

Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila  
Faculté des sciences



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
كلية العلوم

## Département de Physique

# TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES

Option : *2<sup>ème</sup> année*

**Physique Energétique et Energies Renouvelables**

**Dr. SALMI Mohamed**

*Année 2020-2021*

# **PREFACE**

Ce document photocopie correspond au support de cours des matériaux photovoltaïques. Le cours vise à donner aux étudiants de physique énergétique et énergies renouvelables un vue générale des différentes sources d'énergie fossiles et renouvelables. L'objectif du cours est d'assurer une formation des bases relatives à la production d'électricité à partir de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. L'étudiant doit avoir des connaissances de bases sur la structure de la matière.

# Contenu de la matière

## **1- Les technologies photovoltaïques**

- a- Silicium monocristallin
- b- Silicium moulé multi cristallin (polycristallin)
- c- Les technologies de rubans et de feuilles
- d- Technologie de film mince de silicium amorphe

## **2- Technologies sans silicium**

- a- Tellurure de cadmium
- b- Diséléniure de cuivre et d'Indium
- c- Arséniure de galium
- d- Dioxyde de Titane
- e- Cellules à concentration

# **Chapitre 1**

## **RAPPELS ET NOTIONS**

## 1.1- Définition

La conversion photovoltaïque utilise le principe de la transformation directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique, les cellules solaires sont capables d'effectuer cette transformation. La première cellule solaire à homojonction en silicium a été fabriquée en 1954 aux laboratoires Bell avec un rendement voisin de 4.5% . En 1960, ce rendement a été porté à une valeur supérieure à 10% pour les cellules solaires à base de silicium monocristallin. De nombreux travaux de recherche sur l'amélioration du rendement de conversion ont été publiés. Jusqu'à 1972, les applications des cellules solaires étaient réservées au seul usage spatial à cause de leurs prix très élevés et leurs faibles rendements. Cependant, l'augmentation du rendement a été considérée plus déterminante par rapport à la réduction du coût, car toute amélioration des performances, optimisation des paramètres, s'applique directement sur le prix de l'énergie produite.

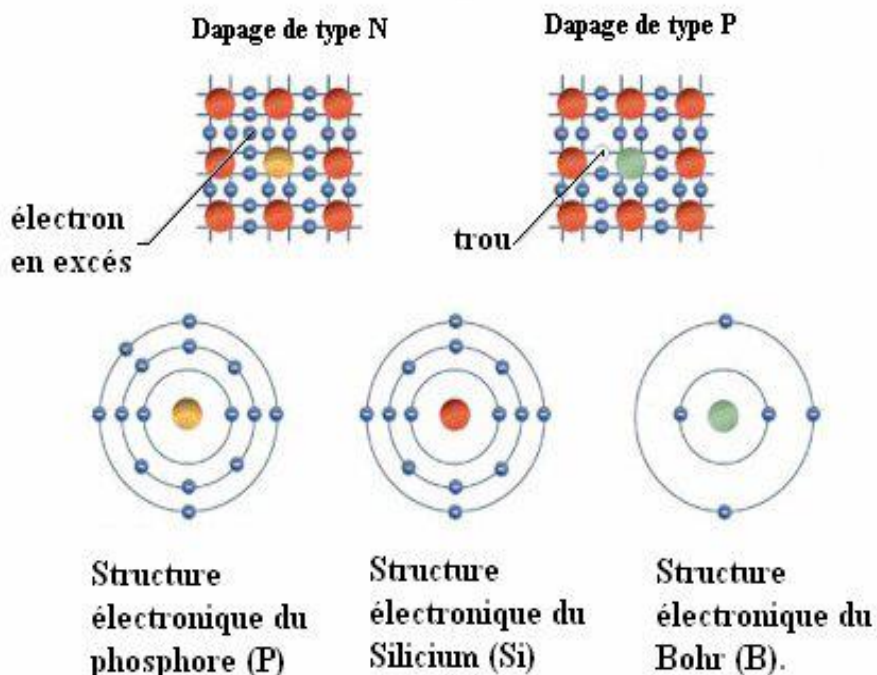
Un générateur photovoltaïque est tout d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition, c'est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière.

## 1.2- Le silicium

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Ce semiconducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semiconducteurs III-V ; il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct. Pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$  pour le silicium, alors que seulement 1  $\mu\text{m}$  de GaAs suffisent. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire (entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,43 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés.

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque. Outre les avantages précités, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czochralski) . Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristallin. Le silicium multicristallin est quant à lui fabriqué à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient aux processus de l'industrie photovoltaïque : il constitue 56,4% des modules fabriqués en 2000.

Le silicium est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche externe. Dans le silicium, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche externe participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 5 électrons dans la couche externe (phosphore par exemple), un électron ne participe pas aux liaisons, il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur est dit dopé N. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 3 électrons dans la couche externe (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir occuper ce manque. On dit alors qu'il y a conduction par un trou et le semi-conducteur est dit dopé de type P (Fig. 1.1).



