

## I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, proviennent directement ou indirectement du soleil. Selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue, les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières qui sont: l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, la biomasse et l'énergie photovoltaïque. L'énergie photovoltaïque est considérée comme étant la filière la plus jeune, non polluante, fiable, et souple à exploiter. L'exploitation de l'énergie photovoltaïque est assurée par les dispositifs dites cellules photovoltaïques. La conversion directe de l'énergie solaire en électricité se fait par l'intermédiaire d'un dispositif à semi-conducteur appelé cellule solaire. Cette dernière, ne nécessite ni pièce en mouvement, ni carburant, et n'engendre aucun bruit. Exposée à la lumière, la cellule absorbe l'énergie des photons lumineux. Ceux-ci mettent en mouvement des électrons qui sont happés par un champ électrique interne. Les électrons collectés à la surface de la cellule génèrent un courant électrique continu [3].

Les cellules solaires sont parfois utilisées seules (éclairage de jardins, calculatrices,...) ou regroupées sur des panneaux solaires photovoltaïques. Elles sont utilisées pour produire de l'électricité pour de nombreuses applications (satellites, parc-mètres, ...), ainsi que pour alimenter des habitations ou un réseau public de distribution dans le cas d'une centrale solaire photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans [1]. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et les équipements pour les sites isolés. Ceci est assuré, en utilisant les batteries pour le stockage de l'énergie électrique pendant les heures non ensoleillées (durant la nuit par exemple). Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs : le silicium (Si) par exemple et d'autres comme le Sulfure de Cadmium (CdS), Tellure de Cadmium (CdTe), le composé Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium (CIGS), etc.[2].

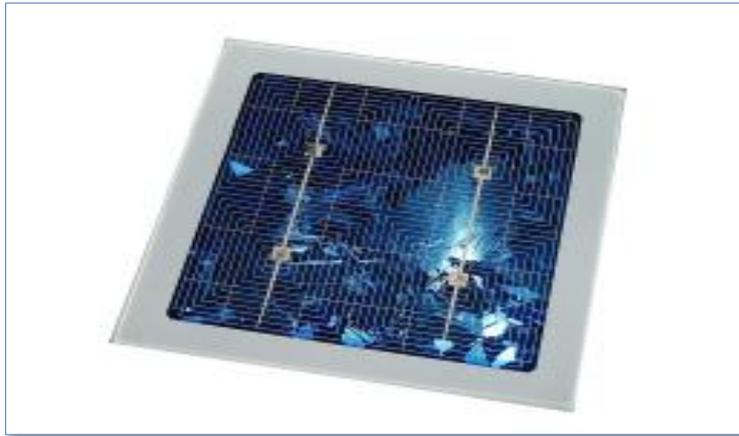


Figure 1.1 Cellule photovoltaïque [2]

## I.2. Cellule photovoltaïque

### I.2.1. Principe de conversion

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité (voire figure I.2). C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

