

## CHAPITRE III

### AUTRES FORMES DE CONVERSION

#### III.1 Introduction

La conversion de l'énergie solaire est une opération qui consiste à transformer en énergie électrique l'énergie des photons provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques. Pour obtenir cette opération, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs optoélectroniques appropriés appelés « cellules solaires » ou « photopiles solaires ».

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord montrer les principales caractéristiques du spectre Solaire, pour présenter ensuite l'idée principale de la conversion photovoltaïque. Pour cela, le principe de la conversion photovoltaïque est rappelé. Ensuite, nous abordons la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque. Puis nous énumérons les différentes technologies de cellules photovoltaïques. Enfin nous terminons ce chapitre par la conversion de l'énergie calorifique (moteur combustion).

#### III.2 Spectre Solaire

##### III.2.1 Qu'est-ce que la lumière ?

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit *Einstein* en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique. Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par *Louis de Broglie* en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

Le Soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "*quantum d'énergie*" et notée " $\Delta E$ ". L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  (en hertz), dont la longueur d'onde  $\lambda$  (en mètre) est égale à la célérité divisée par  $\nu$ , est exprimée par la relation :

$$\Delta E = h \times \nu = \frac{(h \times c)}{\lambda}$$

$h$  Étant la *constante de Planck* c'est-à-dire  $6,63 \times 10^{-34}$  Joules par seconde. Ainsi, les photons

composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

### III.2.2 Couleur et longueur d'onde

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer «Ultraviolette» la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380 nm) au rouge (longueur d'onde 780 nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche. On réalise la même décomposition avec un prisme (**figure III-1**). On appelle spectre, ou répartition spectrale, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent.

Une lumière rouge est une portion de lumière blanche, de même qu'une lumière bleue ou orange. Les lampes artificielles les plus courantes, quoique blanches à l'œil, diffèrent par leur spectre.

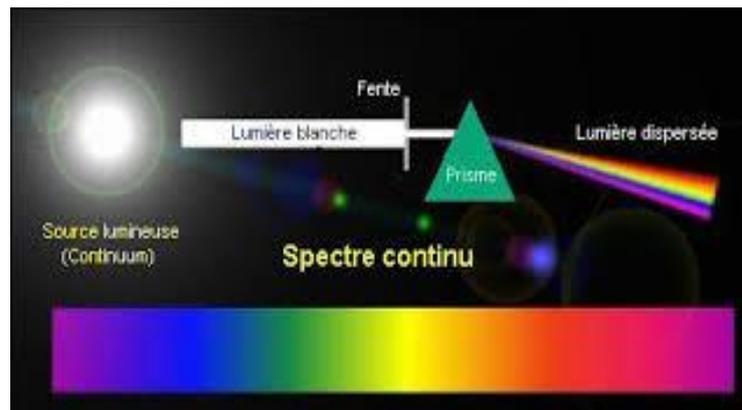


Figure III.1 Décomposition de la lumière blanche par un prisme

## III.3 La Conversion Photovoltaïque

### III.3.1 Principe de la conversion Photoélectrique

Le terme « *photovoltaïque* » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « *phos* » qui signifie lumière. « *Volt* » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

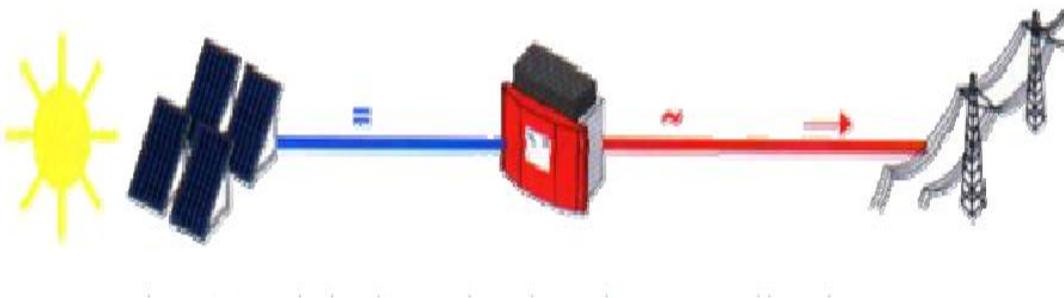
Le scientifique français, *Edmond Becquerel*, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, *Albert Einstein* à découvert, en

travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :  $E = \frac{(h \times c)}{\lambda}$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairage est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (PN) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ).



Le convertisseur est nécessaire pour convertir le courant continu issu des modules photovoltaïques en courant alternatif pour sa réinjection dans le réseau ou pour les besoins dans un site isolé, quoique ce ne soit pas toujours nécessaire suivant les applications. Celui-ci doit avoir certaines caractéristiques comme suivre le point de transfert maximum de

puissance, avoir un rendement de conversion le plus élevé possible et un coût le plus bas possible.