**Figure 1.1** : Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont des dopants du silicium

Selon les atomes des matériaux utilisés pour le dopage, on distingue deux types de dopage:

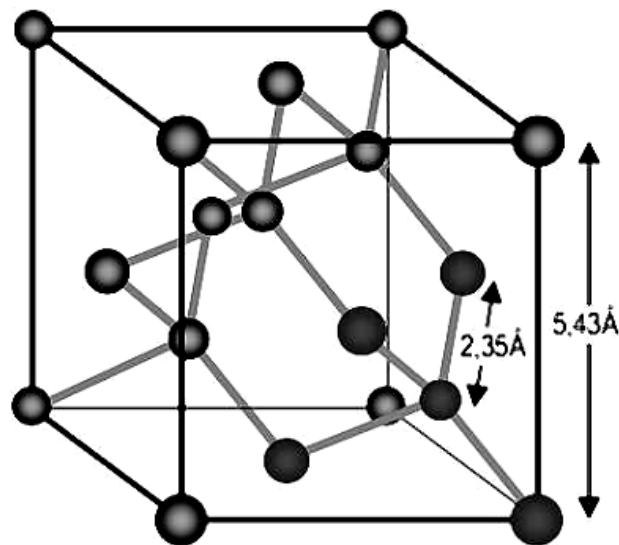
- **Type N**, où l'on ajoute un matériau dont les atomes ont pratiquement tous un électron excédentaire, celui-ci pouvant alors se propager librement dans le cristal. Le Phosphore, notamment, fait parti de ces matériaux "impurs" ayant des électrons excédentaires.
- **Type P**, où l'on ajoute un matériau dont les atomes ont pratiquement tous une charge positive excédentaire. On utilise généralement le silicium avec le Bore. La présence simultanée d'ions fixes positifs et d'ions fixes négatifs, crée alors un champ électrique et les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront alors contribuer au courant de la cellule photovoltaïque.

### 1.3- Structure du silicium

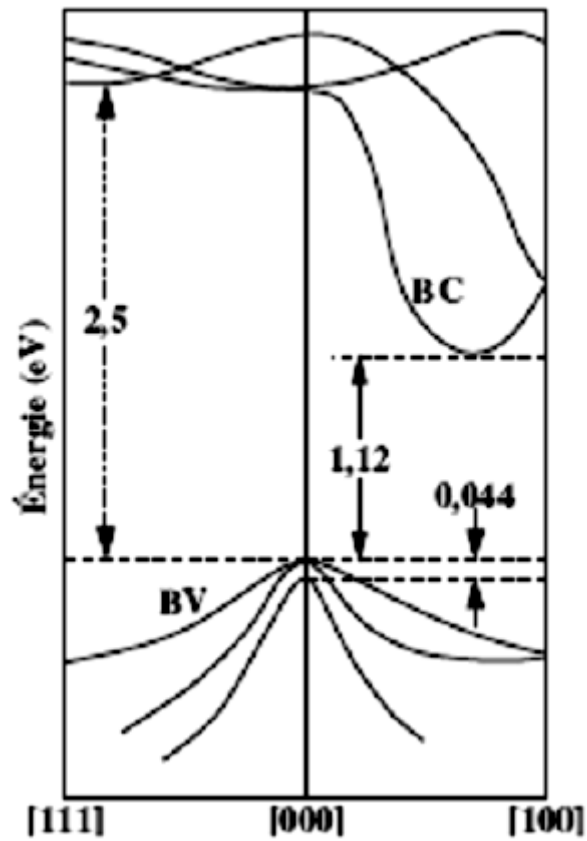
Le silicium est un élément chimique, de symbole Si et de numéro atomique 14 dans le tableau périodique des éléments (le tableau de Mendeleïev). C'est l'élément le plus abondant sur la Terre après l'oxygène (27,6%). Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de composés : de silice (dans le sable, le quartz, etc.) ou de silicates (dans les feldspaths, la kaolinite, etc.). Il appartient à la famille des semi-conducteurs, on le trouve sous plusieurs formes tel que :

#### 1.3.1- Le silicium monocristallin

Les atomes sont arrangés selon la structure diamant (figure 1), avec une masse atomique 28,09 g.mol<sup>-1</sup> et une distance interatomique  $d = 2,35\text{Å}$ . Chaque atome du réseau est entouré par quatre proches voisins équidistants, formant un tétraèdre, avec lequel il échange ses quatre électrons de valence. La liaison entre les plus proches voisins est de type  $sp^3$  (angle de liaison  $109^{\circ}28'$ ). La bande interdite, séparant la bande de valence de la bande de conduction est égale à  $E_g = 1,12\text{ eV}$  à température ambiante. Il correspond à un gap indirect puisque le minimum de la bande de conduction est repéré en un point autre que le maximum de la bande de valence dans la zone de Brillouin. La figure 2 représente la répartition des spectres d'énergie du silicium monocristallin et illustre le gap indirect.