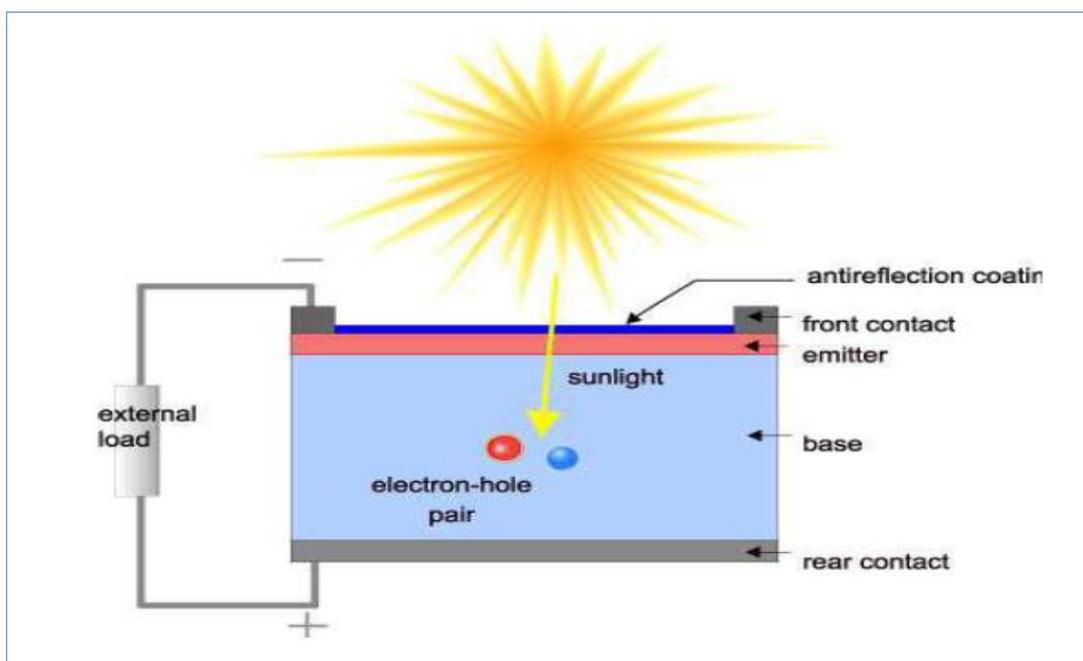


Figure 1.2 Mécanisme de conversion lumière-courant par une cellule PV [3]

La tension de sortie d'une cellule photovoltaïque reste faible (0,6 V). C'est pour cette raison les cellules sont mises en série électrique, puis encapsulées entre une plaque de verre à l'avant et un autre matériau étanche à l'humidité à l'arrière. Elles forment ainsi un module photovoltaïque (produit que l'on trouve dans le commerce). Selon les technologies et le type d'usage qui en est fait, ce module présente une surface de 0,1 m<sup>2</sup> (10 W) à 1 m<sup>2</sup> (100 W), valeurs moyennes indicatives, et décline des tensions de (12 V), (24 V) ou (48 V) selon l'application [4]

### 1.2.2. Relation entre le Gap d'énergie et longueur d'onde

Dans un semi-conducteur, la distance entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence définissent l'énergie du gap  $E_g$ . Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence le gap est dit direct, les transitions sont donc directes et radiatives comme le CIGS. Dans le cas contraire, le semi-conducteur est dit à gap indirect (Silicium) c'est-à-dire que les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques et par conséquent non radiatives (voir figure 1.3).

La cellule solaire n'est sensible que dans un domaine de longueur d'onde bien déterminé. Ce domaine est directement lié au gap du semi-conducteur exploité. Dans le cas du silicium, qui a un gap indirect de 1,12 eV (à la température ambiante), les photons ayant une longueur d'onde inférieure à 1107 nm pourront générer une paire électron-trou. On parle alors de la photo-génération.

La relation entre le gap d'énergie et la longueur d'onde est la suivante :

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Un photon ne peut être absorbé par la cellule solaire (le semiconducteur) sauf si  $E_{\text{photon}} \geq E_g$

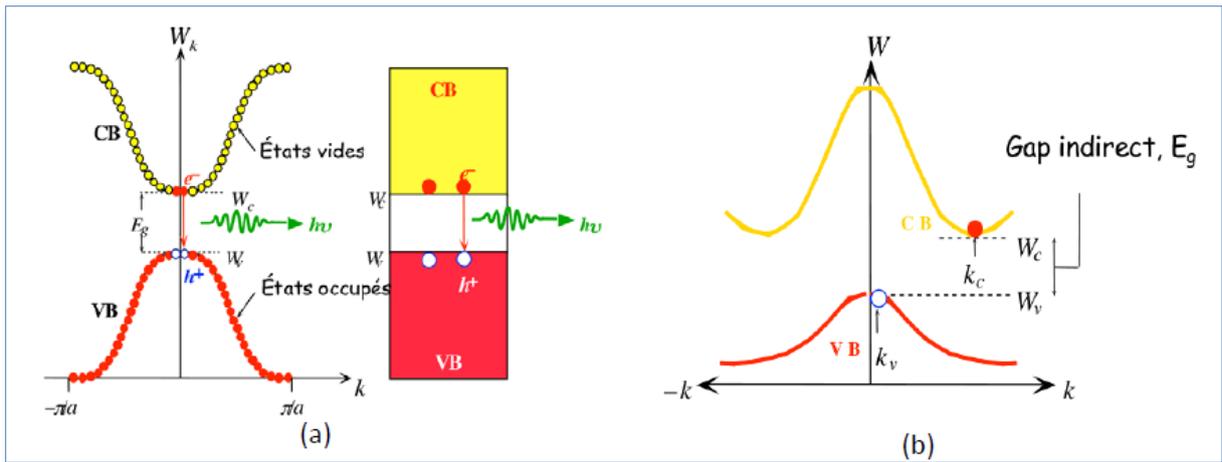


Figure 1.3 Représentations schématiques du gap direct (a) et du gap indirect (b) [5]

