

### **I.1.Introduction:**

L'énergie solaire est l'énergie la plus répandue et la plus répartie dans le monde. En une année, l'humanité entière consomme 10 milliards de Tonnes équivalent pétrole (Tep). En revanche, la quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. [1]

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- L'énergie solaire thermique : basée sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement,
- L'énergie photovoltaïque : s'appuie sur l'utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'énergie électrique.

L'utilisation des cellules photovoltaïque pour la conversion de l'énergie solaire en électricité constitue une voie prometteuse pour exploiter cette source d'énergie durable. Aussi, Les applications photovoltaïques requièrent des présentations spécifiques des caractéristiques du rayonnement. Ces caractéristiques peuvent être différentes selon le niveau de détail des études envisagées, mais aussi selon le système protégé par exemple autonome ou relié au réseau [2].

Dans ce chapitre un aperçu sur l'histoire de l'énergie photovoltaïque, le principe de conversion et le groupement des cellules solaires (parallèles, série ou mixte) seront fournis dans ce chapitre. Les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques tels que le rendement, le facteur de forme, etc., seront aussi discutées.

### **I.2.l'énergie solaire:**

L'énergie solaire est une source d'énergie liée directement au rayonnement du soleil (figure I.1).

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

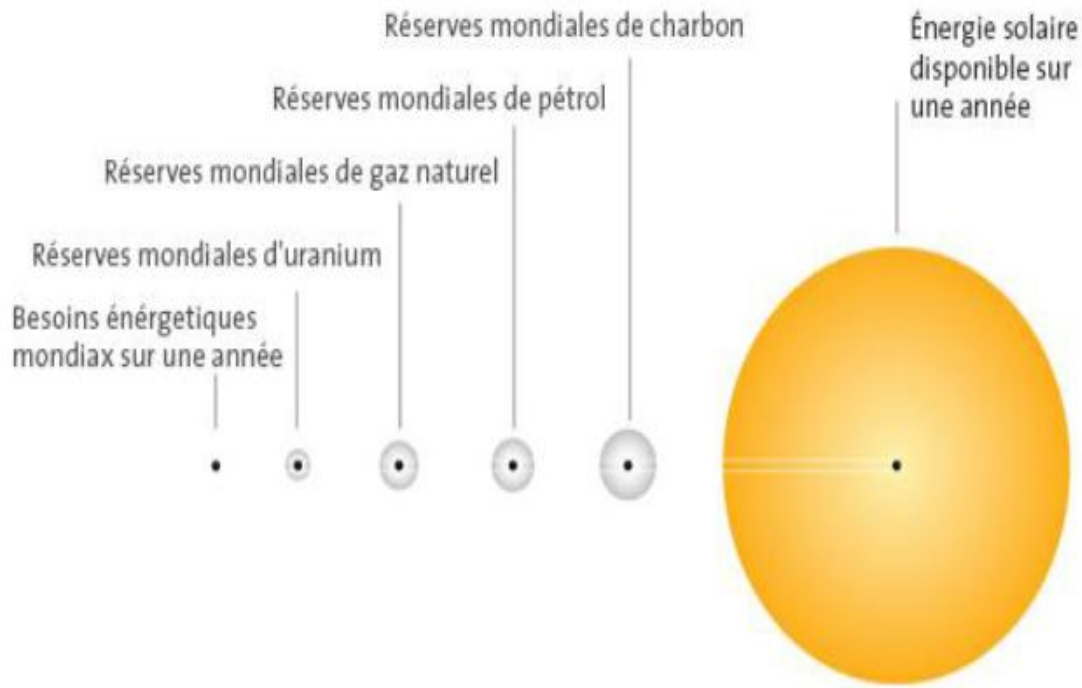


Figure I.1: Le soleil matière première du 21ème siècle [3]

### I.2.1. Le soleil:

Le soleil est une source d'énergie abondante, gratuite et exempte d'émission, il est principalement composé de gaz consistant en 70% d'hydrogène et 28% d'hélium, les 2 % restants représentant la plupart des autres atomes présents dans l'univers. La fusion thermonucléaire dans son centre libère une énergie énorme sous forme de rayonnements. Son diamètre est de 1 391 000 km et se trouve à une distance de 150 000 000 km de la terre [4].

Quant à son volume, il est l'équivalent de 1 300 000 fois le volume de la terre avec une densité de 1,41 contre 5,50 pour la terre, sa masse est de 330 000 fois la masse de la terre soit 2 milliards de tonnes. Il représente 99,867% de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente presque que le millième du soleil [2].

### I.2.2 .Le rayonnement solaire:

La matière première dans la production de l'énergie photovoltaïque est le rayonnement électromagnétique. Ce dernier comporte notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes ainsi que les ondes radios qui dépendent des fréquences d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire [5].

### I.3. Histoire du photovoltaïque:

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.



Figure I.2: Représentation des cellules photovoltaïques

### I.4. Caractéristiques chimique des cellules photovoltaïques:

#### I.4.1. Les cellules photovoltaïques inorganiques:

Les cellules photovoltaïques inorganiques souvent dites au silicium, représentent 99% des ventes mondiales de panneaux solaires. La technologie de cette filière est la plus avancée. Pour preuve, la faible différence entre le rendement théorique de 27 % et pratique de 20,8 % (à partir des modules de laboratoire d'un pied carré). Ainsi Un meilleur rendement des modules commerciaux de grande taille (1m<sup>2</sup>), est de 15,3 %. Selon la technologie exploitée plusieurs filières se distinguent:

#### I.4.1.1. La filière silicium:

Comme déjà citée la filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure I.3 [13]. Il est l'un des éléments les plus 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, poly-cristallin, 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 [6]