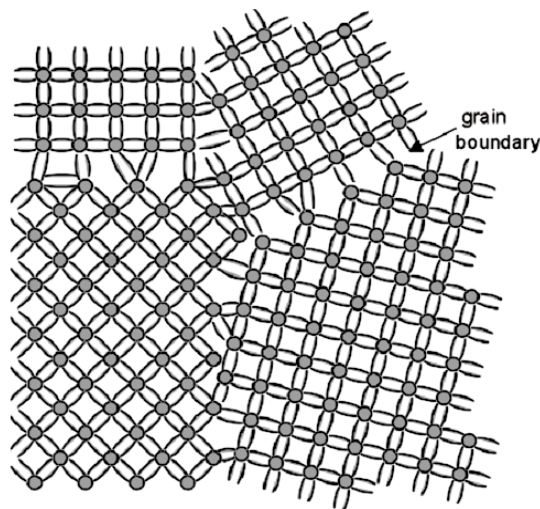
**Figure 1.2 :**Structure cristallographique du silicium monocristallin



**Figure 1.3 :** Structure de bandes du silicium monocristallin

### 1.3.2- Le silicium multi cristallin

Ile est moins performant que le silicium monocristallin, la figure 3 montre que le silicium multicristallin est constitué de la juxtaposition de plusieurs grains, différents par leur taille qui varient entre le millimètre et quelques centimètres et surtout par leur orientation cristallographique. Les monocristaux sont séparés les uns des autres par des zones perturbées appelée joint de grains [5].



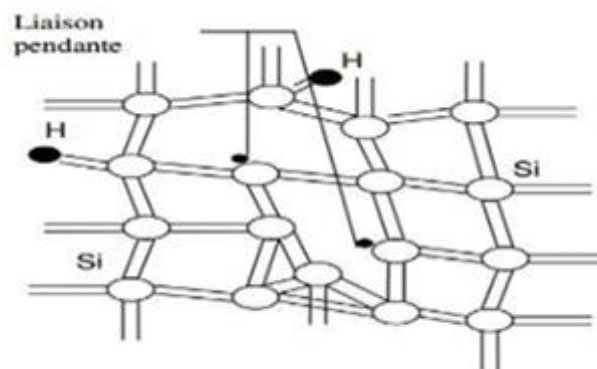
**Figure 1.4 :** Vue schématique de la structure du silicium



### 1.3.3- Silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure tétraédrique comme le cas du silicium cristallin, mais il présente des distorsions aléatoires. Les défauts sont également présents sous forme d'atomes de silicium qui ont seulement trois liens covalents avec des voisins. Le quatrième lien non satisfait s'appelle liaison pendante

La concentration des liaisons pendantes dans le silicium amorphe non hydrogéné est de l'ordre de  $10^{19}$  à  $10^{20} \text{cm}^{-3}$ . Ces liaisons pendantes créent des états électroniques dans la région centrale du gap qui rendent le matériau difficilement utilisable pour des applications électroniques. On trouve des atomes de silicium avec un électron célibataire d'où la liaison pendante qui peut constituer un piège à électron comme elle peut constituer un piège à trous



**Figure 1.5:**structure du silicium amorphe

### 1.4-L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par Antoine Becquerel en 1839 : il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium. Cet effet permet la conversion d'énergie solaire en énergie électrique.

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 principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). 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

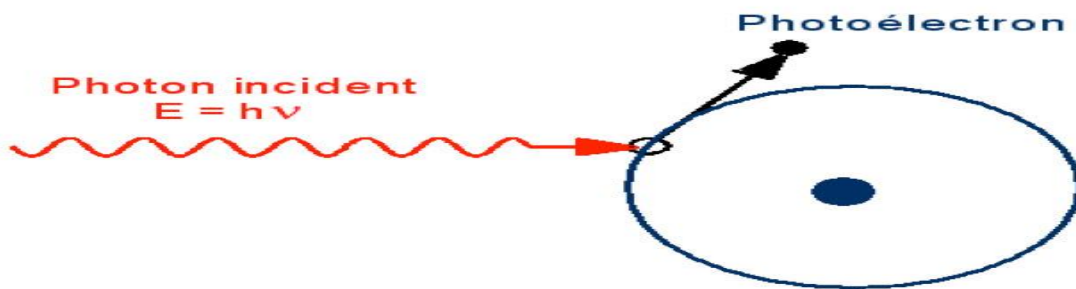


**Figure 1.2 :** Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont des dopants du silicium

L'effet photovoltaïque correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux côtés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse.

