

# II. Energie solaire

## II.1 Les bases de l'énergie solaire

Le Soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Ainsi peut-on considérer l'énergie solaire comme une ressource énergétique renouvelable fondamentale dans le monde.

Il y a cependant différentes sortes d'énergie solaire:

- *l'énergie solaire historique* : les combustibles fossiles (non renouvelables !);
- *la conversion directe de l'énergie solaire en électricité* : le photovoltaïque ;
- *la conversion directe de l'énergie solaire en chaleur* : le solaire thermique ; et
- *l'énergie solaire indirecte par la photosynthèse* : la biomasse.

Dans ce chapitre, nous allons nous préoccuper seulement des formes dites 'classiques' de l'énergie solaire, c'est-à-dire le solaire électrique (photovoltaïque) et le solaire thermique.

## II.2 Les caractéristiques de la source

### II.2.1 Irradiation

L'irradiation solaire représente une énergie. L'irradiation solaire reçue par un objet dépend de son exposition. Une surface horizontale ne recevra pas la même quantité d'énergie solaire qu'une surface verticale. Ainsi, il convient de toujours préciser la configuration du récepteur lorsqu'on parle d'irradiation reçue.

L'irradiation s'exprime en kWh ou en kWh/m<sup>2</sup> ou en kWh/m<sup>2</sup>/an.

En Algérie, la valeur moyenne de l'irradiation reçue par une surface perpendiculaire aux rayons du soleil est environ de 4500 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le nord et de 7000 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le sud. Concrètement, cela signifie qu'une plaque plane d'un m<sup>2</sup> qui suivrait la trajectoire du soleil, de façon à être toujours perpendiculaire aux rayons, recevrait une quantité d'énergie radiative de 4500 kWh dans le nord et de 7000 kWh dans le sud.

## II.2.2 L'éclairement

L'éclairement représente une puissance. Une puissance est une quantité d'énergie fournie pendant une durée. Elle s'exprime en W qui est équivalent à J/s (joule par seconde). Le joule est une unité d'énergie tout comme l'unité kWh (1 kWh=3600 kJ). 1W correspond donc à 1 joule d'énergie fournie pendant 1 seconde.

L'éclairement direct provenant du soleil varie de 0 à 1000 W/m<sup>2</sup> au cours de la journée, ainsi qu'illustré sur la figure suivante :

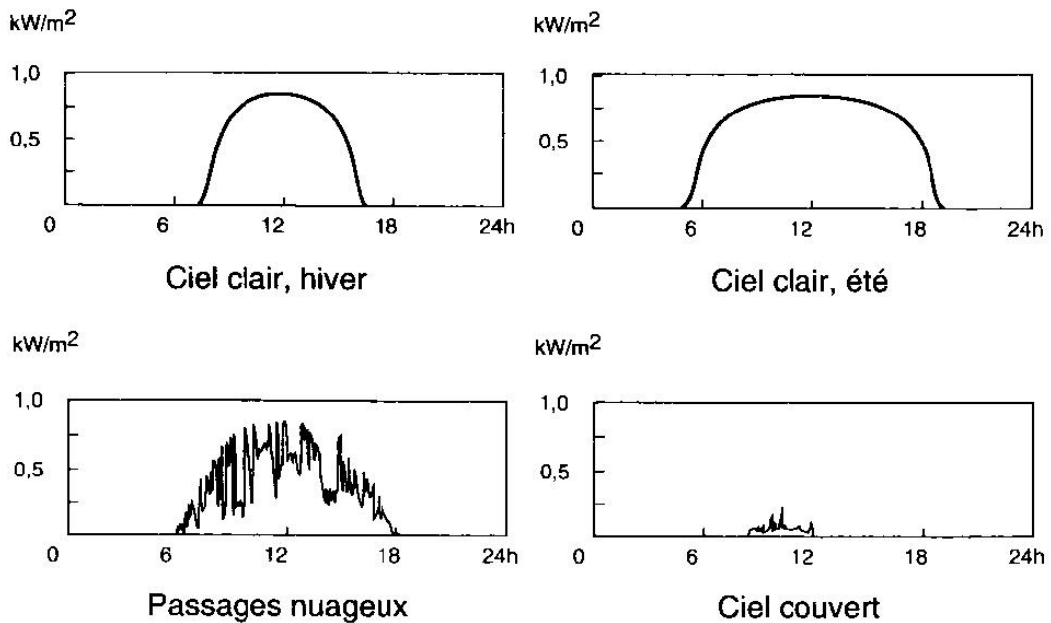


Figure II-1 : L'éclairement direct provenant du soleil au cours de la journée.

Concrètement, si une surface d'un m<sup>2</sup> reçoit 1000 W de puissance radiative pendant 1 heure, alors l'énergie radiative reçue est de 1000 Wh soit 1 kWh. Si cette même surface

reçoit 800 W de puissance radiative pendant 1 heure, alors l'énergie radiative reçue est de 800 Wh soit 0.8 kWh.

## II.3 L'énergie solaire photovoltaïque

### II.3.1 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque

C'est la transformation de l'énergie solaire (le rayonnement solaire) en énergie électrique, en utilisant des cellules photovoltaïques.

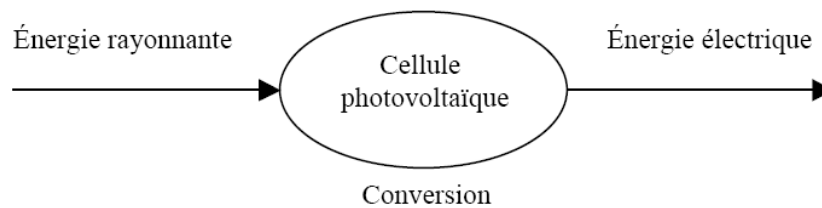


Figure II-2 : Transformation de l'énergie.

