

ÉNERGIE SOLAIRE

1 . Le potentiel solaire.

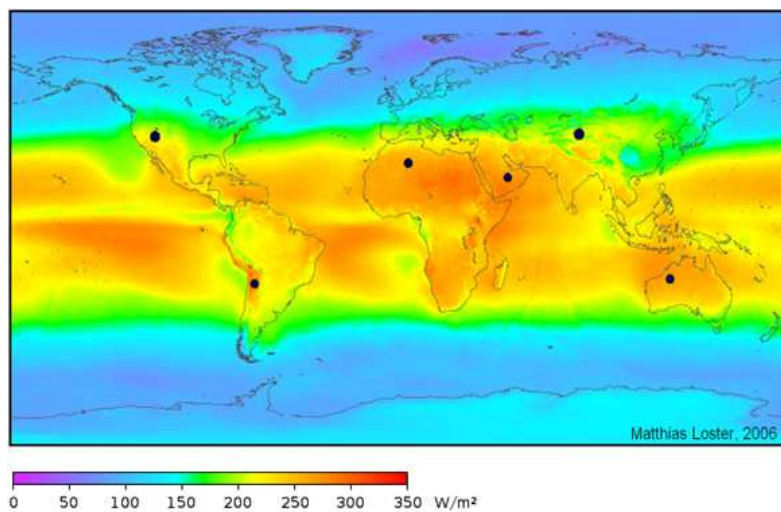
La Terre intercepte une infime partie de l'énergie rayonnée par le soleil : Environ $1,6 \times 10^{18}$ kWh par an (soit une puissance moyenne de 180×10^6 GW)

Une partie de ce capital est absorbée par le sol puis réémise (un peu moins de la moitié), afin de maintenir une température au sol acceptable pour l'Homme.

En admettant qu'on puisse « récupérer » 1% de ces $1,6 \times 10^{18}$ kWh, ceci représenterait plusieurs dizaines de fois la consommation énergétique humaine actuelle !!
On voit donc l'énorme potentiel représenté par « l'énergie solaire ».

L'ensoleillement mondial :

Selon les régions du globe, 1 m^2 de sol horizontal reçoit une énergie comprise entre 600 et 2500 kWh par an ; ceci correspond à une puissance *moyenne* de 70 à 280 W / m^2 .

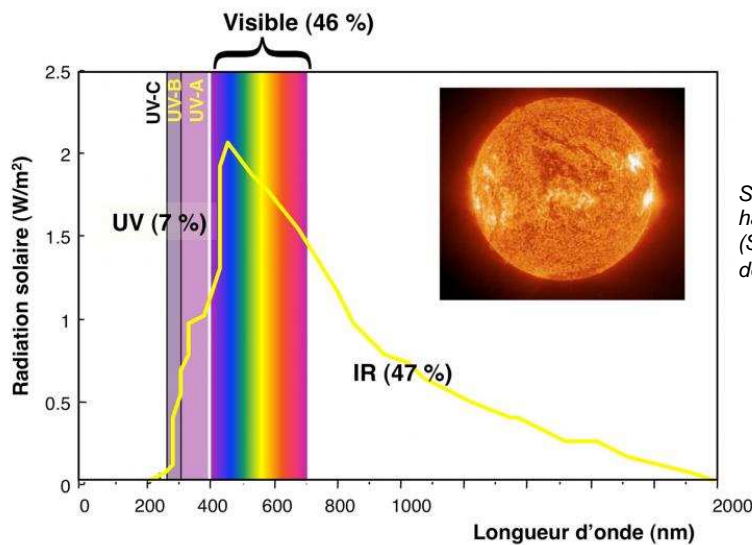


Pour la France, l'ensoleillement journalier est compris entre 3 et 5 kWh par m^2 et par jour (voir carte d'ensoleillement ci-dessous)



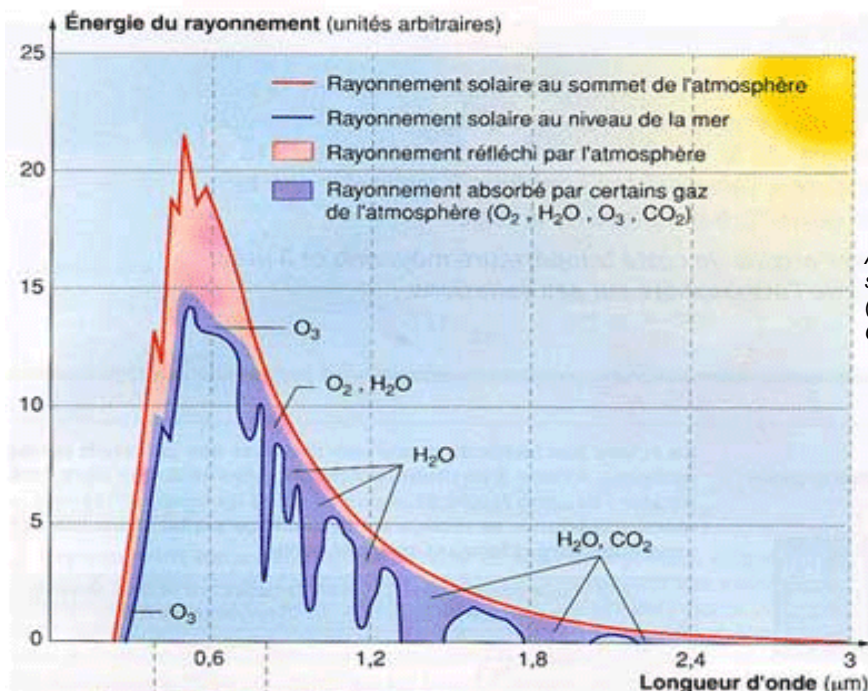
2. Caractéristiques du rayonnement solaire.