L'effet photovoltaïque repose sur trois principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée :

- ✓ Absorption du maximum possible du flux lumineux (photons).
- ✓ La conversion des photons ainsi absorbés en charges électriques libres
- ✓ La collecte de ces charges dans un circuit électrique extérieur



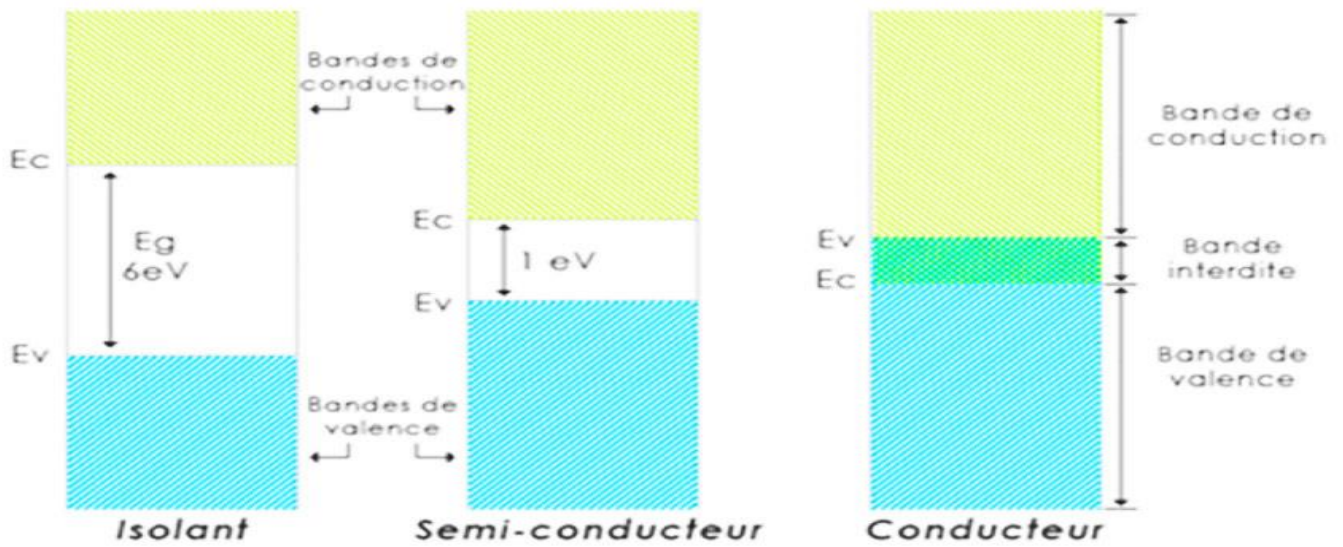
**Figure 1.3 :** Transfert d'énergie entre le photon et l'électron

Si cette interaction se produit, le photon cède la totalité de son quantum d'énergie à l'électron impliqué. C'est la mise en évidence de cet effet qui a permis à Einstein de montrer la quantification de l'énergie électromagnétique. Cette dernière ne peut donc pas être considérée seulement comme un phénomène vibratoire : on a en fait une dualité Onde/Particule à la fois pour les électrons et pour les photons. Cette mise en évidence a bouleversé la physique et est à l'origine de la découverte de la mécanique quantique.

Comprendre ces mécanismes fondamentaux est essentiel si on veut comprendre le fonctionnement de l'Énergie solaire et tout particulièrement l'Énergie photovoltaïque.

Dans les solides, en raison de la proximité des atomes et en raison de leur caractère ondulatoire, les électrons périphériques des atomes occupent des niveaux d'énergie discrets et quantifiés très proches les uns des autres. Ils ne dépendent plus seulement de l'atome dont ils sont issus, mais de l'ensemble des atomes du solide et de la position de ceux-ci les uns par rapport aux autres[5].

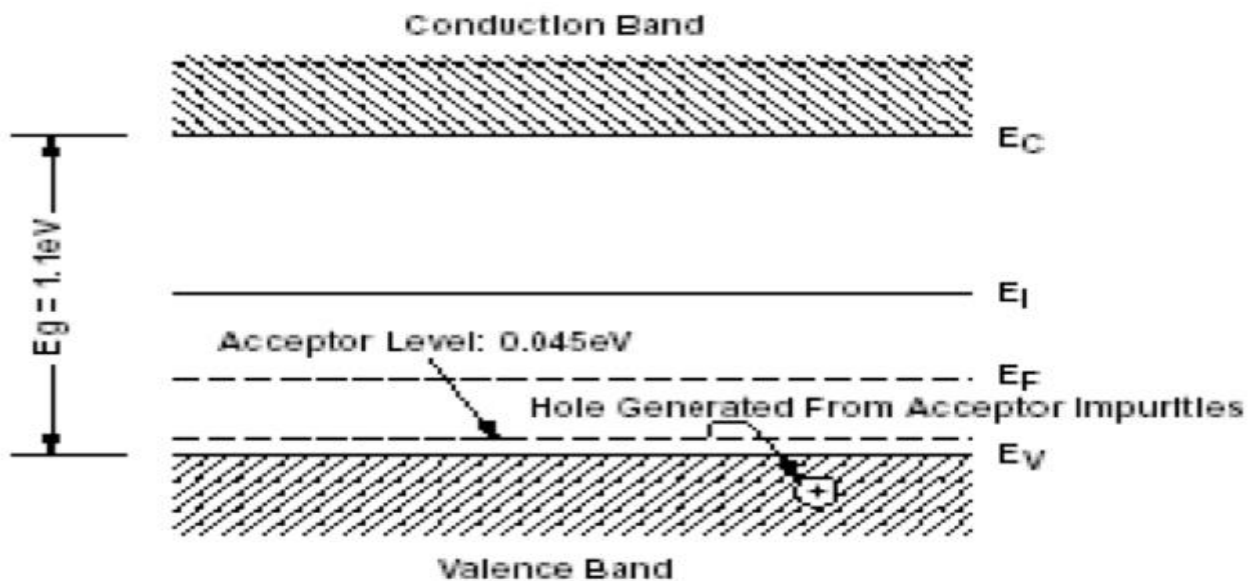
Cette multitude de niveaux énergétiques très proches les uns des autres sont ainsi créés dans de larges intervalles d'énergie, que l'on appelle des bandes électroniques alors que dans d'autres intervalles, il n'y a aucuns niveaux énergétiques disponibles.