Les cellules photovoltaïques au silicium consistent en deux couches dopées, de caractéristiques électriques opposées. Dans la zone de charge d'espace (barrière n-p), les électrons "détachés" par la lumière et les "trous" sont poussés dans des directions opposées, générant ainsi une tension électrique continue de l'ordre de 0,6 V.

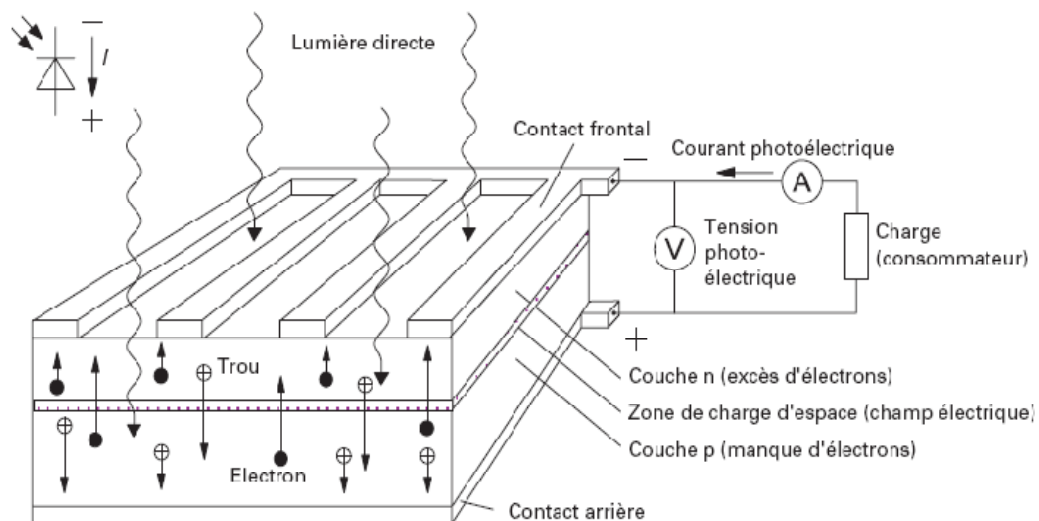


Figure II-3 : Représentation d'une cellule solaire avec barrière de potentiel et courant photoélectrique.

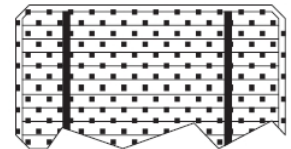
Des couches conductrices ou des bandes de contact sur les faces frontale et arrière permettent de recueillir le courant électrique et de l'utiliser. Les cellules solaires délivrent une tension.

Elles ont les propriétés suivantes:

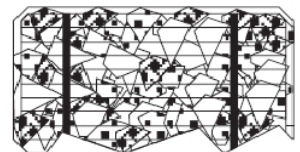
- Ü La tension est pratiquement constante et, de plus, presque indépendante de l'irradiance solaire («intensité du rayonnement»).
- Ü La puissance électrique augmente proportionnellement avec la puissance du rayonnement.

On distingue:

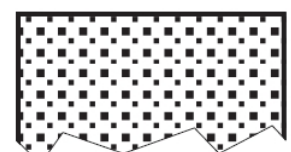
- les **cellules solaires monocristallines**, de surface bleu-gris uniforme et d'un rendement de 14 à 18%. On les obtient en sciant en couches minces un monocristal de silicium fabriqué par tirage.



- les **cellules solaires polycristallines**, qui ont un éclat brillant nacré bleu-gris (multicolore) et un rendement de 10 à 14%. On les prépare en sciant en couches minces un bloc de silicium coulé.



- les **cellules solaires amorphes**, de surface uniformément sombre, utilisées pour la fourniture de l'énergie dans les petits appareils tels que calculatrices, montres, etc. Leur rendement atteint 6 à 10%. On les obtient en déposant des couches minces de silicium sur un matériau de base (substrat).



## II.3.2 Les caractéristiques électriques des cellules et modules

### a. Caractéristiques électriques des cellules

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- ü **Sa tension à vide  $V_{co}$**  : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- ü **Son courant court-circuit  $I_{cc}$**  : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- ü **Son point de puissance maximal **MPP**** : obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}, I_{opt}$  (parfois appelés aussi  $V_{mpp}, I_{mpp}$ ).

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises. Ces conditions sont : émission lumineuse de 1 000 W/m<sup>2</sup>, température de 25 °C.

Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de 0.5V- 3.5A- 2.1 Wc.

- ü **Facteur de forme **FF**** : C'est le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule sur le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{Surface (A)}{Surface (B)} \quad \text{Eq (II-1)}$$

- ü **Rendement  $\eta$**  : c'est le rapport entre la puissance fournie et la puissance lumineuse incidente. Cette mesure se fait dans des conditions d'éclairage et de température normalisées.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc}} \quad \text{Eq (II-2)}$$

ü **La puissance crête  $P_c$**  : est la puissance maximale que peut fournir le module dans des conditions optimales d'ensoleillement ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) à  $25^\circ\text{C}$