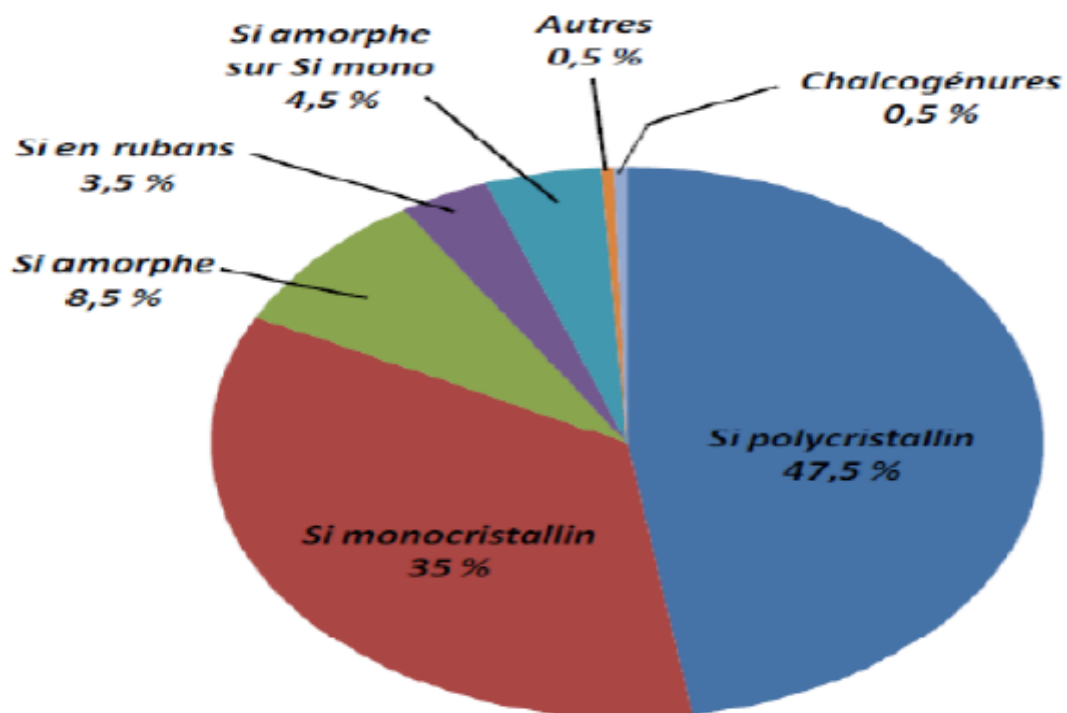


Figure I.3 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [6]

##### a. Cellules au silicium monocristallin:

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles nécessitent une dépense d'énergie considérable proche du KWh. Les substrats du silicium obtenus sont appelés Cz (lié à la méthode de Czochralski) et Fz (« Float Zone »). Ces substrats permettent d'obtenir des rendements de conversion record en laboratoire de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm<sup>2</sup>.

Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

**b. Cellules au silicium poly-cristallin:**

Leur meilleur rapport qualité/prix rend la technologie poly-cristallin la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin. Afin de limiter les effets néfastes au cours de la croissance le silicium poly-cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation de gros cristaux multi-cristallins.

Cependant, le matériau multi-cristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des déchets de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 m<sup>2</sup> [7]. Aussi, comme pour les cellules monocristallines, le rendement de ce type de cellules est limité sous un faible éclairage.

**c. Silicium cristallin en ruban:**

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très attractives sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux couches de carbone (Figure I.4). 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 pré industrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 % [4].