L'énergie solaire arrive sous la forme d'un rayonnement dont les longueurs d'onde vont de l'ultraviolet à l'infrarouge, avec un maximum vers 550 nm, soit une nuance jaune-vert.



Spectre du rayonnement solaire en haute atmosphère.
(Source CNRS ; Institut National des Sciences de l'Univers)

Le spectre du rayonnement parvenant au niveau de la mer diffère quelque peu, car les constituants de l'atmosphère absorbent sélectivement dans certaines bandes de longueurs d'onde.



Absorption et réflexion du rayonnement solaire par l'atmosphère
(Source CNRS ; Université de Lyon ; Géosciences)

La puissance reçue, hors atmosphère, est, en moyenne de 1350 W/m^2 (Plus précisément, 1366 W/m^2 avec des variations entre 1320 et 1410 W/m^2), et ce, pour une direction perpendiculaire au rayonnement.

Elle est notée AM0. (pour « air-mass 0 »)

Après la traversée de l'atmosphère, cette puissance diminue, et on définit de nouvelles références :

- AM1 (au niveau de l'équateur où le rayonnement a traversé l'épaisseur normalisée de l'atmosphère),
- AM1,5 et AM2 (où le rayonnement a traversé 1,5 ou 2 fois l'épaisseur de l'atmosphère)

La puissance AM1,5 standard (soit 1000 W/m^2) est la référence pour les calculs énergétiques au sol.

3. Orientation d'un capteur solaire.

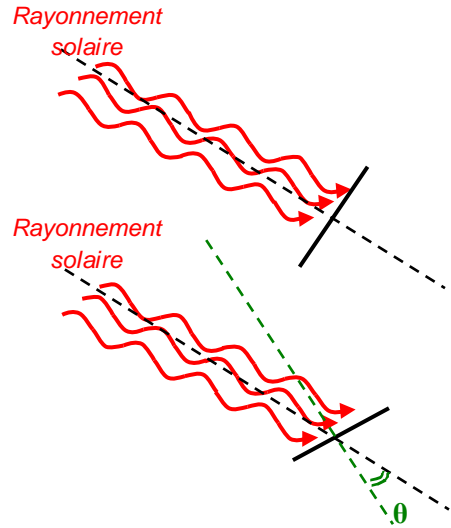
Raisonnons sur un capteur solaire plan. (la majorité des capteurs actuellement)

Soit un capteur de surface S , placé en un lieu où la densité du rayonnement solaire correspond à une puissance surfacique P_S (en W / m^2)

Lorsque le capteur est orienté perpendiculairement au rayonnement, il reçoit une puissance $P_1 = P_S \times S$.

Si le capteur tourne d'un angle θ , tout se passe comme s'il présentait une surface $S \times \cos\theta$ au rayonnement.

Il reçoit dans ces conditions, une puissance $P_2 = P_S \times S \times \cos\theta$, c'est-à-dire inférieure à P_1 .