### 1.2.3. Structure d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque comporte deux régions, l'une de type N présentant un excès d'électrons et l'autre de type P où les porteurs de charge majoritaires sont les trous. Le contact entre les deux régions, donne naissance au phénomène de diffusion des électrons en excès dans la région N vers la région P. Suite à la diffusion, il se produit un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la région N et les trous dans la zone P. Donc oppose le phénomène de diffusion (voir figure 1.4).

En ajoutant les contacts métalliques sur les deux régions, une diode est ainsi obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieurs ou égale à la largeur de la bande interdite  $E_g$ , cèdent leurs énergies aux atomes ou chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction laissant derrière un trou libre capable de se déplacer. Donc, une paire électron/trou est engendrée. Si une charge est connectée à la cellule, les électrons de la région N rejoignent les trous de la région P via la connexion extérieure donnant naissance à une différence de potentiel. Un courant électrique circulera alors à ses bornes.

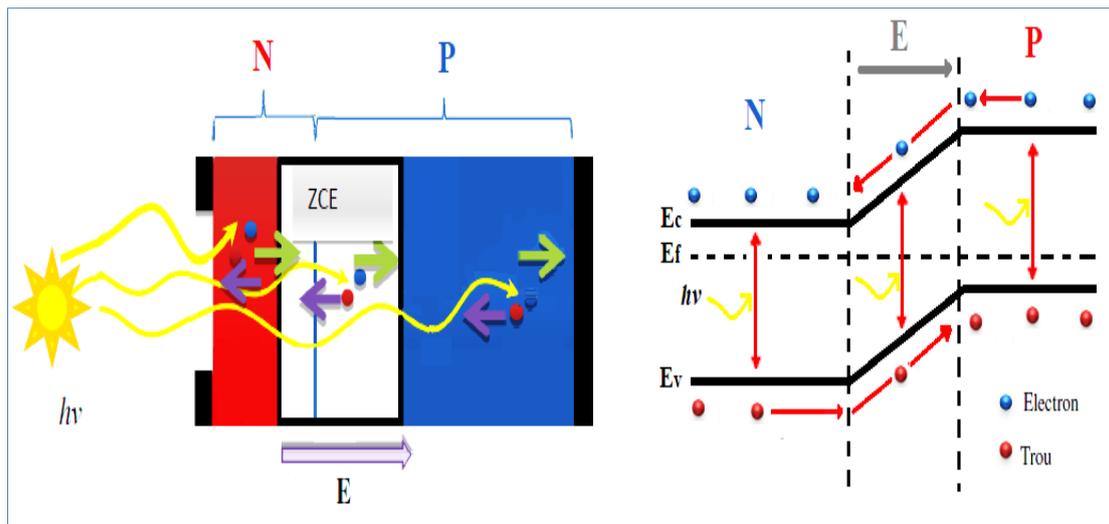


Figure 1.4 Structure et diagramme de bande d'énergie d'une cellule solaire [6]

### I.3. Optimisation de la conversion de l'énergie solaire

L'optimisation de la conversion de l'énergie solaire en électricité requiert au moins trois phénomènes physiques de base aient lieu quasi-simultanément [7] :

- ❖ L'absorption du maximum de l'énergie lumineuse incidente, c'est-à-dire l'absorption du maximum possible de photons.
- ❖ Optimiser la structure de la cellule afin de réduire le nombre de photons réfléchis
- ❖ La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres ;
- ❖ La collecte sans perte de ces derniers dans un circuit électrique extérieur

Une cellule solaire (ou photopile) doit donc être constituée :

- ❖ D'un matériau absorbant, dans la bande optique du spectre solaire (voir figure 1.) possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie, transformant ainsi l'énergie lumineuse en un potentielle (non thermique),
- ❖ D'une structure de collecte de faible résistance électrique.