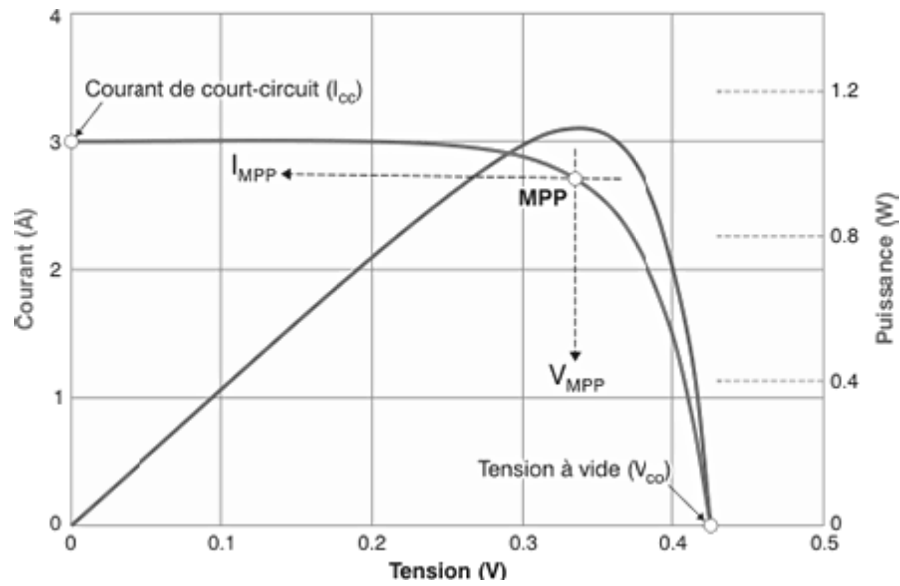


Figure II-4 : Les courbes PV et IV.

La puissance photovoltaïque produite diminue si :

- l'éclairement diminue.
- la température de la cellule augmente.

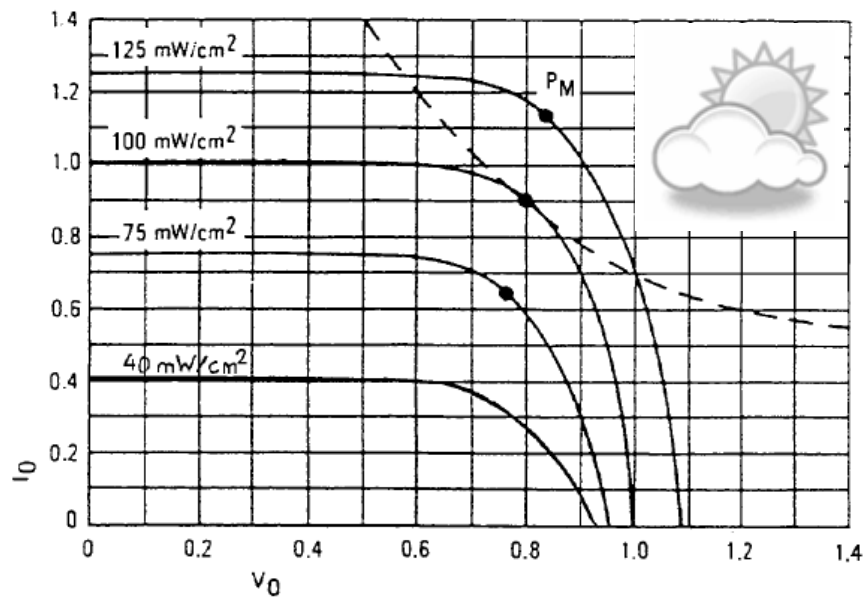


Figure II-5 : Effet de l'éclairement sur la courbe IV.

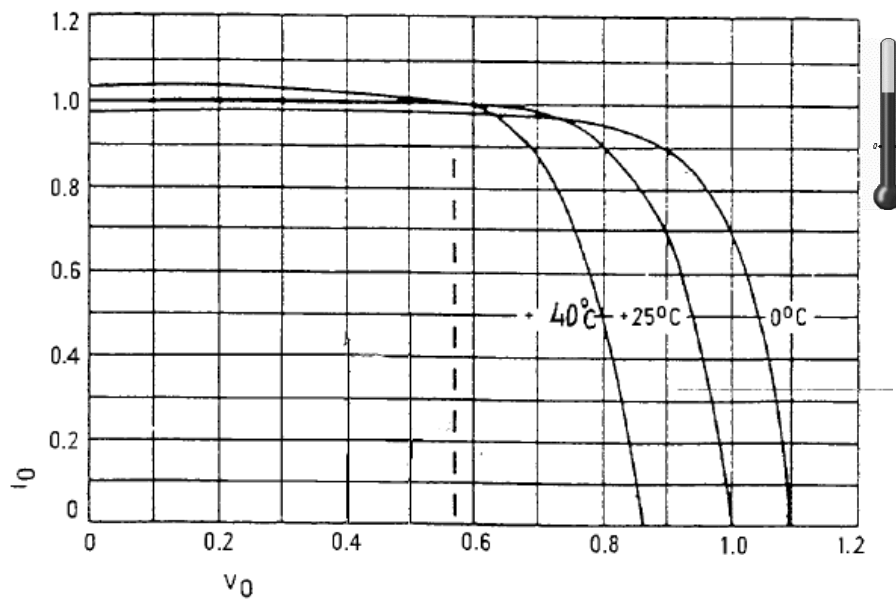


Figure II-6 : Effet de la température sur la courbe IV

#### b. Raccordement des cellules entre elles

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm<sup>2</sup> (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable.

Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

**Association en série :** Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

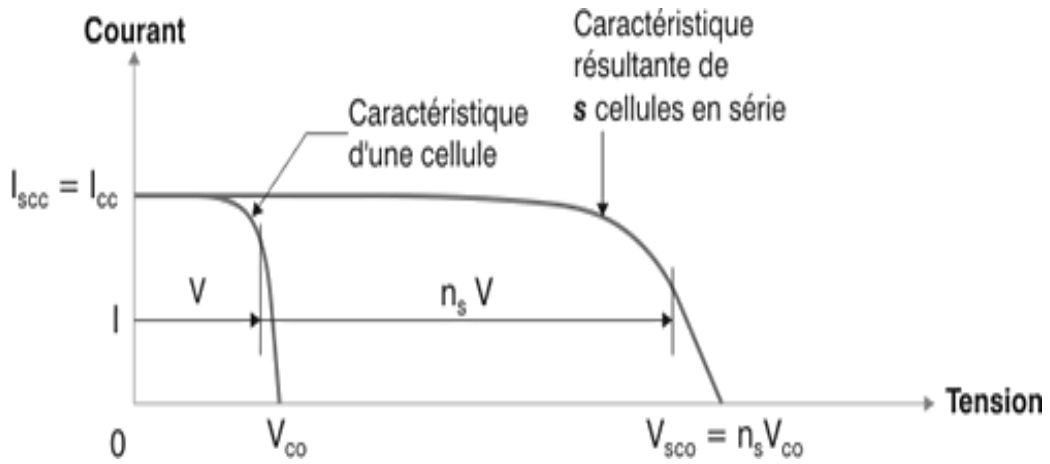


Figure II-7 : La courbe IV résultante de l'association en série des cellules

**Association en parallèle :** Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

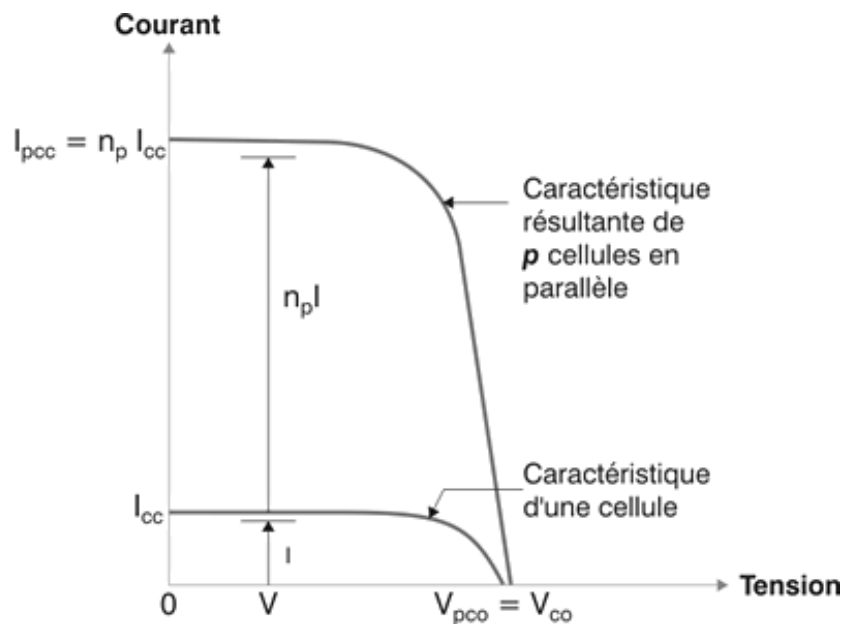


Figure II-8 : La courbe IV résultante de l'association en parallèle des cellules



**Les caractéristiques globales** d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des  $n_s \cdot n_p$ .

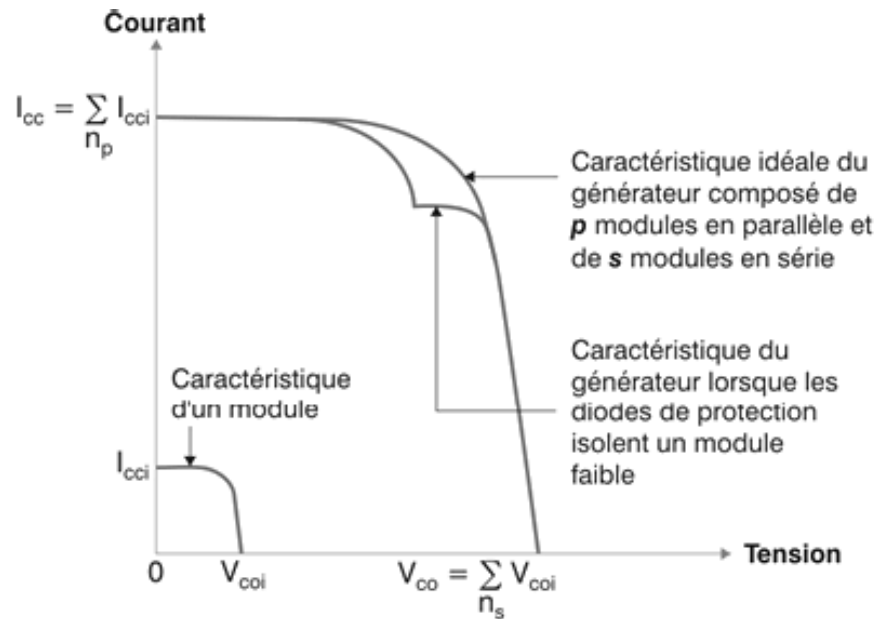


Figure II-9 : La courbe IV résultante de l'association en série et parallèle des cellules

### II.3.3 Protection des cellules et modules.

#### a. Diodes « by-pass »

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire.

En effet, une cellule "masquée" voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe.

C'est l'effet d'auto-polarisation inverse. Une telle cellule est appelée "Hot spot".

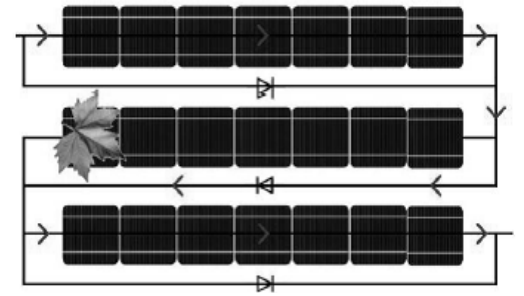
Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes « bypass » en antiparallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes bypass).