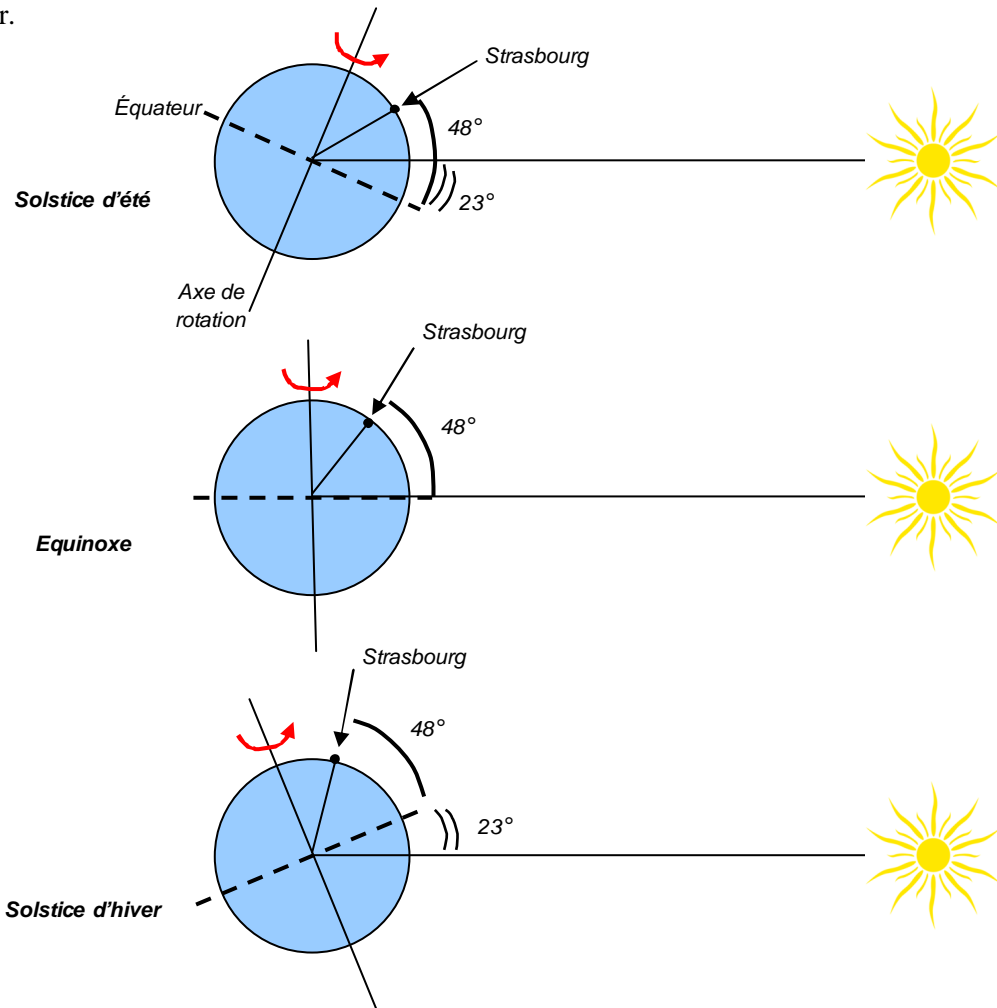


On voit ainsi l'intérêt à maintenir un capteur solaire orienté perpendiculairement au rayonnement solaire.

La position du soleil changeant avec l'heure, la saison et le lieu, il va falloir :

- Soit trouver un compromis dans l'orientation de capteurs fixes.
- Soit munir ces capteurs d'un dispositif de « poursuite » du soleil (tracker)

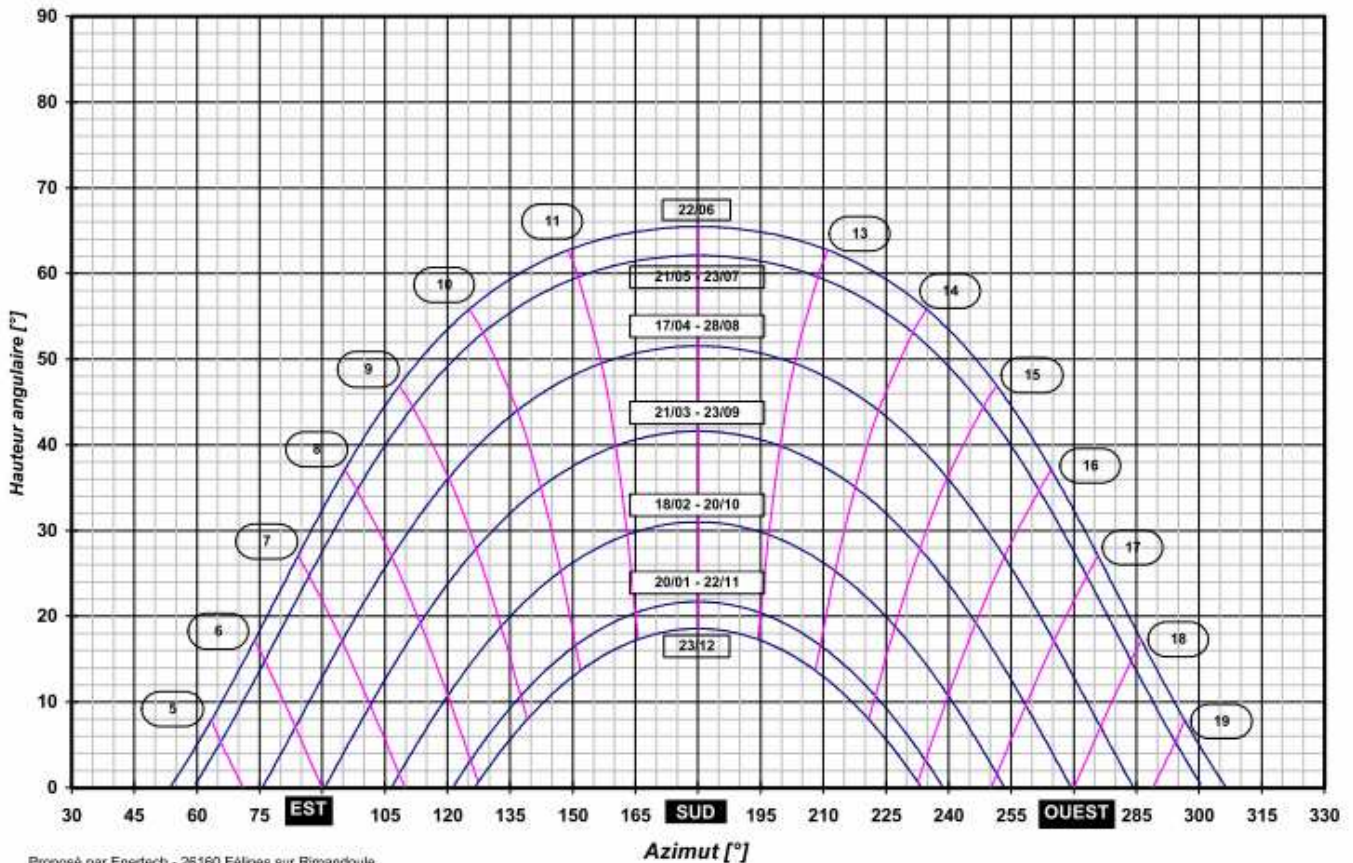
On a représenté ci-dessous l'orientation de la terre par rapport au soleil, à midi, au solstice d'été, aux équinoxes et au solstice d'hiver.