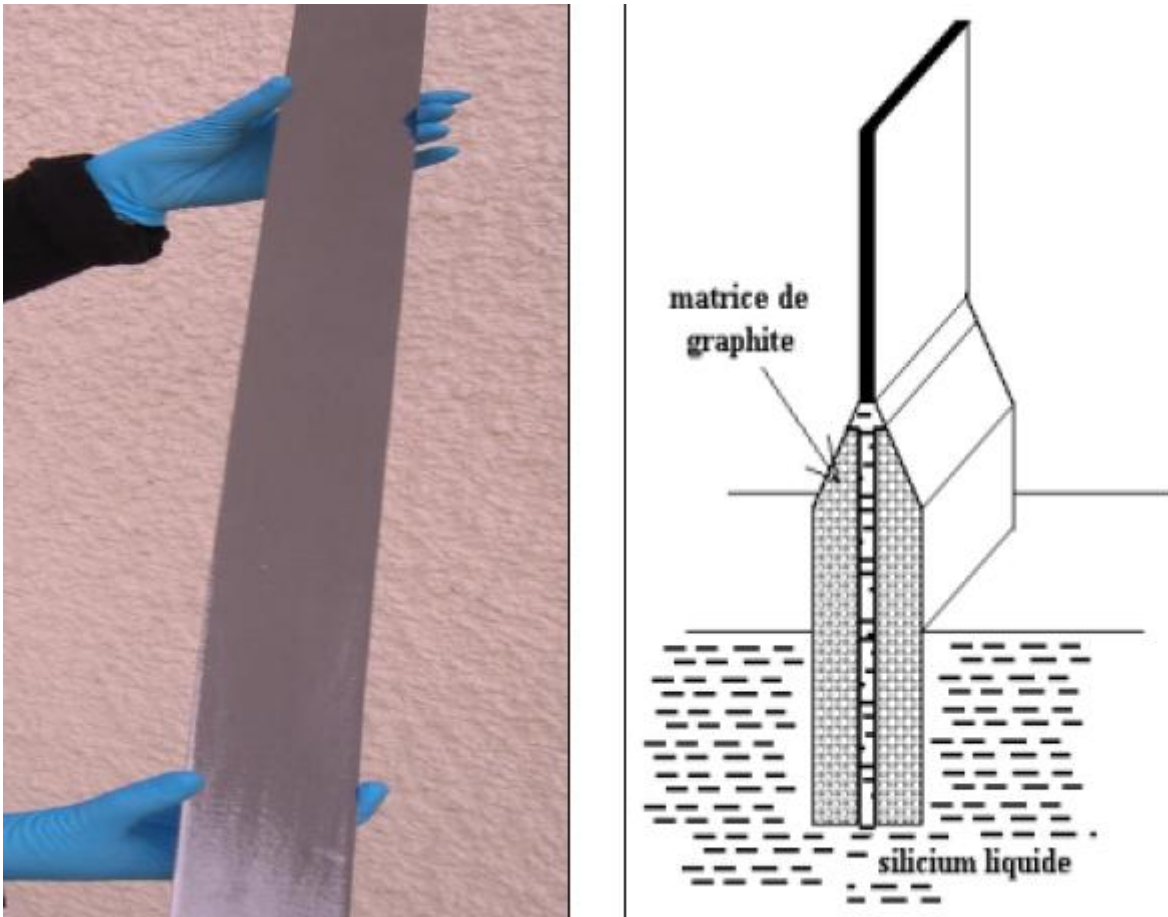


Figure I.4: Tirage d'un Silicium cristallin en ruban [8,9]

#### e. Filière en silicium amorphe:

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de  $1m^2$ ). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [7]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin.

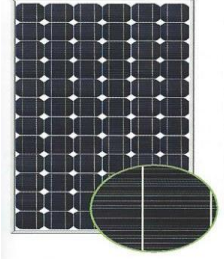


En effet, les hétéro-structure à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21% et de 16% en production industrielle [4].

Un avantage remarquable de ce type des cellules est son aptitude de fonctionner sous faible éclairage. Son inconvénient reste le rendement faible en plein soleil (environ 6%) [6].

Le tableau ci-dessous montre un comparatif entre quelque filière citée précédemment.

Comparaison des trois principales technologies de capteurs :

**Tableau 1: Comparaison des trois principales technologies de capteurs**

Technologie	Monocristallin	Polychristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très bon rendement : <b>14 à 20 %.</b></li> <li>• Durée de vie : <b>importante (30 ans)</b></li> <li>• Coût de fabrication : <b>élevé.</b></li> <li>• Puissance : <b>100 à 150 Wc/m2.</b></li> <li>7 m2/kWc.</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal</li> <li>• Couleur bleue uniforme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon rendement : <b>11 à 15 %.</b></li> <li>• Durée de vie : <b>importante (30 ans)</b></li> <li>• Coût de fabrication : <b>meilleur marché que les panneaux monocristallins</b></li> <li>• Puissance : <b>100 Wc/m2.</b></li> <li>8 m2/kWc.</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</li> <li>• Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement faible : <b>5 à 9 %.</b></li> <li>• Durée de vie : <b>assez importante (20 ans)</b></li> <li>• Coût de fabrication : <b>peu onéreux par rapport aux autres technologies</b></li> <li>• Puissance : <b>50 Wc/m2.</b></li> <li>16 m2/kWc.</li> <li>• Fonctionnement correct avec un éclairement faible.</li> <li>• Peu sensible aux températures élevées.</li> <li>• Utilisables en panneaux souples.</li> <li>• Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.</li> <li>• Rendement faible en plein soleil.</li> <li>• Performances diminuant avec le temps.</li> <li>• Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.</li> </ul>
Part de marché	43 %	47 %	10 %

### I.4.1.2. Cellules couches minces:

Les cellules PV en couches minces (Thin-film) sont souvent appelés cellules de seconde génération puisqu'elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couches minces vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule en comparaison avec les cellules classiques.

Contrairement aux cellules de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent) [4]. Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale. Dans ce contexte les trois technologies émergentes sont aujourd'hui [4] :

- Le silicium amorphe et microcristallin noté TF-Si (Thin-Film Silicons).
- Le semi-conducteur poly-cristallin CdTe (Tellure de Cadmium).
- L'alliage CuIn, Ga Se<sub>2</sub> (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté dans la littérature CIGS.

#### a. Définition des cellules à hétérojonction:

Les cellules à hétérojonctions sont des jonctions formées par la juxtaposition de deux matériaux de natures différentes ayant des énergies de bande interdite. Ces cellules sont constituées d'une base en silicium massif (cristallin) avec également des dépôts de couches ultra-minces de silicium amorphe ou polymorphe, afin de former l'émetteur de la cellule en face avant et le champ de surface à l'arrière [10].

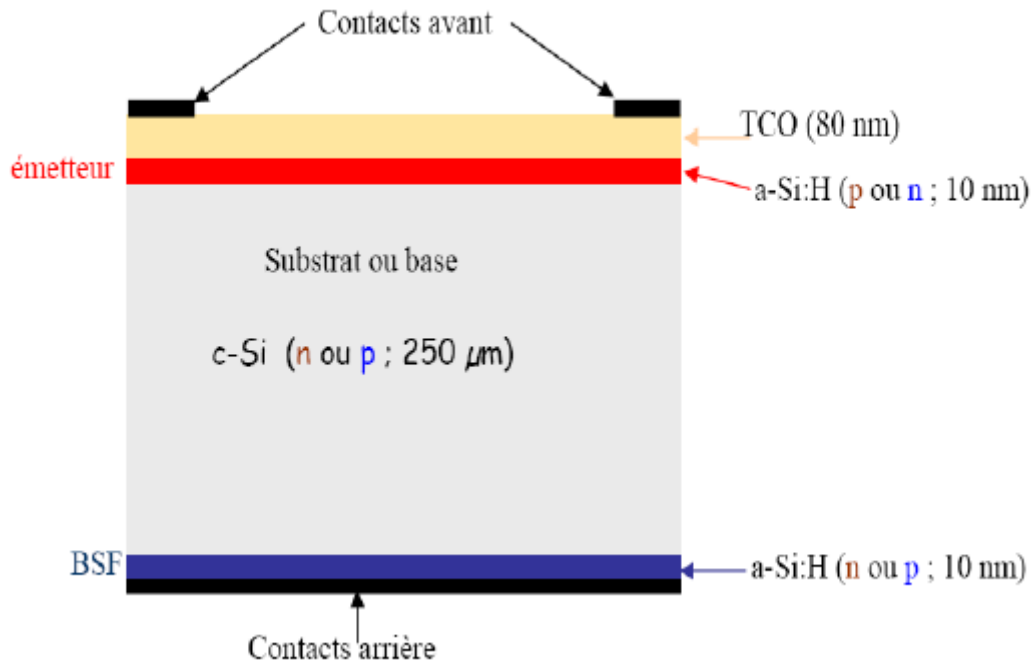
L'aspect hétérojonction (due à la différence de gaps des deux semi-conducteurs) confère des propriétés intéressantes grâce à l'existence de discontinuité de bande (discontinuité de bande de valence ( $\Delta E_v$ ) et discontinuité de bande de conduction ( $\Delta E_c$ ).