ü 1 diode : 100 % du module est en by-pass,

ü 2 diodes : 50 % du module est en by-pass,

ü 3 diodes : 33 % du module est en by-pass.

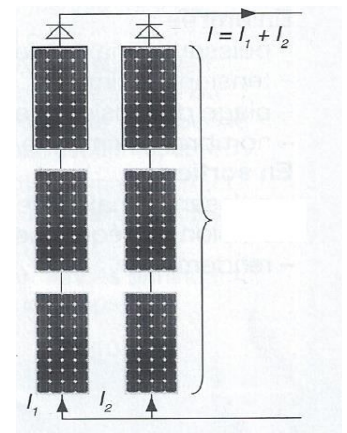


#### b. **Diodes série**

Afin d'obtenir la tension nécessaire à l'onduleur, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string.

Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV).

Il faut également installer des diodes ou des fusibles en série sur chaque chaîne de modules. Ces protections sont utiles pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage.



## II.4 L'énergie solaire thermique

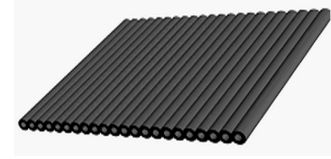
### II.4.1 Capteurs solaires thermiques

La transformation directe du rayonnement solaire en énergie utile s'effectue essentiellement par le réchauffement de l'eau dans des capteurs. Le capteur solaire est un dispositif qui permet d'absorber l'énergie solaire et d'utiliser la chaleur produite pour préparer de l'eau chaude sanitaire et apporter une contribution au chauffage de locaux.

Il existe toute une gamme de capteurs solaires qui permettent de répondre à différents besoins. Il faut choisir le type de capteurs qui correspond le mieux au niveau de température auquel on désire "travailler". Bien entendu, plus le niveau de température est élevé, plus les technologies mises en œuvre sont évoluées et plus les coûts de production sont élevés.

ü **Capteurs plans à liquide sans vitrage** : Ce capteur est constitué d'un caoutchouc souple très résistant : l'Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM).

Du fait de l'absence de vitrage, et donc des pertes de transmission afférentes, il possède un très bon rendement pour les températures proches de la température de l'air ambiant. Il ne permet pas de produire d'eau chaude sanitaire.



Ses principaux avantages sont sa facilité de mise en œuvre et son coût.

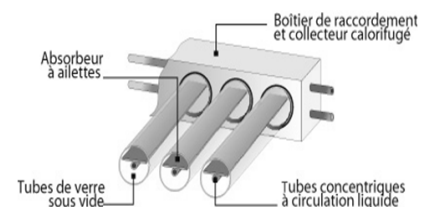
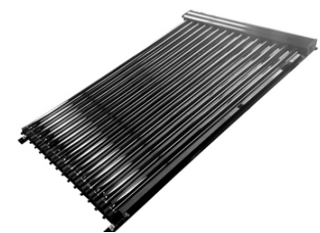
ü **Capteurs plans à liquide avec vitrage** : Les capteurs vitrés restent les plus performants bien que les non vitrés soient assez utilisés dans de nombreux pays (essentiellement pour du pré-chauffage d'eau chaude sur des installations collectives).

Ce type de capteur se présente sous forme de caissons de différentes dimensions ou sous forme d'éléments séparés à intégrer directement dans l'architecture des bâtiments. Les surfaces mises en œuvre vont de quelques mètres carrés pour les chauffe-eau solaires individuels à plusieurs centaines de mètres carrés pour les installations collectives.



ü **Capteurs à tubes sous vide** : C'est l'une des technologies les plus performantes et les plus sophistiquées en matière de captage solaire, mais aussi la plus coûteuse.

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des hautes températures (150°C) avec des rendements corrects. Le vide créé à l'intérieur des tubes permet de réduire de manière importante les déperditions lors de la montée en température. L'air à l'intérieur est évacué pour faire le vide et le tube est fermé hermétiquement. Le principe est simple, mais la fabrication est difficile à cause des liaisons verre/métal nécessaires.



## II.4.2 Capteur plan vitré

### a. Constitution

Le capteur plan vitré reste le capteur le plus répandu. Il se compose :

- ü d'un élément absorbeur, recouvert la plupart du temps d'un revêtement sélectif, en contact avec des tubes métallique (souvent en cuivre) véhiculant le fluide caloporteur qui transporte l'énergie jusqu'à l'extérieur du capteur
- ü d'un vitrage pour favoriser l'effet de serre et réduire les pertes par convection. " d'un isolant afin de limiter les pertes vers l'extérieur.
- ü pour ce qui est de la structure, ces éléments peuvent être enfermés dans un caisson ou bien intégrés en toiture. Un joint d'étanchéité en matériau élastique a pour principale fonction de maintenir l'étanchéité du capteur en empêchant l'eau de pénétrer quand il pleut.