Pour une ville telle que Strasbourg, située à une latitude nord de 48° environ, la hauteur apparente du soleil au dessus de l'horizon, pour l'heure midi, va onduler autour de $90^\circ - 48^\circ \approx 42^\circ$ (aux équinoxes), pour atteindre $90^\circ - 48^\circ + 23^\circ \approx 65^\circ$ au solstice d'été et $90^\circ - 48^\circ - 23^\circ \approx 19^\circ$ au solstice d'hiver.

La hauteur du soleil varie aussi selon l'heure, comme le montre le diagramme solaire ci-dessous, construit pour une latitude de 48° :

TRAJECTOIRES DU SOLEIL
(Latitude = 48° N)



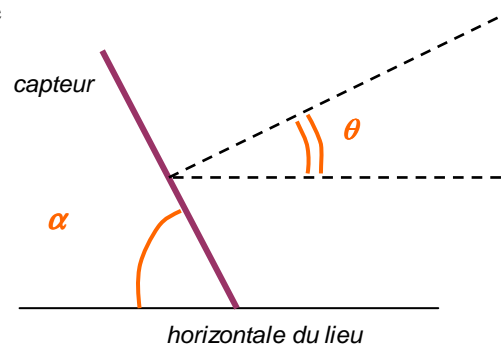
En pratique, l'orientation d'un capteur solaire fixe est choisie de manière à favoriser la production énergétique du mois le moins ensoleillé de la période envisagée d'exploitation, face au sud dans l'hémisphère nord.

En conséquence, pour des latitudes entre 40 et 50° , on convient d'incliner les capteurs solaires d'un angle α égal à celui de la latitude du lieu, augmenté de 15° , et ce, par rapport à l'horizontale.

On obtient la disposition représentée à droite :

Pour la latitude 48° , il vient $\alpha \approx 63^\circ$; dans ces conditions, la hauteur optimale θ du soleil est de l'ordre de 27° , ce qui est atteint, à midi, et pour cette latitude, début février et début novembre.

Il est à noter qu'un écart de quelques degrés par rapport à cette situation affecte peu l'efficacité moyenne de la captation d'énergie sur une année.

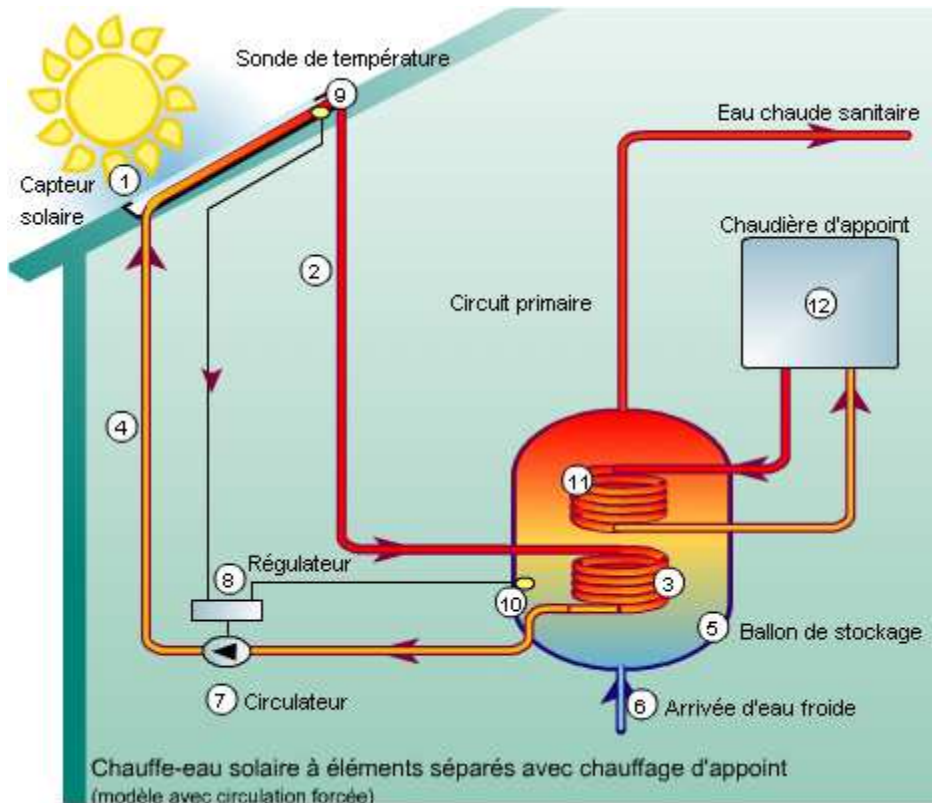


Actuellement, la captation de l'énergie solaire débouche sur 2 applications principales :

- Production d'eau chaude. (Le « solaire thermique »)
- Production d'électricité. (Le « solaire photovoltaïque »)

4 . Le solaire thermique.

Une installation solaire thermique, chargée de produire l'eau chaude domestique, s'organise généralement comme représenté ci-dessous :



Le capteur solaire (1) permet de réchauffer un fluide caloporteur (4) et (2), qui est envoyé à un échangeur (3) placé dans le ballon de stockage (5).

Selon la disposition, la circulation est forcée par un circulateur (7), ou bien peut fonctionner en thermosiphon.