Lorsque les deux semi-conducteurs, sont mis en contact, il y a transfert des électrons du semi-conducteur à plus fort niveau de Fermi, vers le semi-conducteur à plus faible niveau de Fermi, de manière à réaliser l'alignement des niveaux de Fermi, cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître une charge d'espace à la quelle est associée une barrière de potentiel (la tension de diffusion  $V_d$ ) qui arrête la diffusion des porteurs de charge est définit l'état d'équilibre [11]. L'hétérojonction est de plus en plus utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs afin de créer des composants plus performants. On cite quelques avantages de cellules solaires à hétérojonction :

- Procédés d'élaboration à basses températures



- Possibilité de dépôt de grande surface
- Meilleur coefficient de température
- Possibilité d'utiliser des wafers de silicium plus minces.



**Figure I.5: Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions [11].**

### **b. Les filières non silicium en couche mince:**

Les cellules sans silicium en couche mince sont des cellules solaires dernière génération appelées aussi semi-conducteur(CIS). Constituées de films minces pareils à des films de type cuivre-indium-sélénium (CIS) utilisés comme semi-conducteurs. Ces matières premières servant à fabriquer ces cellules solaires sont, pour certaines, plus difficiles à trouver comme c'est le cas de l'indium. Ce type de cellules permet d'avoir de bons rendements et de ne pas dépendre du silicium.

### **c. Les multi-jonctions en couche mince:**

Afin d'améliorer les performances des cellules en couches-minces, des architectures à double et triple jonctions ont été développées. Elles sont inspirées des cellules multi-jonctions développées initialement pour le spatial pour bénéficier au maximum du spectre solaire.

Aujourd'hui ces architectures présentent une mise en œuvre plus simple et mieux maîtrisée pour le marché terrestre. Nous pouvons citer par exemple les cellules tandem à base de silicium amorphe et poly-cristallin (a-Si/ $\mu$ c-Si) [12]. Le meilleur rendement enregistré en laboratoire, pour ce type de cellules est de l'ordre de 12%.

L'architecture de ces cellules consiste à empiler deux cellules photovoltaïques permettant l'absorption des photons de longueurs d'onde différentes donc absorber un plus large spectre lumineux et produire ainsi, plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Le procédé de fabrication est le même que pour les couches minces, les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma(PECVD) sur un substrat de verre.

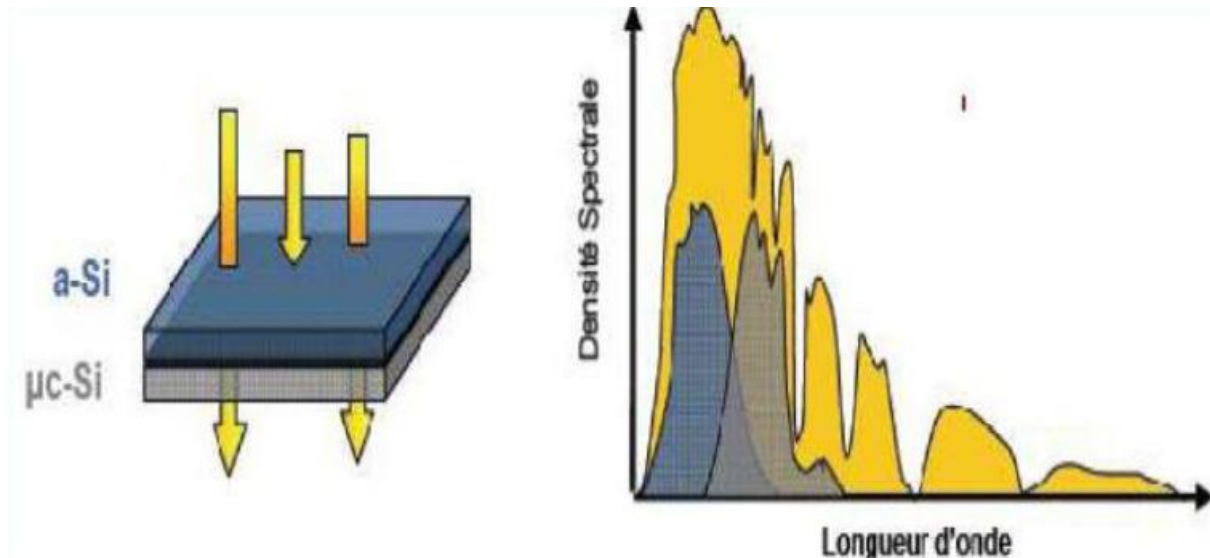


Figure I.6: Cellule Tandem a-Si/ $\mu$ c-Si & spectre solaire et spectres d'absorption [4]

#### d. Les cellules III-V multi jonctions:

La filière des dispositifs multi-jonctions, dite de « troisième génération » permet d'accéder aux rendements records dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Cette technologie repose sur l'utilisation de plusieurs matériaux à différentes bandes interdites dont chacune est optimisée pour absorber une partie du spectre solaire. Un rendement maximum été obtenu avec des structures basées sur des empilements, par épitaxie, de composés III-V. Ces cellules permettent d'atteindre un rendement de 32 % avec un système triple-jonction à base du GaInP/GaAs/Gesous un spectre standard [6]. Grâce à des concentrateurs de lumière, permettant de décupler la puissance solaire reçue par la cellule, des rendements de plus de 40 % [4] ont même été obtenus avec cette technologie ce qui constitue un record absolu en terme de conversion photovoltaïque.