**Figure 1.4 :** Schéma des bandes électroniques dans les différentes classes de matériaux (Isolants, Semi-conducteurs et conducteurs)

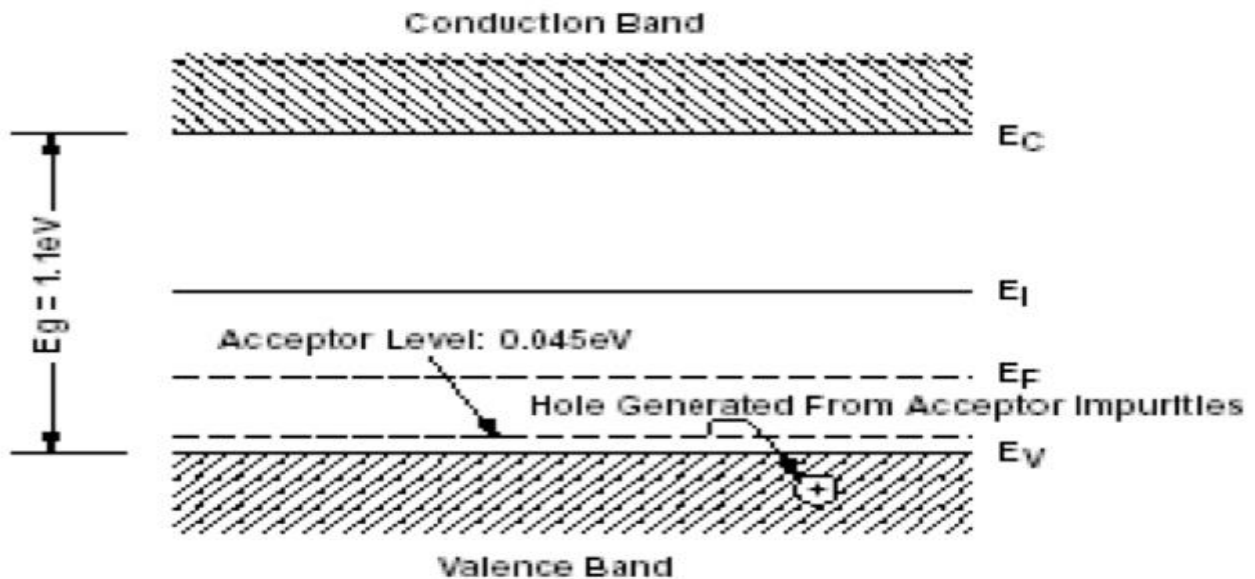
### 1.4-La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation de matériaux semi-conducteurs. Dans ces matériaux, à condition que l'énergie des photons soit suffisante, l'effet photoélectrique aura pour effet la photo-génération ou génération de paires Électron-Trou qui deviendront mobiles et pourront sous certaines conditions transmettre une partie de l'énergie électrique ainsi acquise à un circuit extérieur.



**Figure 1.5 :** Création de niveaux énergétiques proches de la bande de conduction (matériau de type n)

La condition pour cette génération est que l'énergie du photon  $E_n$  soit supérieure à  $E_g$ , la largeur de la bande interdite du matériau. Il faut bien comprendre ici que la création d'électrons libres ne suffit pas en lui-même à produire un photo-courant et l'émergence d'un générateur électrique. Pour que les électrons puissent circuler dans le circuit extérieur et céder l'énergie ainsi acquise, il faut aussi créer une asymétrie d'énergie potentielle pour que les électrons libres (et les trous) aillent majoritairement dans une direction plutôt qu'une autre et ne se déplacent pas de façon totalement aléatoire. Il s'agit ici de créer une force motrice pour ces charges.