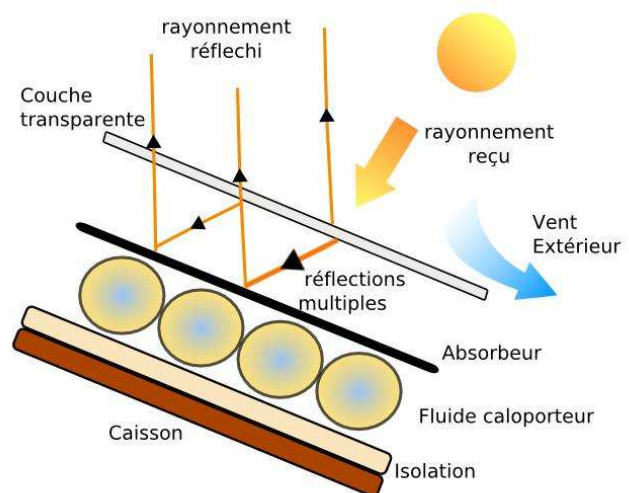
La gestion de la circulation de fluide est assurée par un régulateur (8), servi par diverses sondes de température (9) et (10).

Afin de pallier à un déficit d'ensoleillement durable, on peut incorporer une chaudière d'appoint (12), associée à un second échangeur (11).

Description des principaux types de capteurs :

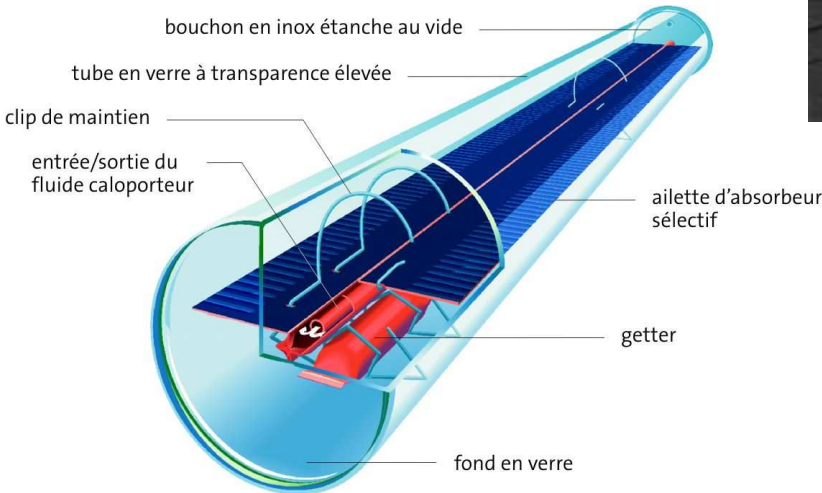
• Le capteur plan vitré

Il est composé d'un circuit en cuivre, placé sous un absorbeur de couleur noire.
Un vitrage ajoute l'effet de serre.
Le fluide caloporteur parcourt le circuit en cuivre.



• Le capteur à vide

Son principe ressemble à celui du capteur plan vitré, à ceci près que le circuit caloporteur est placé dans des tubes de verre ou un vide assez poussé est réalisé (voir détails ci-dessous) Les déperditions énergétiques sont ainsi fortement diminuées, et la température du fluide caloporteur peut atteindre des valeurs élevées (plus de 80 °C)



L'efficacité énergétique de ces 2 types de capteurs a été évaluée et comparée par plusieurs organismes indépendants tels que le CSTB en France (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)

Quelques conclusions :

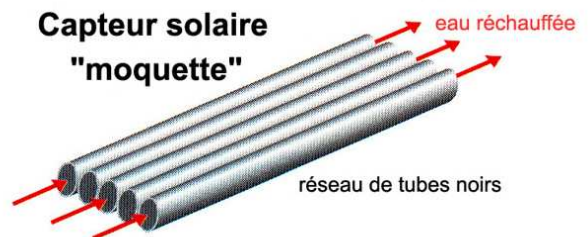
- Contrairement à ce qu'on pourrait penser, le capteur plan produit (au m² installé) une plus grande quantité d'énergie que le capteur à vide.
- Par temps hivernal, la meilleure isolation du capteur à vide est un inconvénient pour la dissipation du givre ; de même, le capteur plan retient moins la neige que le capteur à vide.
- La production moyenne annuelle est de 200 à 250 kWh / m² ; la surface moyenne installée de 4 à 5 m² par famille, ce qui permet de couvrir environ les 2/3 de la production d'eau chaude sanitaire. Chaque individu consomme environ 33l d'eau à 50°C par jour ! (Source :CSTB, juillet 2006 ; mesures sur plus de 100 installations réparties en Alsace, Rhône-Alpes, Languedoc-Roussillon et PACA)
- Les résultats ne font pas apparaître d'influence significative de la région et donc du climat sur la production solaire.

• Le capteur « moquette »

Ce capteur est simplement constitué d'un réseau de tubes de plastique noirs, dans lesquels circule directement l'eau à réchauffer.

Le $\Delta\theta$ n'atteint que 5 à 10°C, ce qui destine ce capteur au chauffage de piscines.

(Compter 1 m² de capteur moquette pour un plan d'eau de 2 à 3 m²)



5. Le solaire photovoltaïque.

5.1 La cellule photovoltaïque.

La cellule élémentaire de production d'électricité est une jonction PN (diode) de grande surface, éclairée du côté N.

Principe

Des photons d'énergie suffisante sont absorbés dans la zone N et provoquent la création d'une paire électron - trou au voisinage de la jonction « métallurgique ».

Sous l'effet du champ électrique interne à la cellule, les porteurs créés sont attirés vers les extrémités opposées de la jonction.