#### e. Les cellules nanocristallines à colorant: Cellules de Grätzel:

Inspirée par la photosynthèse, les cellules de Grätzel sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4 % pour une cellule de 1 cm<sup>2</sup> et est à mettre au profit de la société Sharp [13]. Des tests de stabilités montrent que la durée de vie des cellules s'étale à 20 ans en fonctionnement. Ainsi, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 % [4].



Figure I.7: Les cellules nanocristallines à colorant [14]

#### I.4.1.3. Les cellules photovoltaïques organiques:

L'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles. Aujourd'hui, le record au niveau industriel est détenu par la firme Konarak avec un rendement qui dépasse les 5 % [13]. L'équipe de **Heeger** a même obtenu un rendement de 6,7 % avec des cellules de type « tandem » [4]. L'intérêt potentiel majeur des cellules solaires organiques réside dans une réduction drastique du coût de l'électricité PV par rapport aux cellules à base de silicium. La cellule photovoltaïque organique repose sur la création d'une hétérojonction à l'interface de deux matériaux respectivement donneur et accepteur d'électrons. Un atout majeur des matériaux actifs organiques réside dans leur possible mise en œuvre par voie humide, ce qui permet de réduire fortement l'empreinte carbone de la fabrication par rapport à la filière silicium.

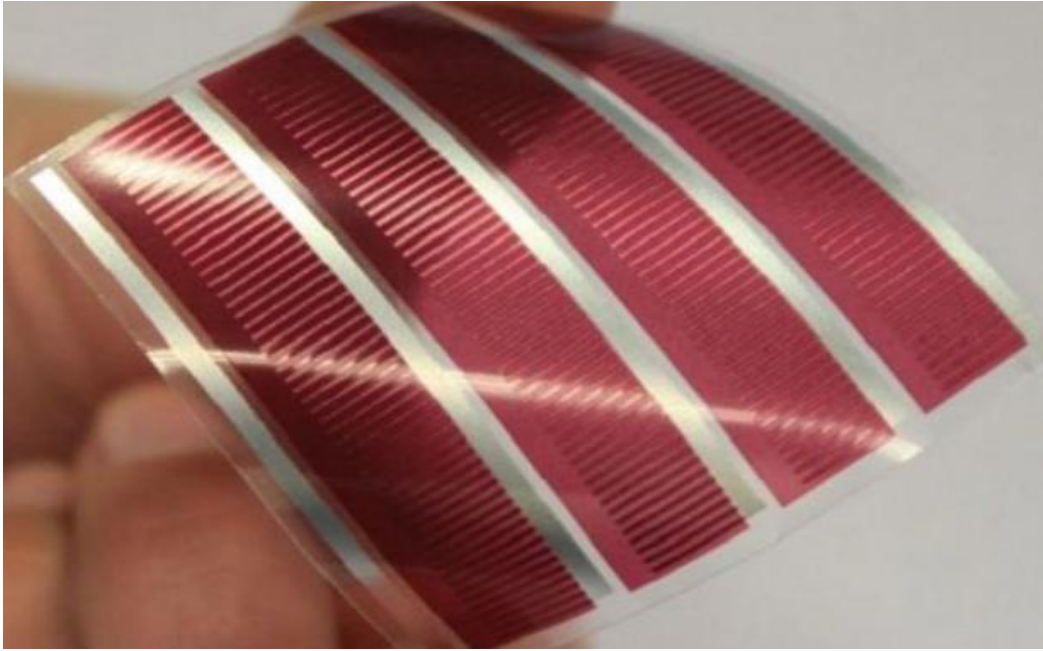


Figure I.8: Cellule photovoltaïque organique [15]

### I.5. Caractéristiques physiques des cellules photovoltaïques:

#### I.5.1 Caractéristique courant/tension et schéma équivalent [6]:

La figure I.10 représente les caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclairement.

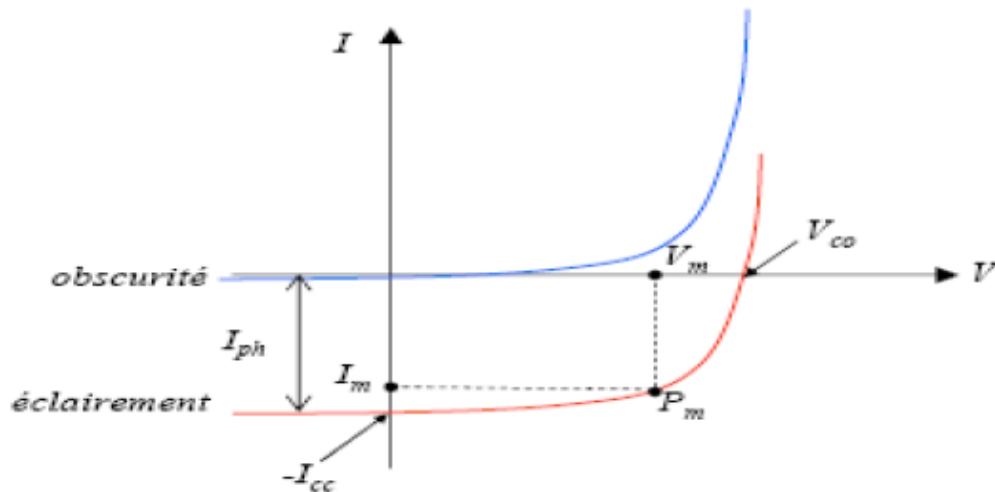


Figure I.9: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [16]