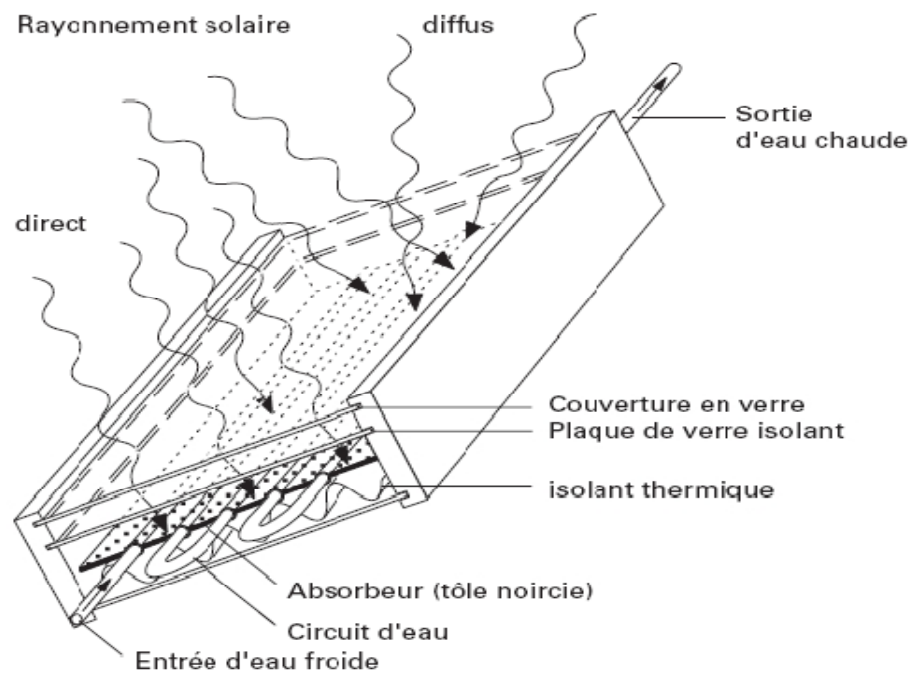


Figure II-10 : Constitution d'un capteur plan vitré.

## b. Installations solaires thermiques

Le fluide caloporteur circulant dans le circuit se réchauffe dans le capteur. Dès que la température dans le capteur est plus élevée que celle dans l'accumulateur, la pompe de circulation se met en marche. L'échangeur de chaleur transmet l'énergie solaire à l'eau.

La pompe s'arrête dès que le capteur est plus froid que le bas de l'accumulateur. Si le soleil ne suffit pas, le chauffage d'appoint (bois, gaz, mazout ou chauffage électrique) réchauffe la partie supérieure de l'accumulateur.

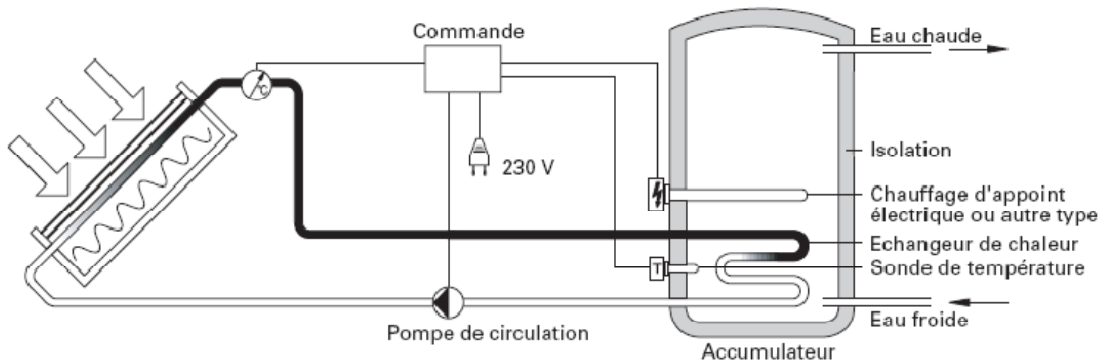


Figure II-11 : Schéma de principe d'une Installations solaires thermiques.

## c. Bilan thermique d'un capteur

Le bilan thermique d'un capteur plan, en régime permanent, se traduit par :

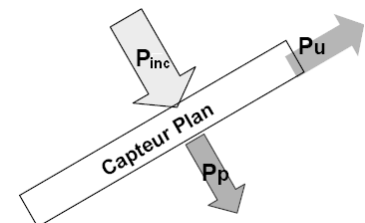
$$P_a = P_u + P_p \quad \text{Eq (II-3)}$$

Avec:

$P_a$ : puissance absorbée;

$P_u$ : puissance utile transmise au fluide caloporteur;

$P_p$ : pertes thermiques



ü **Puissance utile  $P_u$**  : La puissance utile est celle qui permet de réchauffer le débit de fluide caloporteur  $q$  de la température d'entrée  $T_e$  jusqu'à la température de sortie  $T_s$

$$P_u = q \times C_p \times (T_s - T_e) \quad \text{Eq (II-4)}$$

Avec :

$P_u$ : puissance utile (W);

$q$ : débit massique du fluide caloporteur par unité de surface (Kg/s);

$C_p$  : capacité calorifique massique ((J/kg)/°C) «capacité calorifique massique de l'eau est de 4185 (J/kg)/°C »;

$T_s, T_e$  : températures du fluide à la sortie et à l'entrée du capteur (°C)

ü **Puissance absorbée  $P_a$** :

$$P_a = P_{inc} \times \tau \times \alpha = P_{inc} \times \beta \quad \text{Eq (II-5)}$$

Avec :

$P_{inc}$  : la puissance solaire incidente sur le plan du capteur (W);

$\tau$  : coefficient de transmission de la vitre (%)

$\alpha$  : coefficient d'absorption de l'absorbeur (%)

$\beta$  : le facteur optique du capteur, qui est le rapport entre l'ensoleillement absorbé par l'absorbeur et l'ensoleillement incident sur le vitrage. Ce facteur optique est le produit du facteur de transmission du vitrage  $\tau$  par le coefficient d'absorption de l'absorbeur  $\alpha$ .

ü **Pertes thermiques  $P_p$**  :

$$P_p = K \times (T_{moy} - T_{air}) \quad \text{Eq (II-6)}$$

Avec :

$K$ : Coefficient de déperditions thermiques du capteur ( $W/°C$ );

$T_{moy}$ : Température moyenne de l'Absorbeur ( $°C$ );

$T_{air}$ : Température de l'air ambiant ( $°C$ ).