Les électrons sont collectés sur la cathode (zone N éclairée), alors que les trous sont collectés sur l'anode (zone P).

La jonction éclairée se comporte ainsi comme un générateur électrique, dont l'anode est le pôle + et la cathode le pôle -.

La fém V_{C0} varie comme le log de l'éclairement (0,1 à 0,6V environ), tandis que le courant de court-circuit varie comme l'éclairement reçu (peut atteindre plusieurs centaines de mA).

Efficacité :

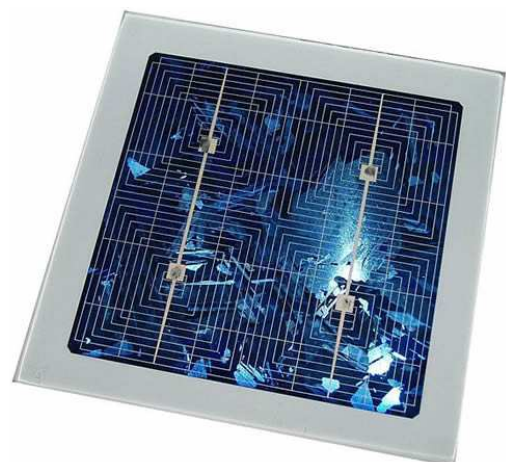
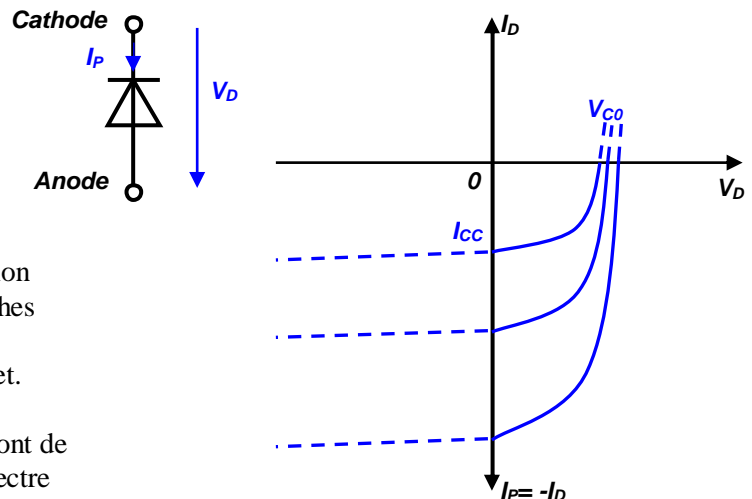
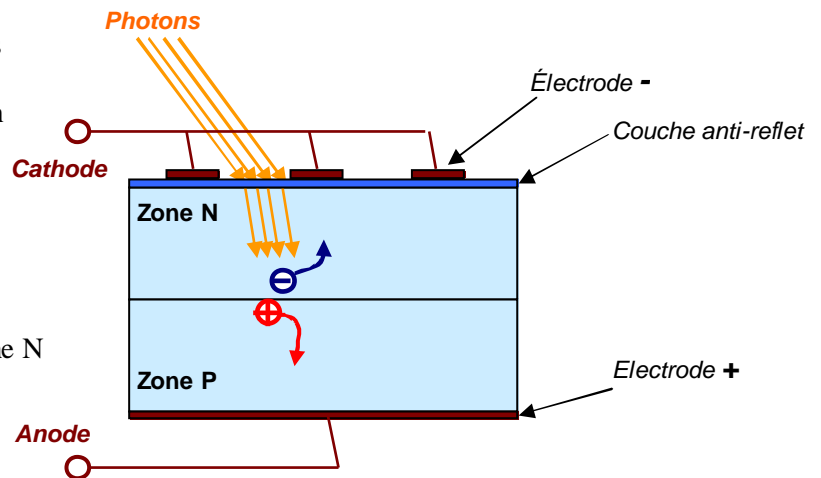
- Les photons incidents doivent atteindre la « jonction métallurgique » : La cellule est fabriquée en couches de quelques dizaines à quelques centaines de μm . La face d'entrée est munie d'une couche anti-reflet.
- L'énergie de ces photons doit être suffisante : Pour le silicium, les longueurs d'onde efficaces vont de 300 μm à 1000 μm environ, ce qui englobe le spectre solaire parvenant au sol.
- Le rendement énergétique (puissance électrique sur puissance lumineuse) possède un maximum *théorique* de l'ordre de 30%.

Technologies :

Cellules monocristallines. Ce sont les plus performantes, mais leur coût de fabrication reste élevé.

Cellules polycristallines. La présence de joints entre les grains de silicium pénalise le rendement, mais le coût est beaucoup plus faible que les précédentes. (rendement théorique maxi de 20%)
La durée de vie des cellules mono et polycristallines est de l'ordre de 30 à 35 ans. Elles représentent 80% de la production (2010)

Cellules en couches minces au silicium amorphe (non cristallisé et structure désordonnée). Rendement plus faible (moins de 12%) mais peuvent fonctionner à de très faibles éclaircissements.
Leur durée de vie est de l'ordre de 10 ans à l'extérieur ; elles sont réservées à des usages spécifiques comme l'alimentation de certaines calculatrices.



Cellule photovoltaïque polycristalline

Cellules en couches minces.