Pour une cellule solaire sous obscurité et polarisée par une tension  $V$ , la courbe obéit à l'équation de **Shockley** suivante :

$$I_{obs} = \left( \exp\left(\frac{qv}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (I.1)$$

Où  $I_{obs}$  est le courant d'obscurité,  $I_s$  est le courant de saturation,  $q$  la charge de l'électron,  $k$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température et  $n$  le facteur d'idéalité de la diode qui tient compte des recombinaisons (dans le cas idéal, il est égale à 1). Sous éclairage, les paires électron-trou créées dans le semi-conducteur, sont balayées par le champ électrique interne et produisent un courant  $I_{ph}$ . Le courant  $I_{ph}$  passe dans le circuit extérieur à travers une résistance de charge  $R_{ch}$ , ce qui induit une auto-polarisation  $V$  de la cellule. Dans le modèle le plus simple (modèle linéaire), qui stipule la superposition des courants d'obscurité et d'illumination,  $I$  et  $V$  sont reliés par :

$$I(v) = I_{obs}(v) \quad (I.2)$$

Dans le cas réel, des résistances de contacts dues à la résistivité des électrodes et des interfaces

métal-matériaux organiques et des pertes ohmiques ainsi que des courants de fuite (des courants de court-circuit) apparaissent à travers la cellule. Dans la figure II.6 un modèle électrique de la cellule photovoltaïque. On y retrouve le générateur de courant  $I_{ph}$  correspondant à la courante photo générée ainsi que les résistances complémentaires,  $R_s$  (résistance série) et  $R_p$  (résistance parallèle), et une diode (la courante diode représente le courant d'obscurité  $I_{obs}$ ).

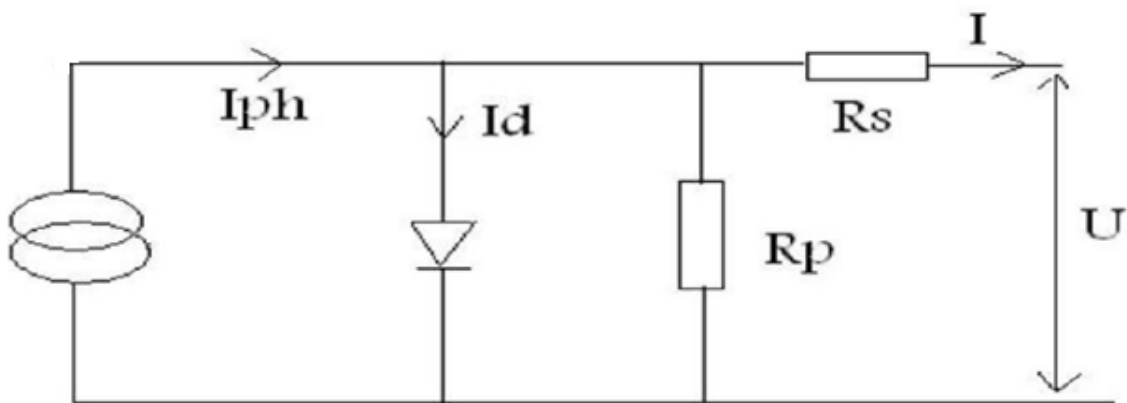


Figure I.10: Schéma électrique d'une cellule solaire [4]

La résistance série est une résistance liée à la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et l'impédance des électrodes. La résistance parallèle  $R_p$  est également connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur. Ces résistances donnent dans le cas réel une évaluation des imperfections de la diode.

### I.5.2. Les paramètres électriques des cellules photovoltaïques:

Les paramètres des cellules photovoltaïques, extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ces paramètres sont :

#### a. Courant de court-circuit $I_{cc}$ :

Le courant de court-circuit est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

#### b. Tension de circuit ouvert $V_{co}$ :

La tension de circuit ouvert est la tension mesurée en absence de courant électrique dans la cellule. Cette tension dépend essentiellement du type de cellule solaire (à jonction PN ou jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts couche active électrode.

De plus, elle dépend de l'éclairement de la cellule. On peut facilement avoir l'expression de  $V_{co}$  dans le cas d'un courant nul :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.3)$$

- $I_{cc}$  : courant de court-circuit, courant lorsque  $V = 0$ .
- $I_s$ : courant de saturation

#### c. Facteur de forme FF:

On peut définir le facteur de remplissage ou facteur de forme FF par la relation suivante:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.4)$$

- $V_m$ : tension correspondante à la puissance maximale fournie.
- $I_m$ : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

On note que le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non pas par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit  $P_m = I_m \cdot V_m$ .

#### d. Le rendement:

C'est l'un des paramètres clés caractérisant une cellule solaire. C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini la relation suivante :

$$\eta = \frac{Vm.Im}{P_{leclidante}} \quad (I.5)$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule

### I.6. Module photovoltaïque:

Dans le but de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque. Deux modes d'arrangement des cellules solaires sont envisagés [4] :

En série : pour un même courant, cet arrangement permet d'augmenter la tension.

En parallèle : ce type de connexion accroît le courant en conservant la même tension.