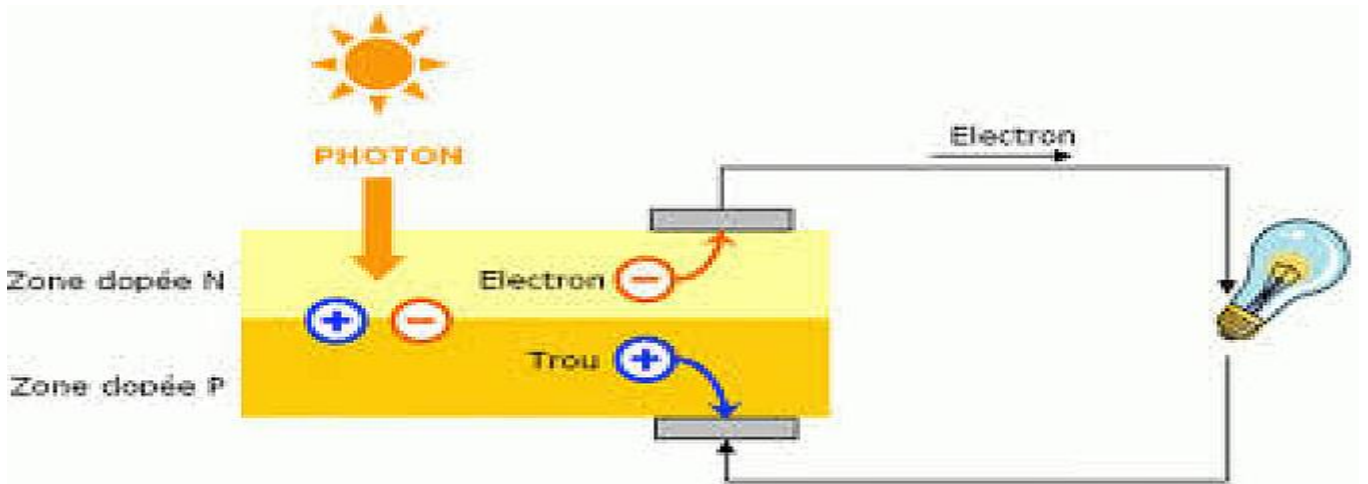


**Figure 1.6 :** Création de niveaux énergétiques proches de la bande de valence (matériau de type p)

Pour cela, on exploite la possibilité d'accoler deux matériaux semi-conducteurs pour lesquels le profil des énergies disponibles pour les électrons n'est pas identique de part et d'autre d'une frontière.

Ce type d'association est appelé une jonction (au sens électronique du terme).

Le moyen le plus simple et le plus courant pour créer une jonction est d'ajouter certaines impuretés dites dopantes dans ces matériaux (Figures 14a et 14b). Ces impuretés, en créant des niveaux énergétiques dans la Bande interdite à proximité soit de la Bande valence soit de la Bande de conduction, déplacent le profil énergétique de la population des électrons à l'équilibre. Si les impuretés dites ajoutées créent des niveaux énergétiques proches de la bande de conduction dits donneurs, on parle de matériau de type n. Si les impuretés créent des niveaux énergétiques proches de la Bande de valence dits accepteurs, on parle de matériau de type p.

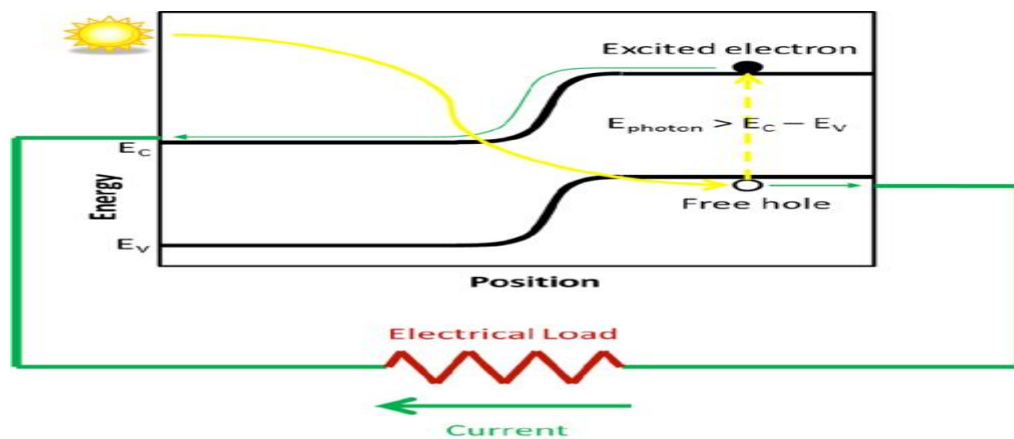


**Figure 1.7 :** Schéma de principe d'un capteur photovoltaïque, la photo-génération de paires Electron-Trou

Il suffira donc d'ajouter ces deux types d'impuretés de façon adéquate de part et d'autre de la jonction, en se débrouillant pour que l'on ait une majorité d'un type d'impuretés d'un côté et une majorité de l'autre type de l'autre côté. On parle alors de jonction p/n ou de jonction n/p.

Lorsqu'on ajoute des électrodes de part et d'autre de ce dispositif, on crée une diode, dispositif utilisé en électronique comme redresseur de courant car il laisse passer le courant si on la polarise électriquement dans un sens et le bloque si on la polarise dans l'autre.