### III.3.2 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{SAT} = \left[ \exp \left[ \frac{V_{CELL} + (I_{CELL} R_{serie})}{nV_t} \right] - 1 \right] - \frac{V_{CELL} + (I_{CELL} R_{serie})}{R_{shunt}}$$

Où  $V_t = \frac{K \times T}{e}$  représente le potentiel thermodynamique,  $I_{sat}$ , le courant de saturation de la jonction,  $K$ , la constante de Boltzman (1.381 10<sup>-23</sup> Joules/Kelvin),  $T$ , la température de la cellule en Kelvin,  $e$ , la charge d'un électron,  $n$ , le facteur de non idéalité de la jonction,  $I_{CELL}$ , le courant fourni par la cellule,  $V_{CELL}$ , la tension aux bornes de la cellule,  $I_{CC}$ , le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit,  $R_{shunt}$ , la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement,  $R_{serie}$ , la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions. La Figure III-2 représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent.

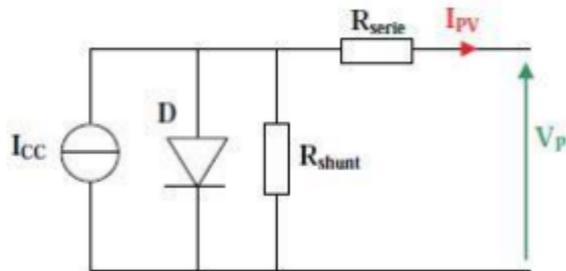


Figure III.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium

### III.4 Principe De L'effet Photovoltaïque

La cellule photovoltaïque, élément de base du capteur, est composée d'un matériau semi-conducteur qui permet de capter l'énergie des photons composant la lumière. Dans un matériau conducteur, la bande de valence et la bande de conduction se confondent, ce qui fait que les électrons peuvent circuler facilement dans le réseau cristallin du matériau conducteur. Dans un matériau isolant, au contraire, la bande de valence et la bande de conduction sont séparées par ce qu'on appelle la bande interdite. Cette bande nécessite beaucoup d'énergie aux électrons pour qu'ils puissent passer dans la bande de conduction, de l'ordre d'une

dizaine d'électronvolt (ou eV). Dans un semi-conducteur, le largeur de la bande interdite est plus faible, de l'ordre de 0,5 à 2 eV, cette énergie de transition d'une bande à l'autre est l'énergie de gap notée  $E_g$ . L'intérêt est de pouvoir utiliser l'énergie des photons de la lumière du soleil pour faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui en contrepartie, crée un trou dans la bande de valence.

L'énergie des photons, fonction de la longueur d'onde de la lumière, doit être supérieure ou égal à l'énergie de gap  $E_g$ .

	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>GaAs</i>	<i>InP</i>	<i>CdS</i>	<i>CdTe</i>
<i>E<sub>g</sub> (eV)</i>	<i>0.67</i>	<i>1.12</i>	<i>1.43</i>	<i>1.29</i>	<i>2.42</i>	<i>1.44</i>

Table III.1 : Énergie de gap pour différent semi-conducteur à la température de 300°K (27°C)

Mais les paires d'électrons trous créées par les photons ont tendance à se recombiner très rapidement. Pour ralentir ce phénomène et permettre leur récupération vers les électrodes, un champ électrique est créé par une jonction PN.

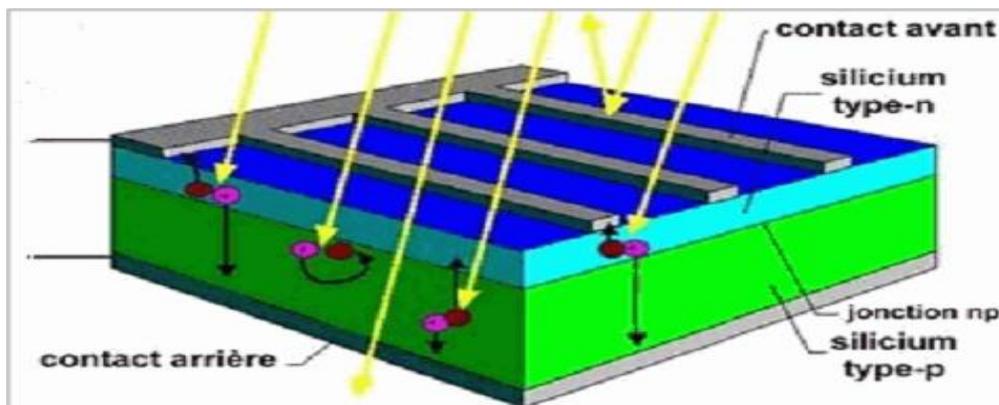


Figure III.3 cellule photovoltaïque

Il s'agit d'introduire des « impuretés » dans le réseau cristallin du semi-conducteur qui est le plus souvent du silicium. Le silicium à 4 électrons dans sa bande de valence, ce qui lui permet par les liaisons de covalence de garder une structure cristalline. L'ajout d'impuretés (quelque ppm) ayant 5 électrons dans la bande de valence (phosphore par exemple) se substituant au silicium, ajoute des électrons faiblement liés dans la structure cristalline, créant un semi-conducteur dopé N. De même, l'ajout d'impuretés ayant 3 électrons dans la bande de valence (bore par exemple) se substituant au silicium enlève des électrons, donc ajoute des « trous » dans la structure cristalline, créant un semi-conducteur dopé P. La juxtaposition de ces deux semi-conducteur dopés N et P crée une jonction PN avec une différence de potentiel aux bornes de laquelle il est possible de récupérer les électrons délogés par des photons ayant

suffisamment d'énergie. Électriquement, la cellule photovoltaïque, ou « photopile », se comporte donc comme une diode de grande dimension.