Le module standard commercialisé, connectant 36 cellules en série pour des applications en

12V, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique, a généralement une tension à vide supérieure à 20 V et le point optimal de fonctionnement est au voisinage de 16 V à 25°C. Mais la température du module sous rayonnement est souvent supérieure à 40°C, et les performances des cellules sont réduites. On compte en général par cellule une baisse de 2 mV/°C, soit 72 mV/°C par module de 36 cellules. La tension du module tombe alors aux alentours de 14 V ce qui est idéal pour la charge d'une batterie.

#### I.6.1. Encapsulation et encadrement:

L'encapsulation a pour but de regrouper les cellules en série ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et des courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs tels que l'humidité, la pluie, les poussières, la corrosion, les chocs mécaniques. En pratique, l'encapsulation consiste à la mise en sandwich de l'ensemble constitué par les cellules et le matériau encapsulant (EVA) entre deux plaques de verre ou entre une plaque de verre et un ensemble constitué de couches minces de polymère (tedlar, mylar) et d'aluminium (voir figure II.8).

- **Le verre** : Il s'agit d'un verre trempé de 4 mm d'épaisseur. La face extérieure du verre est recouverte de nano pores qui piègent la lumière incidente et réduisent la réflexion en surface.

- **L'EVA** : L'EVA est une résine transparente enrobant les cellules photovoltaïques.

- **Le Maylar** : est un film polymère transparent utilisé pour isoler électriquement les connexions de sortie de la face arrière des cellules.

• **Le Tedlar** : est un polymère fluoré. Le rôle majeur du tedlar, dans un module photovoltaïque, est la protection de surface. En effet, le TEDLAR résiste particulièrement bien aux agressions extérieures.

• **Cadre en aluminium** : Le cadre en aluminium se justifie par la haute résistance de celui-ci à l'humidité ainsi qu'aux chocs mécaniques.

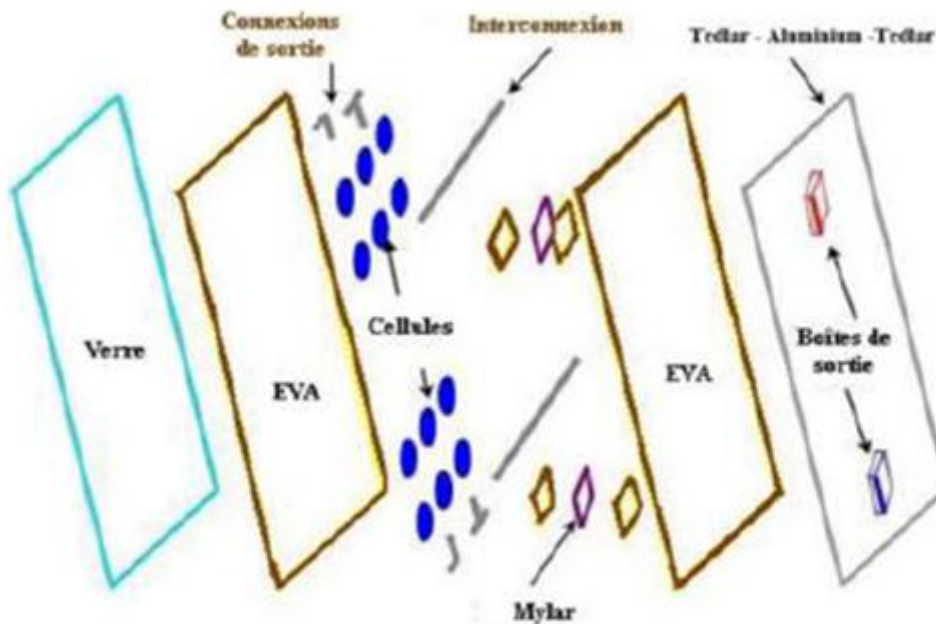


Figure I.11: Illustration d'encapsulation des cellules photovoltaïques [17]

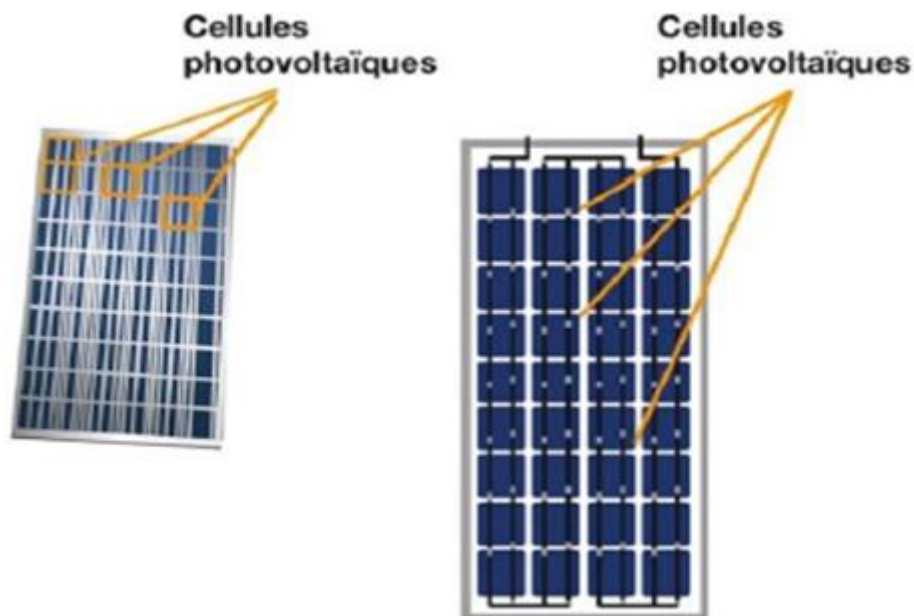
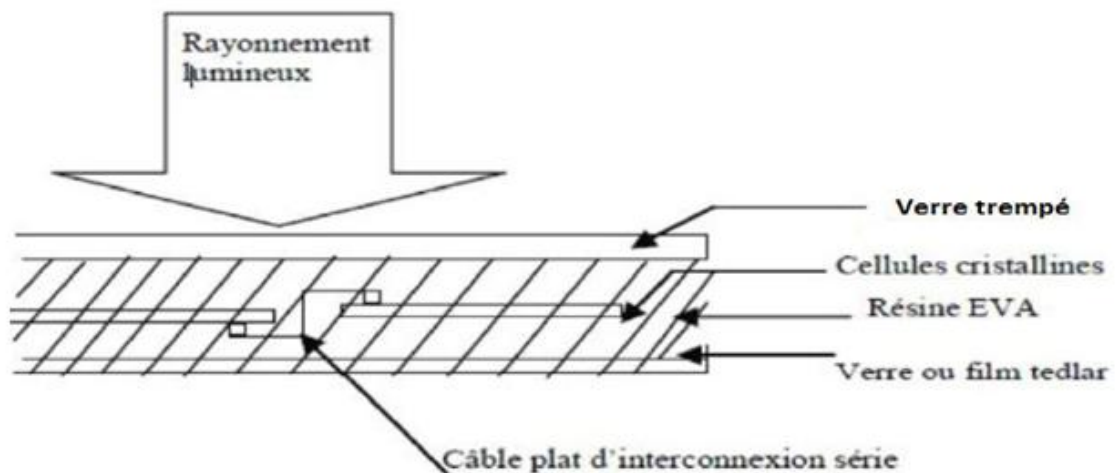