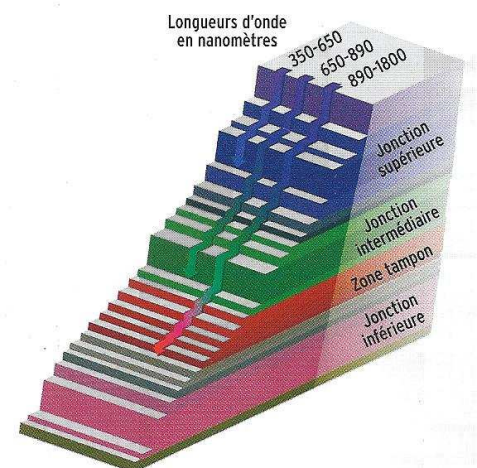
Une filière est en plein développement : La réalisation de cellules en couches micrométriques, déposées sur un matériau bon marché (verre, feuille métallique, plastique...)

- Par ex. : - Les cellules à base de silicium amorphe, en triple couche *P, I, N* (I pour intrinsèque, ou non dopé, favorisant la création de porteurs), dont le rendement modeste est compensé par un coût de fabrication assez faible ;
- Les cellules à base de sulfure de cadmium (zone N transparente) et tellure de cadmium (zone P) qui pèsent près de 10% du marché et sont passées sous la barre de 1\$ / watt-crête en 2009ⁱ. (mais avec le problème de la toxicité du cadmium...)
 - Les cellules à base de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIGS) ; la technique de fabrication est plus complexe, mais il y a plus de flexibilité pour optimiser leurs propriétés.
 - Les cellules mettant en jeu des matériaux actifs organiques, dont les rendements prometteurs atteignent 5 à 7% actuellement. Ces cellules utilisent un colorant photo-actif, diffusé dans une matrice inorganique nanométrique, type oxyde de titane ou oxyde de zinc.

- Il faut enfin citer les structures multijonctions, à base d'alliages dérivés de l'arséniure de gallium. (cf. photo à droite)

La jonction supérieure convertit les photons du domaine ultraviolet, la jonction intermédiaire se charge des photons visibles ; la jonction inférieure se charge enfin des photons du domaine infrarouge.

Cette dernière technologie permet d'approcher des rendements exceptionnels de 40% !



Cellule multijonctions ; source «Pour la Science, dossiers oct-déc 2010 »

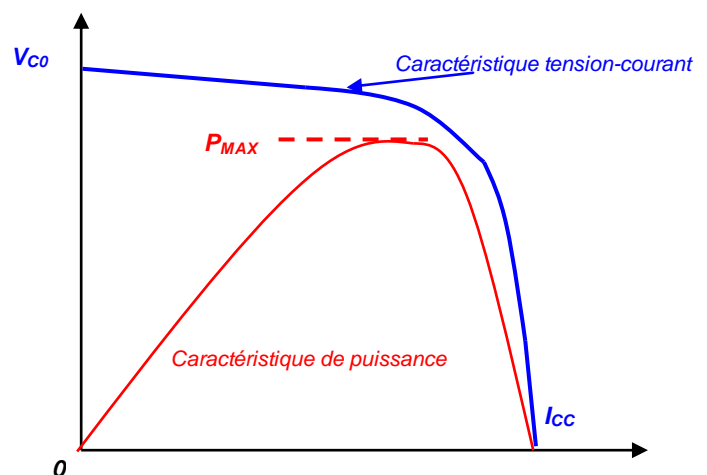
5.2 Panneaux photovoltaïques ; générateurs.

Une cellule solaire standard fournit typiquement 1,3 watt-crête pour une surface de 100 cm².

La plupart des panneaux sont formés de groupements de 36 cellules en série, pour des applications en 12V nominal. Le nombre de groupements détermine la puissance du panneau réalisé.

Pour un panneau donné, la caractéristique tension courant et la courbe de puissance fournie (à température et éclairement constants) ont l'allure ci-contre.

Il y a lieu d'assurer une régulation efficace de la tension ou du courant de sortie du panneau, afin de le faire travailler dans la zone de coude de sa caractéristique électrique. (Et donc au voisinage de la puissance maximale disponible)



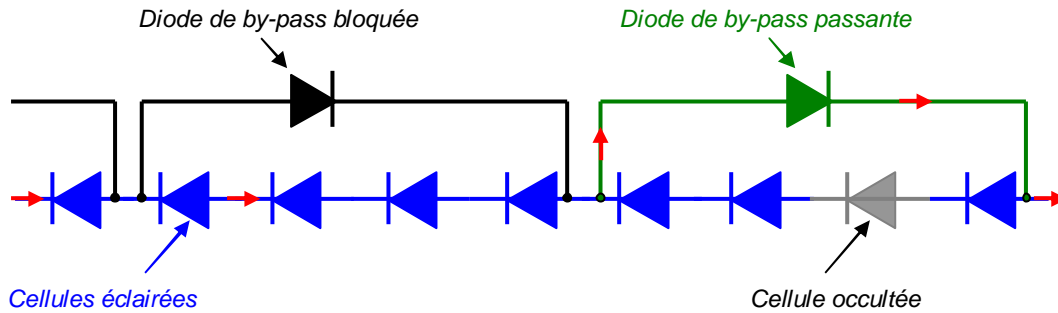
ⁱ Watt-crête : Représente la puissance maximale d'un système photovoltaïque, fournie à 25°C, pour un ensoleillement de 1000W/m².

Remarque : Occultation partielle.