### **III.5 Les Différentes Technologies De Cellules Photovoltaïques**

Deux grands familles de technologies existent actuellement : la première à base de silicium cristallin comprenant le mono et le multi cristallin, couvre de l'ordre de 85% de la production mondiale. La deuxième famille, celle des couches minces, comprend les cellules au silicium amorphe, polycristallin ou microcristallin ; au tellure de cadmium, au cuivre indium sélénium, et à l'arséniure de gallium. En outre, d'autres technologies sont en cours d'expérimentation comme les cellules organiques, polymères ou à base de fullerènes.

#### **III.5.1 Première génération**

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

##### **a) Silicium monocristallin (mono c-Si) :**

La technologie mono cristalline est coûteuse car elle nécessite des barres de silicium pur. Son rendement est le plus élevé (14 à 16%). Ce qui a l'avantage de réduire la taille des modules pour une même puissance, chose utile lorsqu'un gain de place est nécessaire.

##### **b) Silicium polycristallin (multicristallin) :**

La technologie multi cristalline est obtenue par la refonte de chute de cristaux de silicium de l'industrie électronique et elle nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie que la technologie précédente. Son rendement un peu moindre (12 à 14 %) mais son coût est plus avantageux, ce qui permet à cette technologie de dominer actuellement le marché.

##### **c) Silicium en ruban (ribbon) autosupporté :**

Les techniques de production de silicium en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. Plusieurs procédés ont été développés. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. La plus connue est basée sur l'effet de la capillarité entre deux lèvres de carbone. Ce procédé, illustré sur la figure III.4(a), a été initié aux USA par Mobil-Tyco dans les années 1975, puis transféré en Allemagne par RWE Schott Solar. D'autres méthodes utilisent des techniques de

croissance de ruban sur un film ou une maille de carbone. C'est le cas de la société SOLARFORCE en France qui utilise comme support de croissance un ruban de graphite (figure III.4(b), procédé RST), et qui permet de déposer des rubans de silicium de part et d'autre du graphite. Le principal avantage de la méthode RST est l'obtention de silicium ruban très mince ( $< 100 \mu\text{m}$ ), permettant ainsi un gain matière très important.

Cependant, la vitesse de croissance linéaire est lente, généralement de quelques cm/min à quelques dizaines de cm/min. La vitesse optimale est imposée par les critères de solidification qui imposeront la taille des grains, la pureté du matériau par la ségrégation des impuretés, la déformation et les contraintes dans les plaquettes.

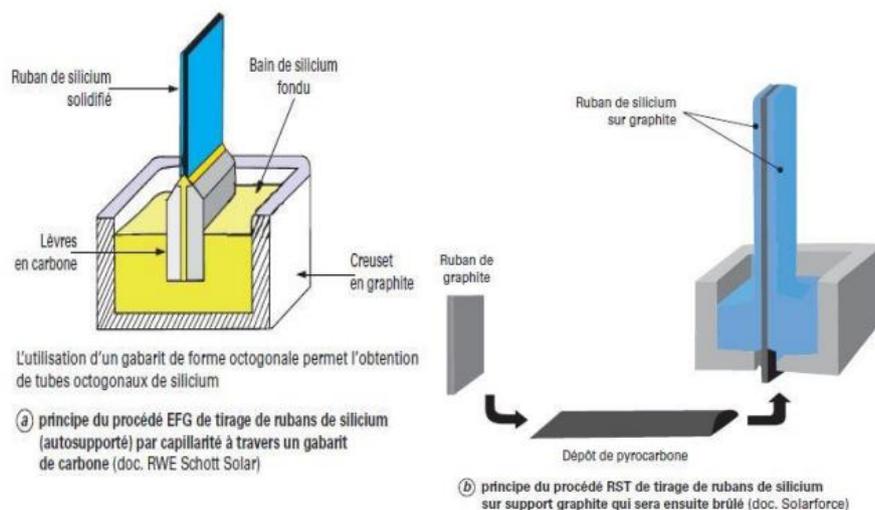


Figure III.4 Procédés de production du silicium en ruban.

### III.5.2 Deuxième génération (filière couches minces)

#### a) Silicium amorphe

Matériau composé de silicium hydrogéné (état non-cristallin) déposé sur un substrat de verre. D'un rendement moins bon que le cristallin (5-7%), le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes ou horodateurs), mais des firmes comme Solarex, Phototronic, Canon ou Fortum proposent des modules de taille équivalente à celle des modules cristallins. Sanyo a mis au point une technologie de silicium amorphe sur une couche de silicium mono cristallin (technologie HIT) dont les rendements sont supérieurs à celui du silicium mono cristallin (rendement de l'ordre de 19%).