Figure I.13: Module photovoltaïque de 36 cellules [17]





**Figure I.12: vue en coupe d'un module photovoltaïque [4]**

### **I.7.Exploitation de l'énergie photovoltaïque:**

L'exploitation de l'énergie photovoltaïque s'effectue suivant les étapes citées dans la Figure I.15ci-dessous :

#### **I.7.1.Production d'énergie:**

La partie production est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules sont formés d'un assemblage série/ parallèle de cellules photovoltaïque, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité. La majorité des modules commercialisés comportent 36 cellules en silicium cristallin. Le courant de sortie, et la puissance de ces modules sont proportionnels à la surface du module.

Ces panneaux ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [18].

#### **I.7.2.Contrôle d'énergie:**

La partie contrôle d'énergie est composée d'un système de stockage avec ou sans régulation, plus les câbles de connexions.

#### **I.7.3La partie utilisation:**

Après contrôle, l'énergie photovoltaïque accumulée sera exploitée par de nombreux secteurs (comme l'éclairage public, pompage, etc.). On plus de ces étapes citées ci-dessus on peut ajouter encore des moyens d'entretiens du système photovoltaïque comme outils de nettoyages des modules PV. [19]

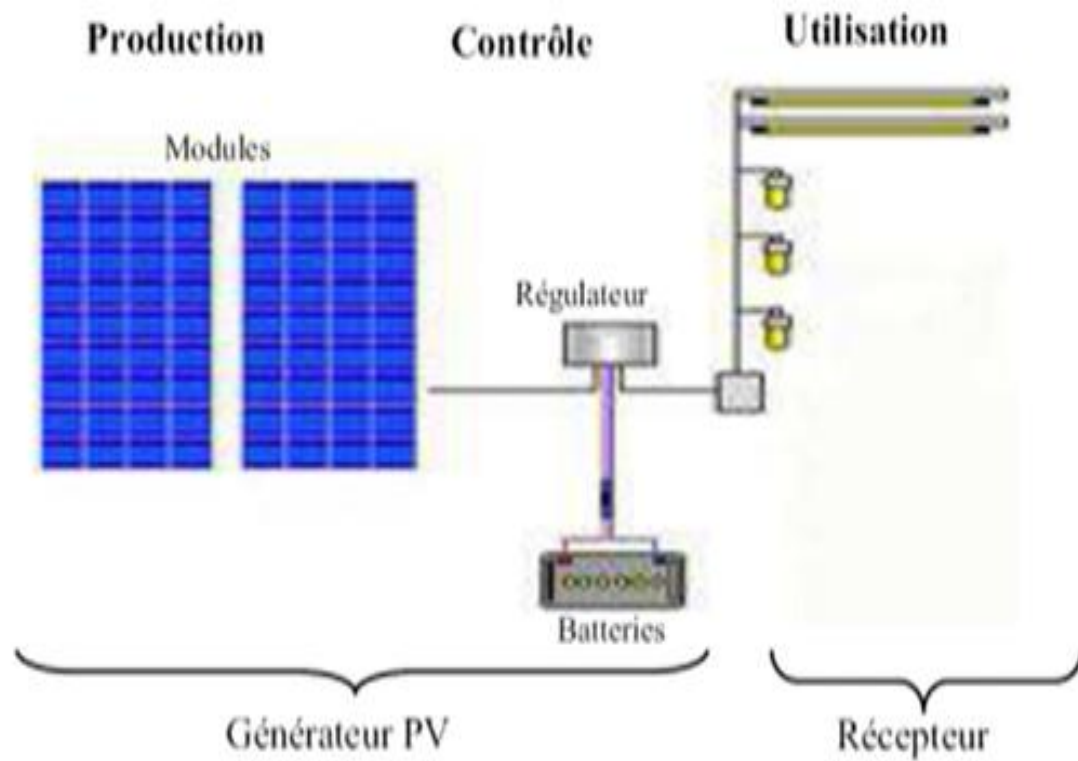


Figure I.13: Eléments d'un système photovoltaïque [19].

### I.8. Conclusion:

Le photovoltaïque est en plein essor, il permet beaucoup d'avantages pour les systèmes isolés. Le rendement a beaucoup augmenté depuis les débuts du photovoltaïque. Mais aujourd'hui, les chercheurs se tournent davantage vers l'amélioration de la durée de vie des panneaux. Malgré tout, il ne s'est pas encore imposé comme l'énergie du futur.