Un capteur photovoltaïque est donc, par construction, une diode dans laquelle on préservera la possibilité à un maximum de photons de pénétrer



**Figure 1.8 :** Profil d'énergie dans un capteur photovoltaïque

### 1.4.1- L'absorption de la lumière

Les photons sont des éléments capables de traverser la lumière et de la pénétrer. Plus généralement un rayon lumineux qui arrive sur un objet peut subir trois évènements optiques :

**La réflexion :** la lumière est renvoyée par la surface.

**La transmission** : la lumière traverse le matériau.

**L'absorption** : la lumière pénètre dans le matériau et n'en ressort pas, l'énergie est alors restituée sous une autre forme (chaleur)

$$I \text{ (flux incident)} = R \text{ (réfléchi)} + T \text{ (transmit)} + A \text{ (absorbe)}$$

#### 1.4.2- Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons

Ce sont les électrons des couches électroniques périphériques qui vont absorber l'énergie des photons, ce qui les libère de l'attraction électrostatique (et gravitationnelle) du noyau de l'atome. Chaque électron libéré laisse derrière lui un trou. Chaque trou créé est comblé par l'électron de l'atome voisin et ainsi de suite.

Pour qu'un électron quitte la bande de valence vers la bande de conduction, il doit avoir une **énergie**  $\geq E_g$ , cette énergie est  $E = \frac{h\nu}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \text{ eV}$  Pour l'énergie, on utilise souvent l'électron volt :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

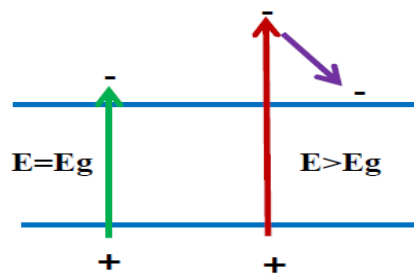
D'où l'énergie transportée par un photon est donnée par la loi de Planck :  $E = h\nu$

$\nu$ : fréquence de l'onde électromagnétique du photon en hertz

$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  constante de Planck

E : énergie en joule J

Si  $E > E_g$ , le photon génère une paire é-trou à un niveau supérieur et l'excédent d'énergie est perdu par le processus de désexcitation spontanée qui produit de la chaleur



#### 1.4.3- La collecte des charges

Le déplacement d'électrons, créé par l'énergie des photons, est synonyme de production d'électricité. Une tension se crée alors en présence de lumière. Il est important de noter que la tension est presque constante tandis que l'intensité varie proportionnellement à la quantité de lumière reçue

## **Chapitre 2**

### **LES CELLULES SOLAIRES**

## 2.1- Définition

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs, capables de convertir directement la lumière en électricité.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV).

Aujourd'hui, les laboratoires de recherche et les industries travaillent en collaboration pour développer de nouveaux concepts ou de nouveaux procédés susceptibles d'améliorer les performances électriques et de réduire les coûts des cellules solaires. C'est ainsi que les modules photovoltaïques modernes, composés de cellules interconnectées, ont largement prouvé leur efficacité et leur haute fiabilité. De plus, leur champ d'application ne cesse de s'élargir, du pompage à l'éclairage, en passant par toutes les applications électroniques de poche.

Les cellules photovoltaïques sont des composantes électroniques qui transforment les rayons lumineux du soleil en électricité. Ces cellules ont des puissances unitaires assez faibles (de l'ordre de 1 W).



Figure 2.1 : Cellule solaire

## 2.2- Structure de la cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche

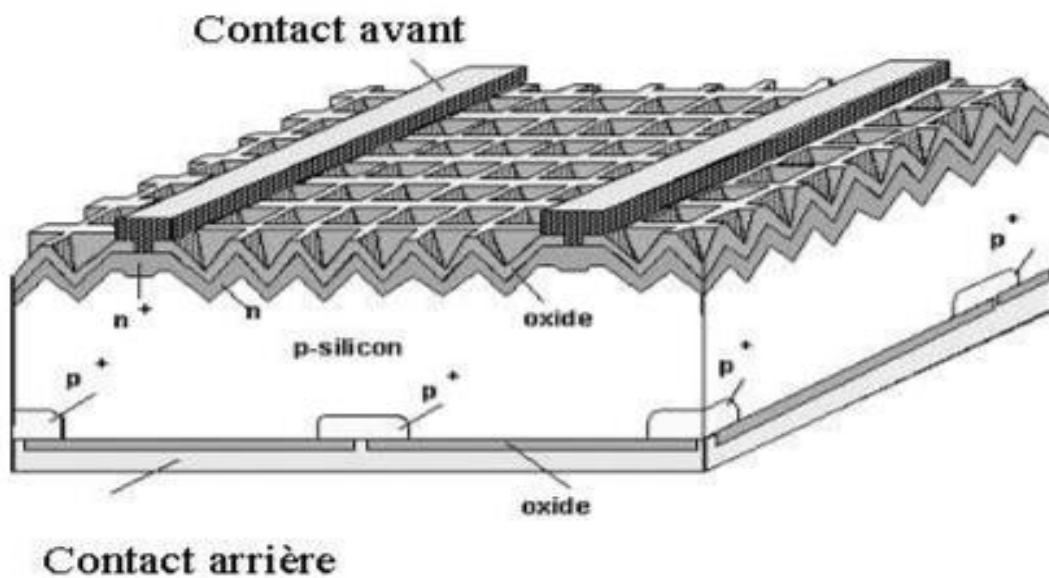


semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle-) en dessous la couche semi-conductrice P.