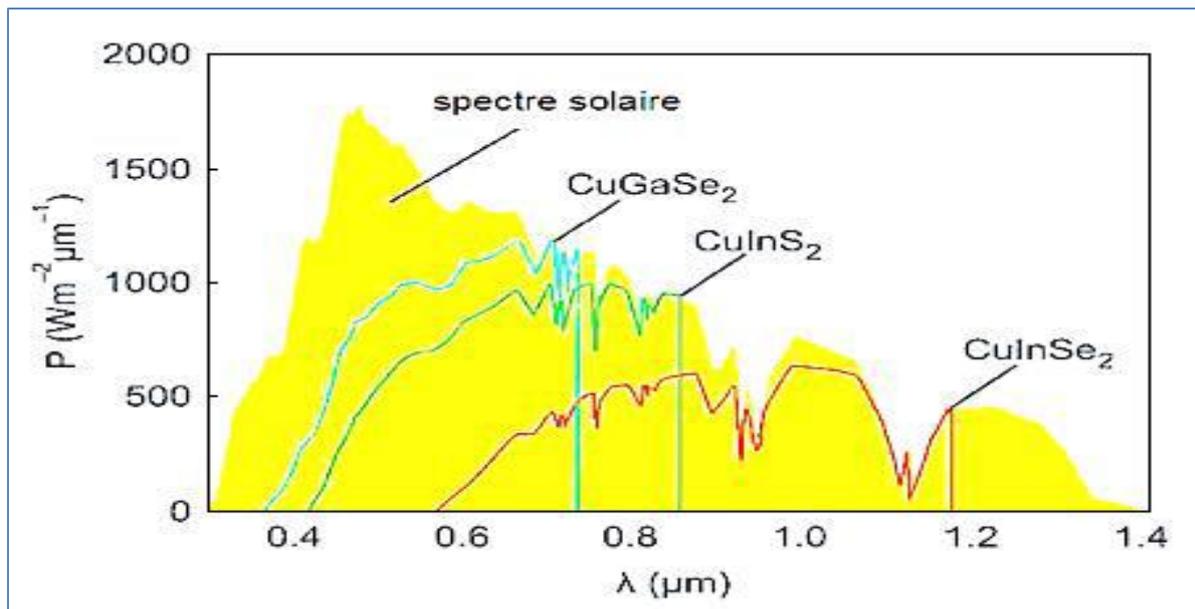


Figure 1.5 Spectre solaire et la réponse des matériaux CIGS [4]

#### I.4 Circuit électrique équivalent

Afin de décrire son comportement électrique, le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé. À l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.). Dans le cas de la cellule solaire, l'expérience à montrer qu'à l'obscurité; la cellule suit le comportement d'une diode classique.

Dans le cas d'une cellule idéale, la caractéristique  $I-V$  peut être représenté par la relation suivante :

$$I_{\text{obs}} = I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

Où :

$I_s$  : le courant de saturation en Ampère (A).

$n$  : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

$K$  : la constante de Boltzmann,  $T$  : la température absolue en Kelvin et  $q$  : la charge absolue d'un électron.

Sous éclaircissement, un terme  $I_{ph}$  qui fait compte du photo-courant généré, est rajouté à l'équation. On obtient le circuit électrique équivalent (simplifiée) d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclaircissement.

Dans ce cas, le courant prend l'expression suivante:

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad (1.3)$$

Avec 
$$I_{obs} = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (1.4)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle d'autres paramètres, liés aux effets résistifs et courants de fuites de courant vers les bords, doivent être pris en considération. L'équation du courant-tension devient alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(V+R_s I)}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

La figure 1.6 donne le schéma équivalent d'une cellule réelle. Ce schéma contient :

- ✚ Un générateur de courant ( $I_{ph}$ ) délivre un courant correspondant au courant photo-généré.
- ✚ Une diode ( $D$ ) : modélise la jonction P-N.
- ✚ Une résistance série  $R_s$ : modélise les pertes résistives au sein de la photopile.
- ✚ Une résistance parallèle (résistance shunt  $R_{sh}$ ) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones  $N$  et  $P$  de la jonction;

Par la suite il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  qui sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