#### b) Cellules à base de tellure de cadmium (CdTe)

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. Composé poly cristallin déposé sur substrat de verre. Les premières

cellules ont été développées en 1972. Il y a quelques années, cette technologie semblait être la plus adaptée pour les couches minces. Mais les problèmes de coût et de toxicité posés par le cadmium ont pesé lourdement sur son développement, utilisation de 7g/m<sup>2</sup> de cadmium (une batterie NiCd de taille standard en contient 10g).

**c) Matériaux à base de séléniure de cuivre indium gallium (CIS ou CIGS)**

Matériau composé de séléniure de cuivre et d'indium combiné avec du sulfure de cadmium. Cette technologie de couches minces, qui permet d'atteindre des épaisseurs inférieures au micromètre, est présente aujourd'hui dans de nombreux projets industriels.

**III.5.3 Troisième génération**

La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche.

**a) Les cellules multi jonctions**

Utilisant actuellement majoritairement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs. Comme montre la figure III.5:

- une première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation.
- une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction.
- une troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges



Figure III.5 : vue schématique de la composition de la cellule à multi jonction.

#### b) Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel

Pour les cellules à colorants, il s'agit d'une matrice poreuse inorganique, fonctionnalisée par le greffage de colorants photoactifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydoréducteur permettant de communiquer « électriquement » avec la molécule de colorant.

Le système de référence est constitué d'une couche d'oxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) frittée dont les particules sont de taille nanométrique, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple redox iode-iodure.

#### c) Cellules organiques

Ces cellules inventées en 1991 par le chimiste suisse Michael Graetzel sont composées d'une poudre de cristaux TiO<sub>2</sub> associée à un électrolyte et à un colorant qui absorbe la lumière. Cette technologie en est encore au stade expérimental. Le rendement est moyen et la stabilité à long terme est mauvaise, mais sa fabrication est en théorie plus facile que les autres cellules, et la matière première est bon marché. La recherche améliore d'années en années les technologies existantes, par exemple :

- réduction de l'épaisseur de la coupe des lingots de silicium
- amélioration du rendement d'un lingot par traitement de surface
- technologie CIS avec des matériaux moins nobles, mais travaille aussi sur de nouveaux semi-conducteurs, des cellules à 2 ou 3 jonctions, des systèmes à concentrateur ...

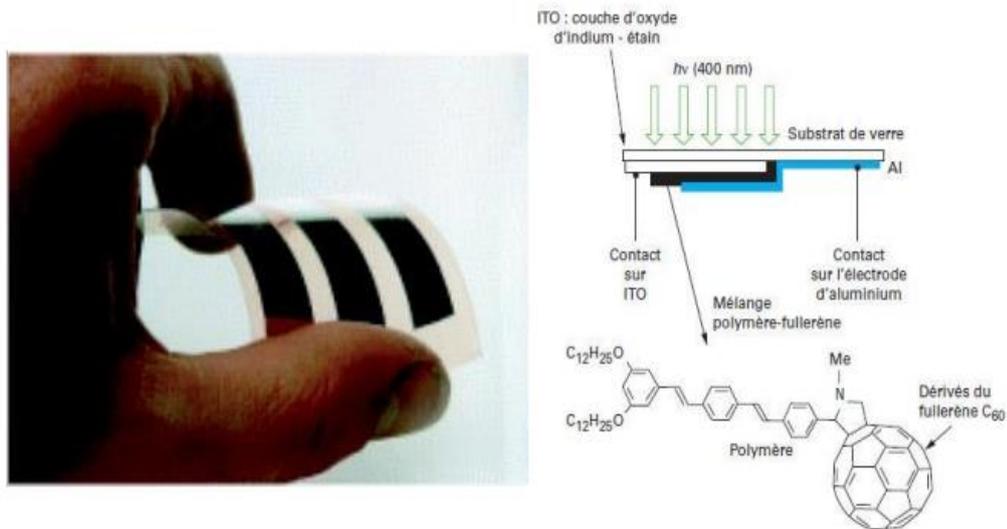


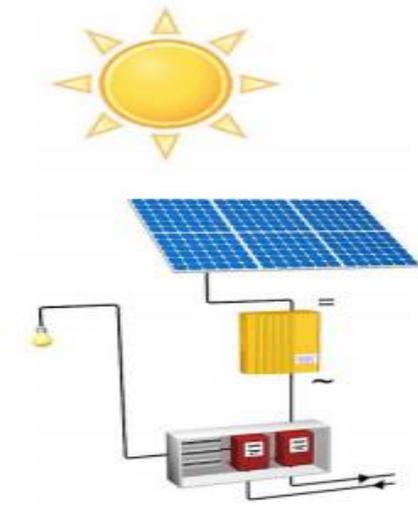
Figure III.6 : Cellule souple à base de matériaux organiques