ù **Rendement  $\eta$** : Le rendement du capteur est défini comme étant le rapport entre la puissance utile  $P_u$  et la puissance incidente  $P_{inc}$

$$\eta = \frac{P_u}{P_{inc}} = \frac{P_a - P_p}{P_{inc}} = \tau \cdot \alpha - \frac{K \cdot (T_{moy} - T_{air})}{P_{inc}} \quad \text{Eq II-7)}$$

### II.4.3 Les centrales électriques solaires thermiques

Une centrale solaire thermique transforme l'énergie lumineuse en chaleur, laquelle sert ensuite à produire de l'électricité. Les rayons solaires sont concentrés par des réflecteurs sur un liquide dans un circuit primaire qui chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. Cette technique est similaire à celle utilisée dans les centrales thermiques conventionnelles. Cependant, les combustibles fossiles ou nucléaires sont remplacés par l'énergie solaire.

Les capteurs à concentration fonctionnent avec un système de poursuite du soleil. Selon que la concentration se fait sur un point (suivi du soleil selon deux axes) ou sur une ligne (suivi du soleil selon un axe), les températures atteintes sont plus ou moins élevées. Il existe 4 différents systèmes sur le marché – tous concentrant le rayonnement solaire pour chauffer à plus haute température :

- les capteurs cylindro-paraboliques ;
- les capteurs linéaires Fresnel ;
- les centrales à capteur parabolique ; et
- les centrales à miroirs répartis appelées aussi les centrales à tours.

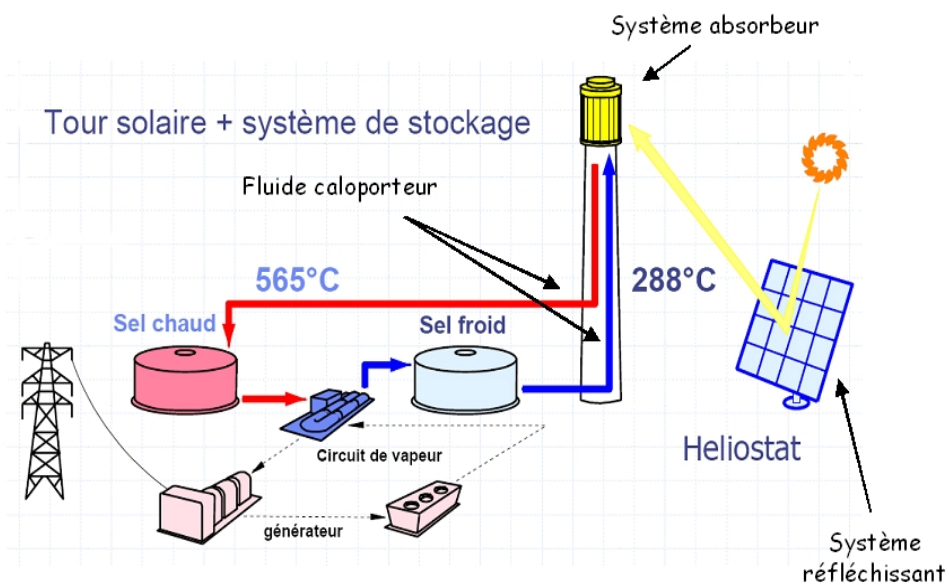
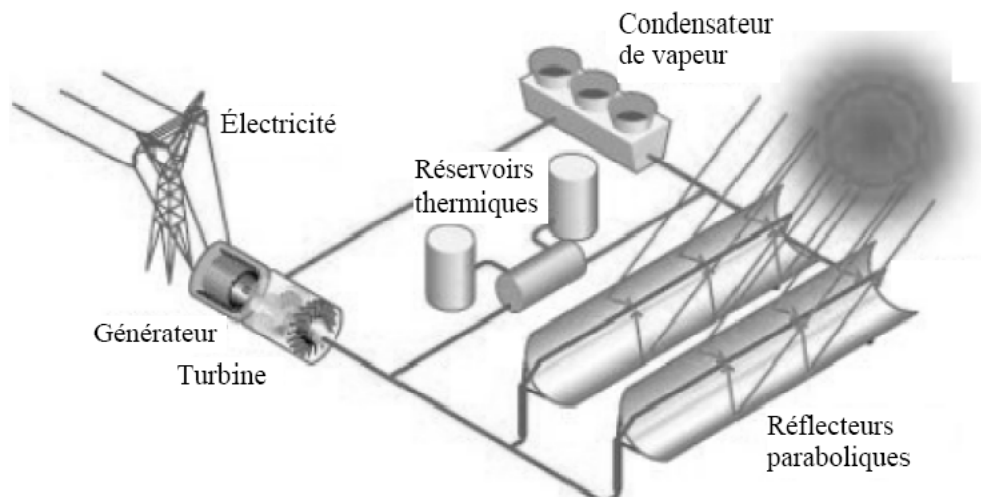


Figure II-12 : Les centrale solaire thermique.

#### a. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques

Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques concentrent la lumière sur un absorbeur linéaire, avec un système de poursuite du soleil selon une seule direction. De ce fait, le facteur de concentration n'est pas très élevé, ainsi que les températures atteintes. Ces



systèmes permettent d'atteindre des températures de 200 à 400 °C, pour des puissances de plusieurs centaines de kW.