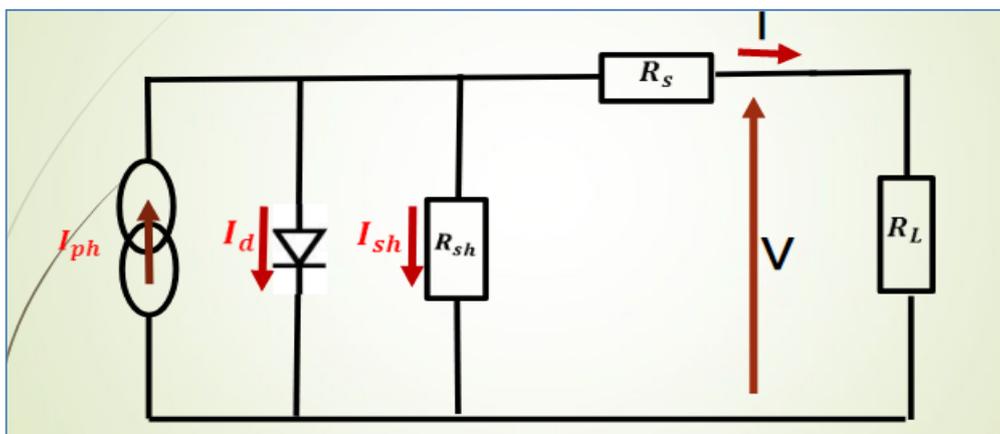


Figure 1.6 Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire [7].

## I.5. Paramètres électriques d'une cellule solaire

A partir de la caractéristique courant-tension, d'une cellule sous obscurité et sous éclairage, on peut évaluer les performances ainsi que le comportement électrique de la cellule photovoltaïque.

### I.5.1 Tension en circuit ouvert $V_{co}$

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = V_{th} \ln(1 + I_{ph}/I_s) \quad (1.6)$$

### I.5.2 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement 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.

L'expression suivante exprimée le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \times \left( \exp\left(\frac{q(V+R_s I_{cc})}{nKT}\right) - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

Avec :

$I_{cc}$  : courant de court-circuit.

$I_{ph}$  : courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairage.

$I_s$  : courant de saturation.

$R_s$  : résistance série du générateur solaire.

$R_{sh}$  : résistance shunt du générateur solaire.

A un niveau d'éclairage standard (égale à 1 kW/m<sup>2</sup>), l'effet de la résistance série est négligeable. Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant  $I_{ph}$ , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairage  $\Phi$

$$I_{cc} = I_{ph} = c \Phi \quad (1.8)$$

Où :  $C$  : constante.

$\Phi$  : Flux solaire

### I.5.3 Puissance maximale

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit  $V.I$  est maximum. Si  $V_m$  et  $I_m$  sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximale est donc la surface du plus grand rectangle de côté  $V_m$  et  $I_m$  qu'on peut inscrire sous la courbe  $I(V)$  (voir Figure 1.8)