On peut résumer les rendements des cellules au tableau suivant

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
<b>1<sup>ère</sup> génération</b>				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
<b>2<sup>ème</sup> génération</b>				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
<b>3<sup>ème</sup> génération</b>				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production

### Aspect technologique

Le panneau solaire photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse du soleil en électricité



✚ Panneaux solaires photovoltaïques

✚ Onduleur

✚ Compteur consommation et compteur production

### Pourquoi choisir le photovoltaïque ?

**L'électricité solaire photovoltaïque est remarquable par sa fiabilité, son autonomie.**

**Aucune pollution**

**Énergie 100% verte**

**Énergie gratuite**

**Gain financier**

**Énergie du soleil est inépuisable**

### III.6 Énergie Calorifique

À l'échelle atomique, la chaleur se traduit par un mouvement désordonné et plus ou moins rapide des molécules. À notre échelle, elle constitue la forme d'énergie mise en jeu lorsque la température varie ou lorsqu'un matériau change d'état (fusion de la glace, évaporation de l'eau). Elle peut se transférer de proche en proche sans se transformer en une autre forme d'énergie (conduction calorifique). Elle peut aussi se convertir en énergie mécanique, dans une turbine, une machine à vapeur, ou un réacteur d'avion, mais nous verrons que cette conversion ne peut être que partielle.

#### III.6.1 Conversion D'énergie Calorifique

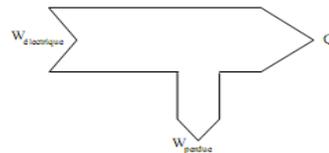
➡ La transformation d'énergie électrique  $W_{el}$  en une énergie calorifique  $W_{cal}$  est couramment utilisée. Dans les installations électriques, nous trouvons une quantité impressionnante d'appareils domestiques réalisant cette transformation. Par exemples :

- ❖ cuisinières
- ❖ fours
- ❖ radiateurs pour le chauffage des locaux

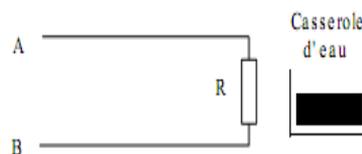
- ❖ chaudière pour le chauffage d'un liquide
- ❖ chauffe-eau pour l'eau sanitaire
- ❖ lampe à incandescence

L'énergie transformée en énergie calorifique est symbolisée de la façon suivante:

Symbole de la grandeur :  $Q$   
 Symbole de l'unité : [J] joule



Dans un transfert d'énergie, il y a toujours des pertes.



Une cuisinière électrique doit chauffer de l'eau dans une casserole. Le but est de pouvoir calculer l'énergie nécessaire pour faire bouillir cette eau.

**Phase 1 :** La tension électrique  $U$  appliquée aux bornes de la résistance  $R$  provoque le passage d'un courant électrique  $I$ .  $U = R \cdot I$

**Phase 2 :** Ce circuit provoque une puissance électrique  $P$ ,  $P = U \cdot I$

**Phase 3 :** Qui, appliquée pendant un certain temps, engendre une énergie électrique  $W_{él}$ .

$$W_{él} = P \cdot t$$

**Phase 4 :** Mais ce transfert d'énergie se réalise avec un certain rendement  $\eta$  dû aux pertes par effet Joule (conducteurs).

$$W_{él} - W_{joules} = Q$$

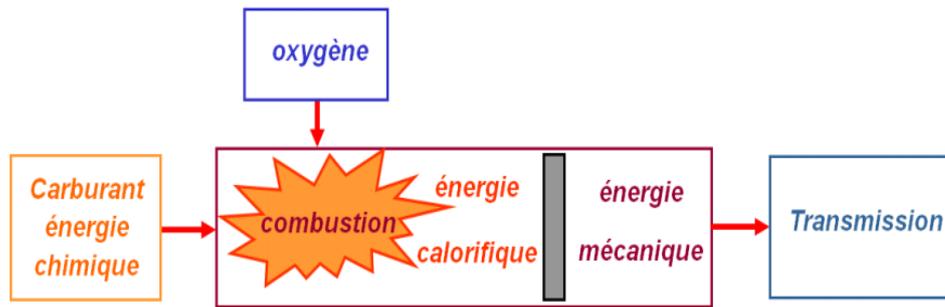
**Phase 5 :** Cette énergie calorifique  $Q$  doit être transmise à l'élément à chauffer qui peut être soit un liquide, soit un solide.

Ce transfert se fait avec un certain rendement  $\eta$ .

$$Q_{absorbée} \cdot \eta = Q_{utile}$$

➡ La transformation de l'énergie dans le carburant en énergie mécanique. Pour libérer l'énergie chimique potentielle, il est nécessaire d'effectuer une transformation appelée « combustion ».