Si une cellule est occultée (poussières, débris...), sa caractéristique courant-tension est profondément modifiée. Les autres cellules du groupement (éclairées) lui imposent un courant très supérieur à son courant de court-circuit. En conséquence, la cellule occultée passe en polarisation inverse ; elle doit dissiper une puissance importante qui provoque un échauffement amenant à sa destruction (hot-spot).

Pour éviter ce phénomène, les panneaux solaires industriels sont munis de diodes de by-pass, câblées en parallèle inverse avec les cellules. (En général, une diode de by-pass pour un ensemble de 9 à 12 cellules)

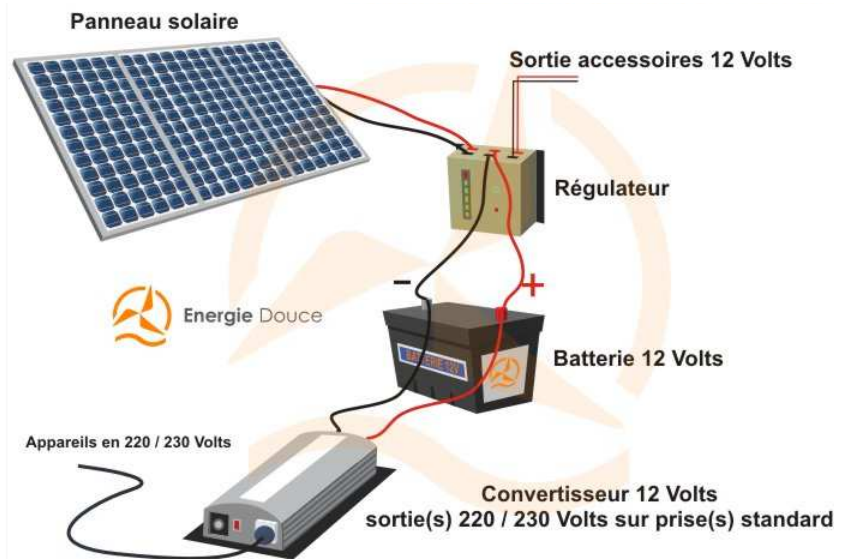
Lorsque une cellule est ainsi occultée, la diode de by-pass passe en conduction et assure le passage du courant, évitant le « hot spot ».



Générateurs solaires

Un générateur solaire comprend, outre le(s) panneau(x) solaire(s), un régulateur permettant le stockage de l'énergie dans des batteries, des batteries, et généralement un onduleur, chargé de convertir l'énergie sous une forme comparable à celle du réseau AC de distribution.

(La sortie AC du générateur peut être couplée au réseau ; le générateur solaire devient ainsi un producteur d'énergie)



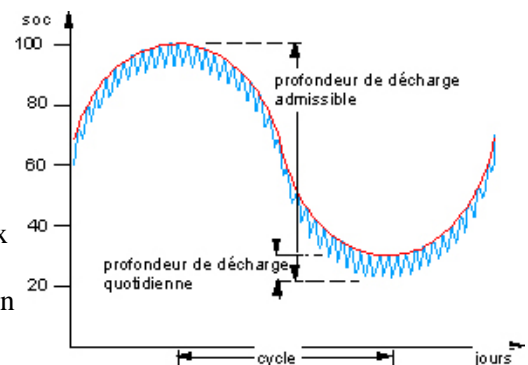
Les batteries.

Les générateurs solaires utilisent des *batteries stationnaires* au plomb.

Ces batteries sont conçues pour restituer un courant stable pendant de longues périodes en conservant leurs aptitudes à la recharge, et ceci à un grand nombre de reprises (cycles), on parle de batteries stationnaires ou à *décharge profonde*.

On opte généralement pour des batteries à profondeur de décharge de l'ordre de 60 à 80% pendant au moins 400 cycles.

Les conditions typiques d'utilisation d'une batterie solaire sont très différentes de celles d'une batterie de démarrage. La batterie à décharge profonde oscille lentement entre des niveaux de pleine charge et de décharge maximale admissible tandis que la batterie de démarrage est rechargée immédiatement après utilisation par l'alternateur.



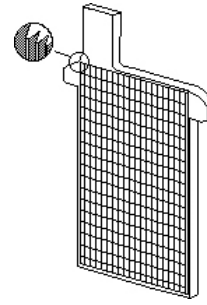
Les plaques (électrodes) de la batterie à décharge profonde sont plus épaisses que celles de la batterie de démarrage et sont fabriquées dans un alliage plus dense et plus élaboré.

Leurs surfaces sont aussi plus réduites, elles ne peuvent donc pas produire de forts courants instantanément ; ce qui justifie l'interdiction d'utiliser même occasionnellement une batterie stationnaire pour démarrer le moteur d'un véhicule (risque de détérioration dès la première utilisation).

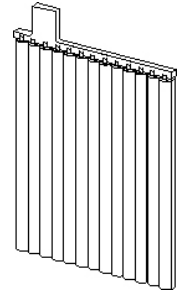
Les plaques (toujours planes et minces) d'une batterie de démarrage se dégradent à une vitesse impressionnante si elles sont soumises à des décharges profondes. Cette batterie subit des dommages dès que la décharge atteint 50% de la capacité nominale, c'est pourquoi elles ne conviennent pas aux systèmes photovoltaïques.

Plus d'informations sur le site du CIPCSP

<http://www.cipcsp.com/index.html>



Plaque mince de batterie automobile



Plaque tubulaire de batterie stationnaire