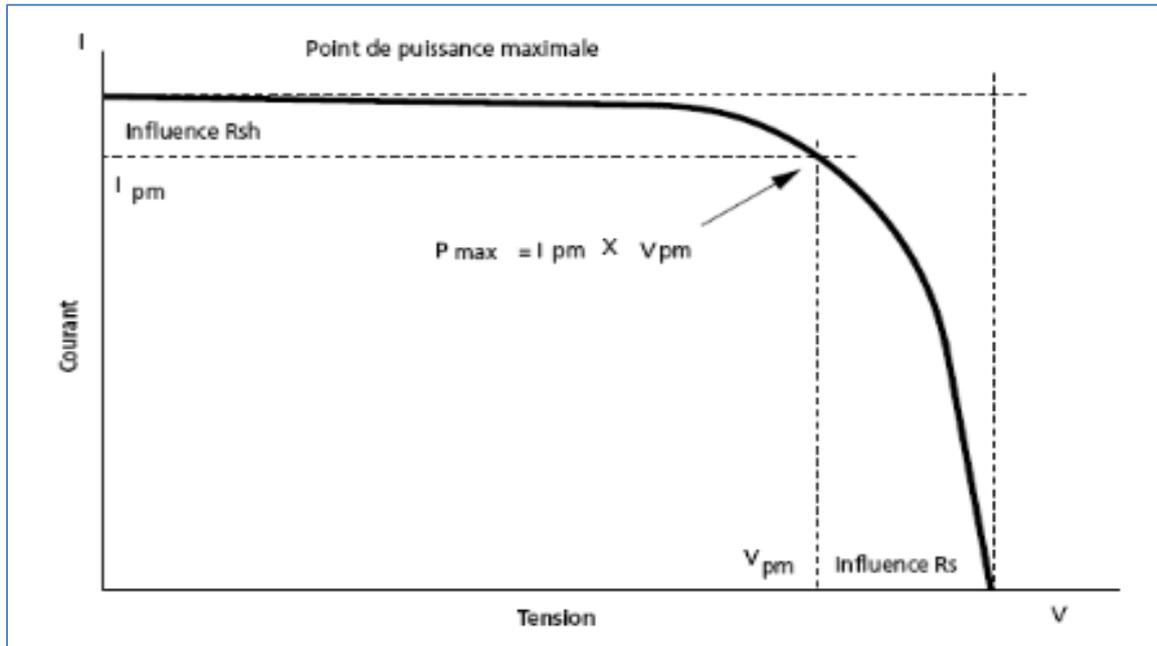


Figure 1.7 Courbe caractéristique  $I = f(V)$  d'une cellule [8]

### I.5.4 Facteur de forme FF

Le facteur de forme (**FF**) « en anglais : Fill Factor » est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale et le produit ; d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (1.9)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, (exprimé en %) qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85 [9]

### I.5.5 Rendement $\eta$

C'est le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Si  $S$  est la surface de la cellule (en  $m^2$ ) et  $E$  est l'éclairement-irradiante (en  $W/m^2$ ) Le rendement énergétique s'écrit [10] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} * S \quad (1.10)$$

$P_{inc}$  : Puissance incident ;  $S$  : surface de la cellule photovoltaïque

Avec

$$P_m = FF * I_{cc} * V_{co} \quad (1.11)$$

$$\eta = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{P_{inc}} * S \quad (1.12)$$

## I.6. Association des cellules

Dans les conditions standard STC ( $1000W/m^2$  ;  $25^\circ C$  ; AM1.5), la puissance maximale pour une cellule au silicium de  $10cm^2$  serait d'environ  $1.25 W$  [11]. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux.

### I.6.1 Mise en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante de ce type de groupement est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

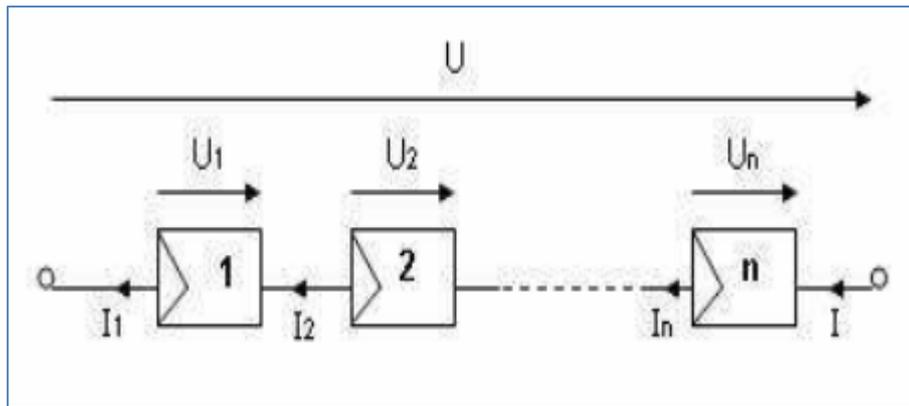


Figure 1.8 Association série des cellules solaires [9]

### I.6.2 Mise en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. [11]

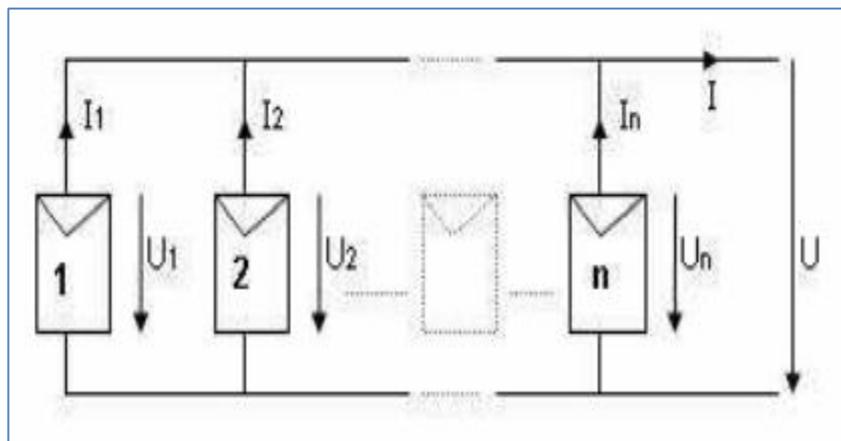


Figure 1.9 Association parallèle des cellules solaires [10]

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V.