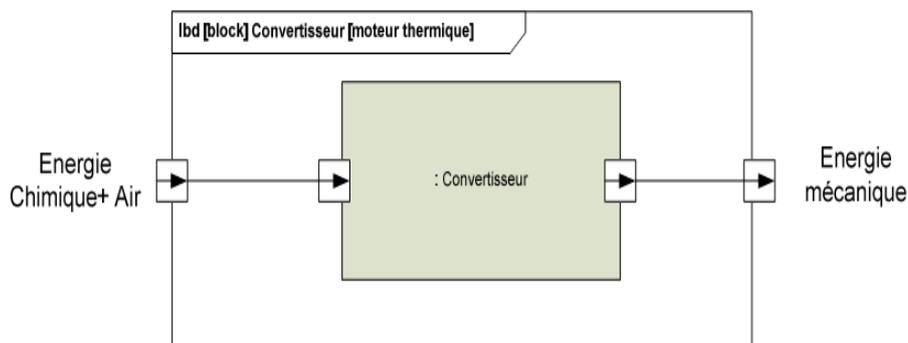
Par la combustion, le carburant est transformé en énergie calorifique puis en énergie mécanique qui est ensuite appliquée aux roues motrices par l'intermédiaire de la transmission.



### III.6.2 Moteur À Combustion (Moteurs Thermique)

Les moteurs thermiques ont pour rôle de transformer l'énergie thermique à l'énergie mécanique. Ils sont encore appelés les moteurs à combustion qui sont généralement distingués en deux types :

- Les moteurs à combustion interne où le système est renouvelé à chaque cycle. Le système est en contact avec une seule source de chaleur (l'atmosphère).
- Les moteurs à combustion externe où le système (air) est recyclé, sans renouvellement, ce qui nécessite alors 2 sources de chaleur, entrent par exemple dans cette dernière catégorie : les machines à vapeur, le moteur Stirling...



#### III.6.2.1 Moteurs à combustion interne

##### A/ Moteurs alternatifs

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre à volume variable et elle est utilisée pour augmenter la pression au sein d'un gaz qui remplit cette chambre (ce gaz est d'ailleurs initialement composé du combustible et du comburant : air). Cette augmentation de pression se traduit par une force exercée sur un piston, force qui transforme le mouvement de translation du piston en mouvement de rotation d'arbre (vilebrequin).

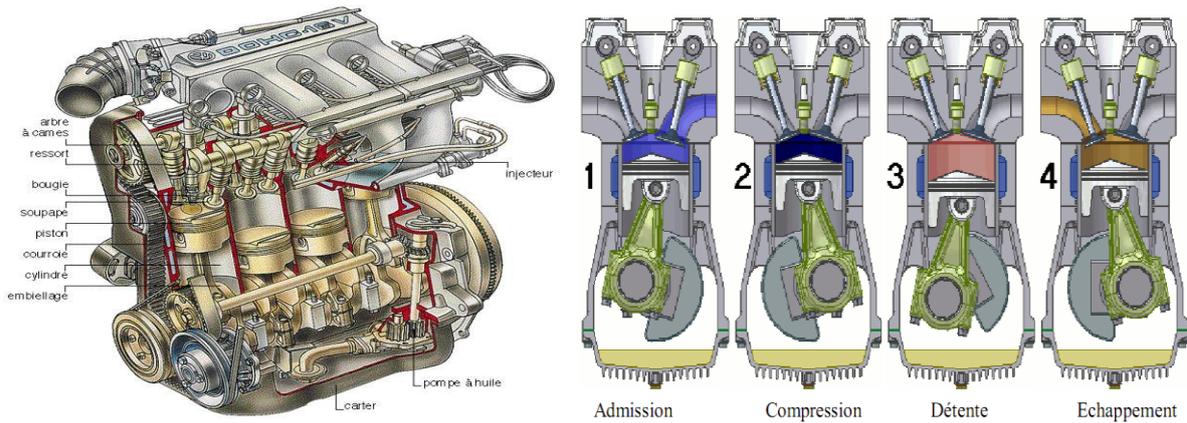


Figure III.7 moteur à combustion interne

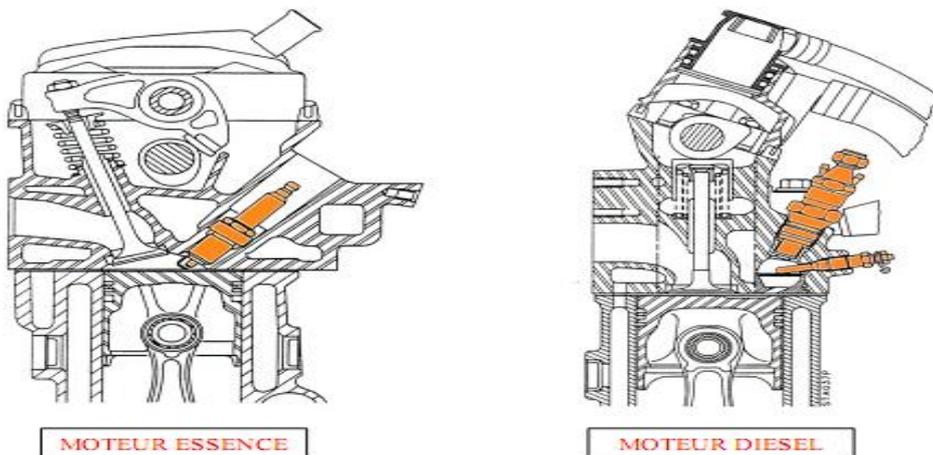
Les moteurs sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange carburant-air :

- les moteurs à allumage commandé (moteur à essence)
- les moteurs à allumage par compression (moteur Diesel)

Les moteurs à essence dans lesquels la combustion de l'essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie, ils possèdent un système d'allumage commandé, le mélange d'air et d'essence pouvant se faire

- ❖ Soit par injection.
- ❖ Soit par carburateur (depuis le 01/01/93, tous les véhicules neufs vendus en Europe sont équipés d'un système d'injection).

