête de l'installation comprendra 2 disjoncteurs et 3 compteurs :

- un pour compter l'énergie d'origine photovoltaïque produite (« **comptage énergie produite par le client** »),
- un pour compter l'énergie achetée au fournisseur et consommée par les récepteurs de l'installation (« **comptage énergie fournie au client** »),
- et un pour que le fournisseur d'énergie s'assure que le client ne consomme pas de l'énergie sur la ligne électrique de production (« **comptage de non consommation** »).



Source Tenesol

4- PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE EN SITE ISOLÉ

4.1 Estimation des besoins journaliers en électricité (en Wh/j) :

Etablir un bilan énergétique des appareils à alimenter:

- Tension d'alimentation: 12V 24V 48V
 - Puissance instantanée
 - Nombre d'heures d'utilisation par jour
- } BESOIN EN ENERGIE JOURNALIER BJ en Wh/jour

4.2 Estimation de la capacité de stockage requise (en Ah) en fonction de l'autonomie désirée :

On détermine une durée d'autonomie des batteries afin d'alimenter les récepteurs sans l'aide des modules photovoltaïques: nombre de jours d'autonomie (j).

On fixe un degré de décharge des batteries à ne pas dépasser. (50 à 70%)

$$Cbatt(A.h) \geq B_j(Wh) \cdot \text{autonomie}(j) / [(tension(V) \cdot \text{Degré de décharge batt}(\%)]$$

4.3 Estimation de l'irradiation journalière (en Wh/j/m²)

A l'aide de cartes ou de logiciels, on peut déterminer l'irradiation journalière minimum (journée d'hiver) **Hmin (Wh/j/m²)** estimée en fonction de l'inclinaison (horizontal, vertical, 30°, ...etc.) et l'orientation (sud, sud-est, ...etc.) des panneaux PV.

Attention : Pour obtenir une production maximale du toit solaire, il faut éviter tout ombrage des panneaux pendant la période d'ensoleillement à tout moment de la journée et aux différentes saisons. Il est parfois impossible d'éviter totalement les masques : montagnes, arbres, cheminée, poteau électrique... peuvent constituer autant d'obstacles qui vont provoquer des pertes plus ou moins importantes. On peut tailler un arbre mais il est difficile de déplacer une montagne ! C'est pourquoi il peut être utile de mesurer ces pertes à l'aide d'un "relevé de masques".

4.4 Détermination de la puissance crête Pc

$$P_{\text{crête}} = B_j(\text{Wh}) / [H_{\text{min}}(\text{kWh/m}^2) \cdot \eta_{\text{batt}} \cdot \eta_{\text{elec}}]$$

Hmin: l'irradiation journalière (en Wh/j/m²)

η_{batt} : rendement énergétique des batteries 70%

η_{elec} : rendement énergétique des autres composants électroniques :90%

4.5 Estimation du champ PV

4.6 Dimensionnement du circuit électrique.