### I.7. Techniques de fabrication des cellules solaires

Le processus de fabrication standard des systèmes photovoltaïques est réalisé suivant plusieurs étapes. Les étapes décrites dans la figure 1.11, valent pour la filière silicium cristallin.

Les principales étapes du processus de fabrication :

- ✚ Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz.
- ✚ Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques.
- ✚ Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour d'une cellule photovoltaïque Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.
- ✚ Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.

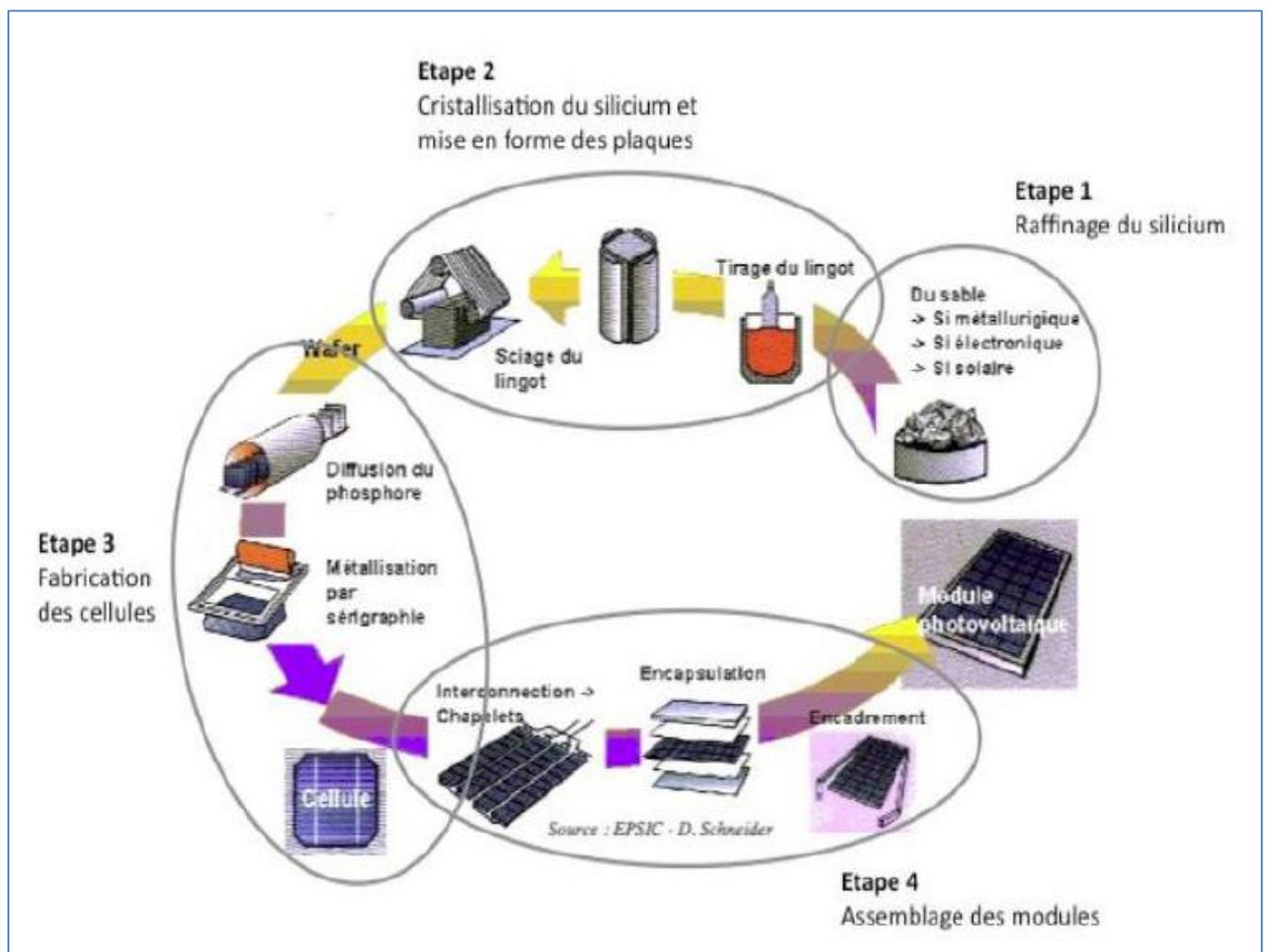


Figure 1.10 Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques [11]