Les moteurs Diesel, dont la combustion est déclenchée par l'injection de gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé ( $T^\circ$  élevée) ; il se produit alors une auto-inflammation, ce qui signifie que le mélange s'enflamme spontanément.



### B/ Turbomachines (turbine à gaz)

Contrairement aux moteurs précédents, les turbomachines sont des machines à écoulement continu. Dans ces dernières machines, les évolutions des fluides moteurs ont lieu dans des enceintes successives et juxtaposées, contrairement aux moteurs alternatifs où ces transformations s'opèrent dans le même espace, le cylindre.

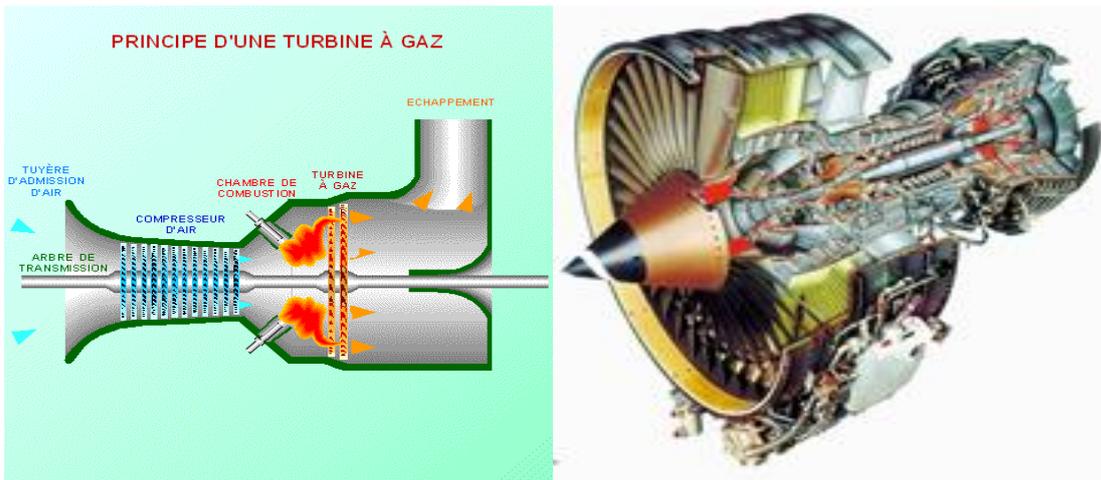


Figure III.8 Turbomachine

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre de combustion d'un combustible généralement liquide (kérosène par exemple). Cette combustion augmente la pression du gaz (air + combustible). Ce gaz sous pression traverse une chambre de détente à volume constant constituée d'un arbre moteur doté d'ailettes (turbine de détente). De l'énergie est alors fournie à cet arbre sous forme d'un couple moteur qui sera utilisé d'une part vers les consommateurs, d'autre part vers un compresseur (turbine de compression) qui permet la puissance fournie. En effet la pression de l'air augmentant, la masse d'air aspirée augmente, on peut brûler davantage de kérosène, et la puissance disponible est donc augmentée (par rapport à une turbine qui ne disposerait pas d'étage compresseur en entrée).

### C/ Moteur WANKEL à piston rotatif

Le moteur rotatif WANKEL est le résultat d'une importante étude menée de 1945 à 1954 par l'ingénieur WANKEL sur les différentes solutions de moteur rotatif. En conclusion, il estima que la meilleure était de faire travailler en moteur, le compresseur rotatif réalisé par Bernard Maillard en 1943.