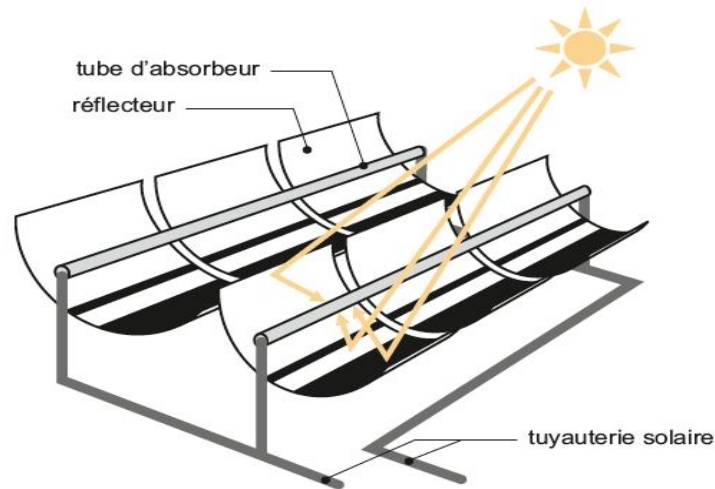


Figure II-14 : *Capteur à concentration cylindro-paraboliques.*

#### b. Les capteurs linéaires Fresnel

Des miroirs longs et plats très légèrement incurvés concentrent le rayonnement solaire sur un tube absorbeur fixe. De cette façon, l'eau est directement chauffée et s'évapore. Par rapport à la parabole, les coûts d'investissements sont moindres grâce au concept de base plus simple de la surface de miroir. Toutefois, le rendement annuel comparable est plus bas.

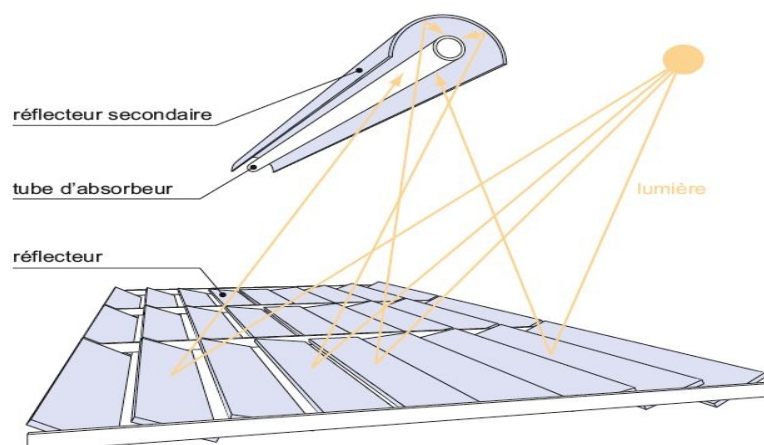


Figure II-15: *Capteur linéaire Fresnel.*

### c. Les capteurs à concentration type "dishes"

Un miroir en forme de parabole (plat = angl. Dish) concentre le rayonnement solaire sur un thermorécepteur, avec un système de poursuite du soleil selon deux directions. Le thermorécepteur est associé à un moteur Stirling monté en aval, qui transforme directement l'énergie thermique en travail mécanique ou en électricité. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C, pour des puissances de plusieurs dizaines de kW.

Ces installations conviennent particulièrement bien comme systèmes -autonomes. Elles offrent également la possibilité de relier -plusieurs installations au sein d'un « parc » et de couvrir ainsi une demande comprise entre dizaines de kilowatts et plusieurs mégawatts.

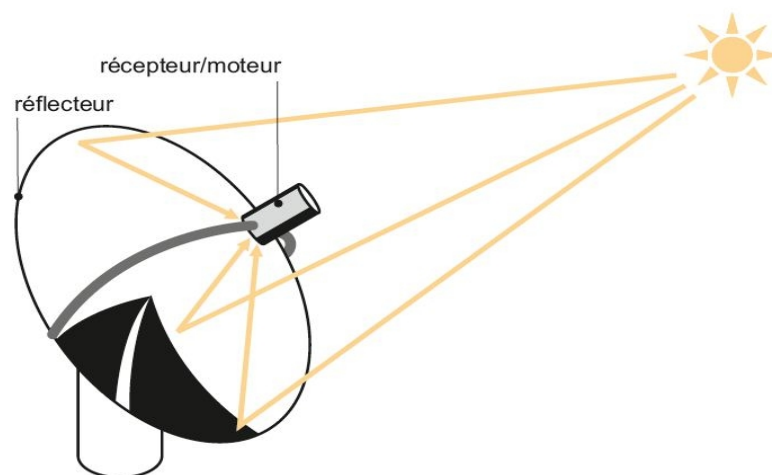


Figure II-16: *Capteur à concentration type "dishes".*

### d. Les centrales à tour

Les installations de ce type concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, à l'aide de miroirs (appelé "héliostats") qui suivent le soleil selon deux directions, sur une chaudière située au sommet d'une tour.

De ce fait, le facteur de concentration est plus important, ainsi que les températures atteintes. Compte tenu du grand nombre de miroirs. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C, pour des puissances de plusieurs MW.

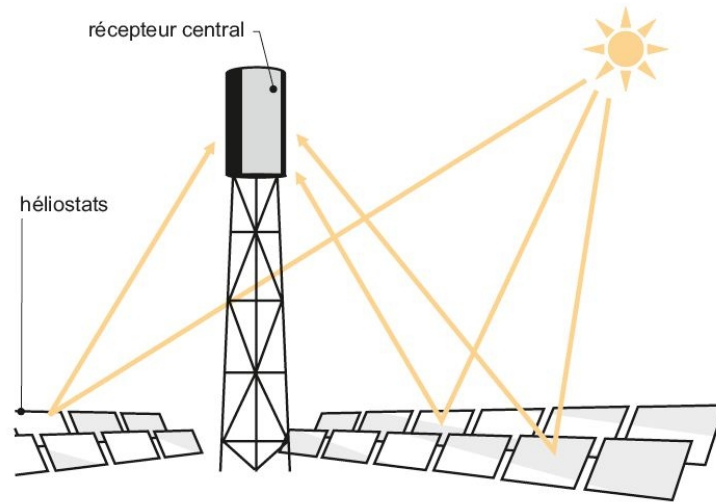


Figure II-17: Centrale à tour