Les matériaux les plus utilisés dans la fabrication des cellules solaires : (Si, Si monocristalline, Si multi-cristalline, Si amorphe, les alliages (CdTe, CdS, CIGS), les matériaux Organiques à

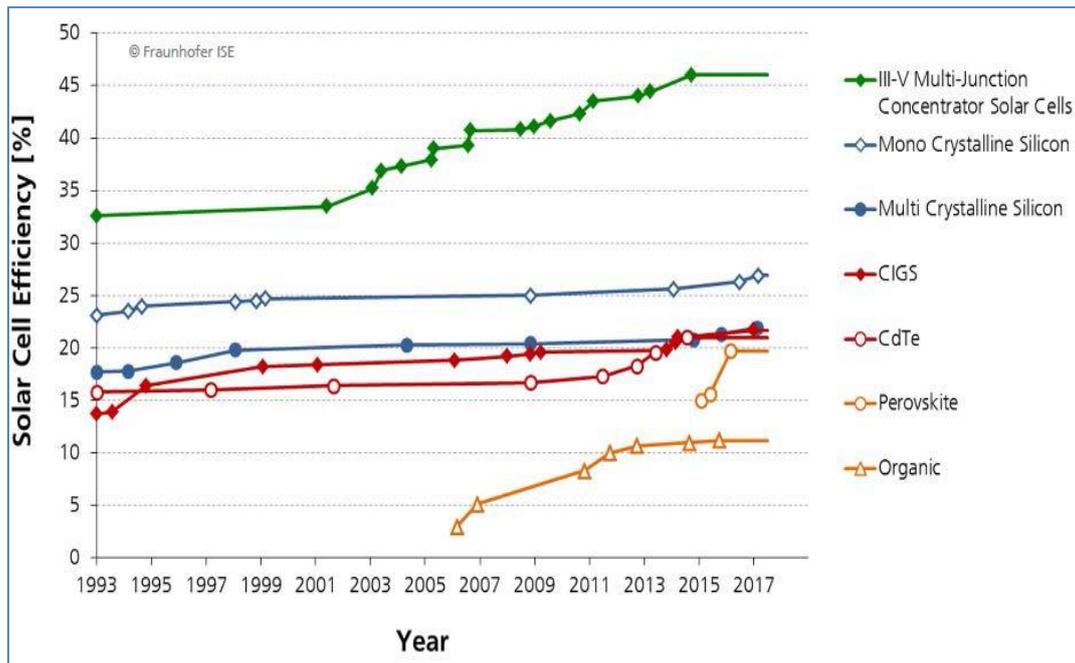


Figure 1.11 Évolution en laboratoire du rendement des cellules photovoltaïques [12]

## I.8. Différents types de cellules solaires

Sur le plan technologique ; plusieurs types de cellules solaires sont distingués :

### I.8.1 Cellules solaires au silicium

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en terme la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories principales de photopiles au silicium :

- ✚ **Cellules monocristallines** : Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent [13] (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.
- ✚ **Cellules poly-cristallines** : Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13% (autour de 18 % en laboratoire) [13].
- ✚ **Cellules amorphes** : Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie entre 8 – 10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [14].

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voire du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres, Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux panneaux cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées [13].

### **I.8.2. Cellules solaires à couche mince**

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

Cadmium-tellure (CdTe) : Rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique. Gallium Arsenic (Cuivre-indium-di sélénium (CIS) ou cuivre-indium-gallium sélénium (CIGS) : Leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minimale, mais fabrication très délicate. (GaAs): leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [15].

### **I.8.3 Cellules solaires organiques**

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [15].

### **I.8.4 Cellules solaires à gap gradué**

Les cellules solaires à gap gradué c'est une technologie pour but d'améliorer le rendement énergétiques et quantiques. Elle est basée sur la variation de l'énergie du gap en fonction de la composition du matériau de la couche absorbante ou fenêtre. Pour la bande de valence, elle est considérée indépendante de la composition. Par conséquent, un gradient de composition de matériaux implémenterait un gradient de bande conductrice. Ce type des cellules seront discutées en détail dans le chapitre 02 et 03.