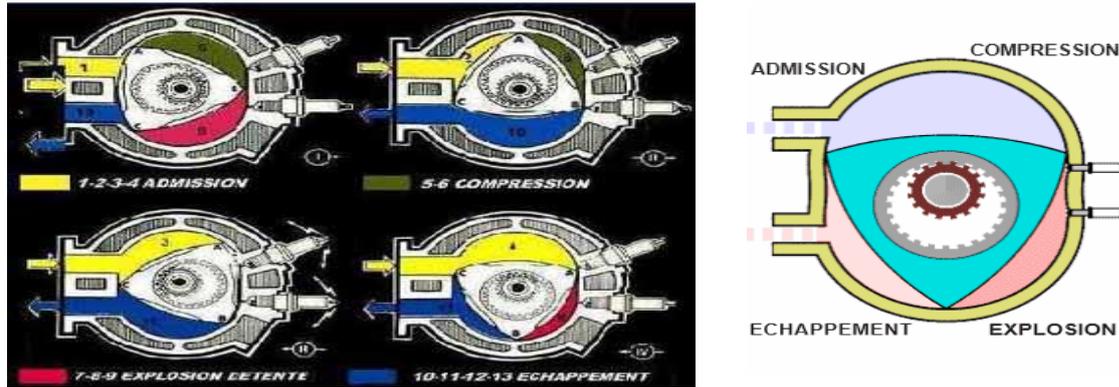


Figure III.9 Moteur WANKEL

### III.6.2.2 Moteurs à combustion externe

#### A/ Machines à vapeur

La chaleur est produite dans une chambre de combustion (chaudière) séparée de la chambre de détente. Cette chaleur est utilisée pour vaporiser de l'eau. La vapeur d'eau obtenue par cette vaporisation est alors envoyée dans la chambre de détente (cylindre) où elle actionne un piston. Un système bielle manivelle permet alors de récupérer l'énergie mécanique ainsi produite en l'adaptant aux besoins.

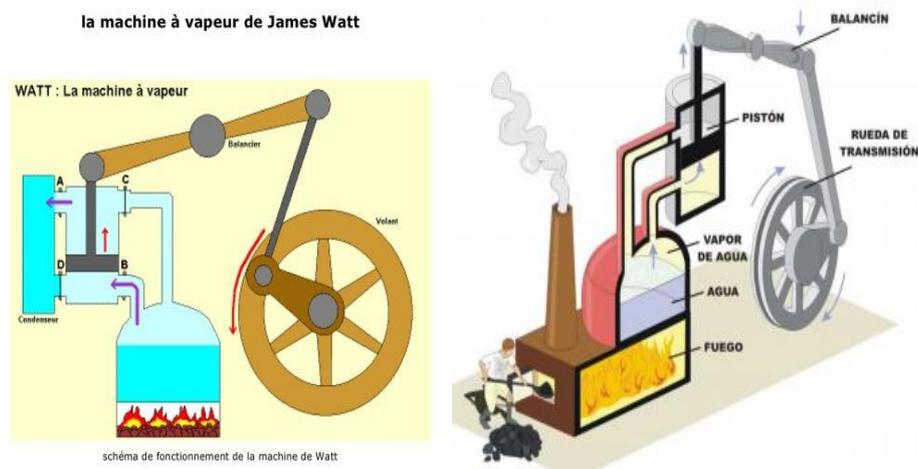


Figure III.10 Machine à vapeur

L'eau qui est fournie à l'évaporateur est transformée en vapeur d'eau par apport de chaleur. Ce gaz (vapeur d'eau sous pression) est distribué vers le piston où il fournit du travail qui sera utilisé par le système bielle manivelle (non représenté ici). Les distributeurs permettent de mettre chaque face du piston alternativement à l'admission ou à l'échappement.

## B/ Moteurs Stirling

Le moteur Stirling, appelé parfois moteur à combustion externe ou moteur à air chaud est inventé en 1816 dont on reparle de plus en plus aujourd'hui. Le moteur comprend deux pistons A et B et un régénérateur qui absorbe et restitue de la chaleur au cours du cycle. Il existe plusieurs types de moteur Stirling, pour l'illustration, on ne donne que le schéma d'un moteur alpha (Figure III.11).

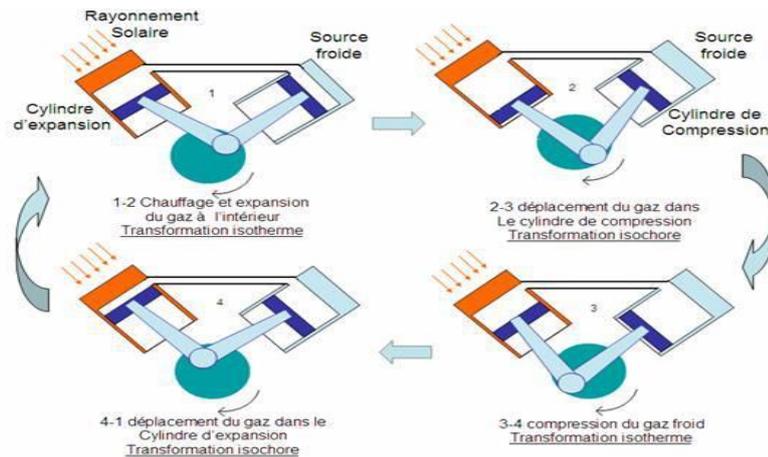


Figure III.11 moteur Stirling

## III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré le mode de fonctionnement de la cellule solaire à partir de son absorption du spectre solaire jusqu'à la production d'électricité. Nous avons décrit dans ce chapitre les composants du spectre solaire et le principe de fonctionnement de la cellule solaire, nous avons ensuite fait une modélisation de la cellule et nous avons fini ce chapitre par la conversion de l'énergie calorifique: moteur combustion.