Aussi le matériau semi-conducteur est réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante.

### 2.2.1- En laboratoire

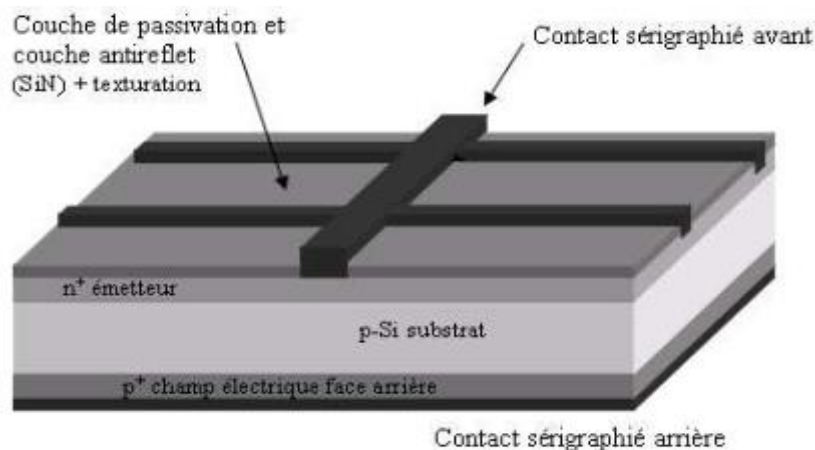
La structure de la cellule photovoltaïque en silicium monocristallin est présentée sur la figure 4.2. Cette cellule a été élaborée avec des procédés de la microélectronique en utilisant la technologie PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused).



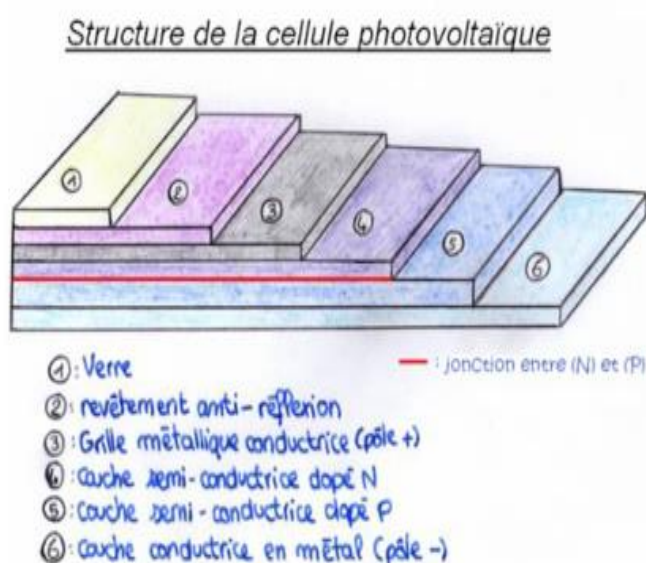
**Figure 2.2:** Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin.

### 2.2.2 - En industrie

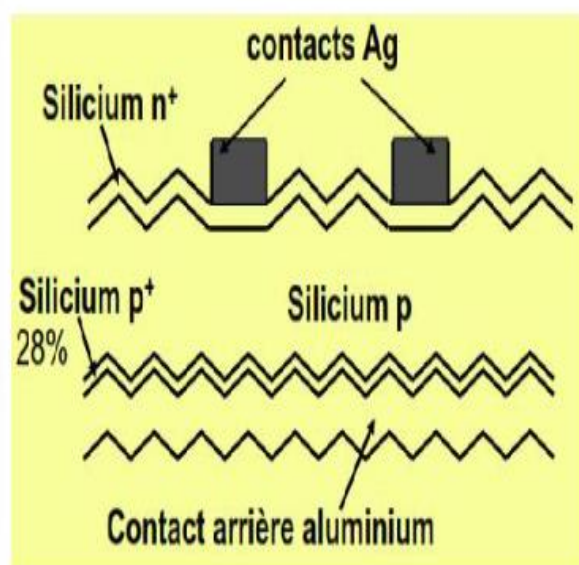
La plupart des cellules photovoltaïques en silicium massif industrialisées ont la structure présentée sur la figure I-10. La structure de la cellule PV industrielle est simplifiée afin de réduire son coût. Par exemple, la texturation de la face avant est réalisée sous forme de «pyramides aléatoires» ou texturation acide et on dépose ensuite une simple couche anti-réfléchissante en SiN. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Al déposée par sérigraphie.



**Figure 2.3:** Structure d'une cellule industrielle en silicium cristallin.



Structure de la cellule solaire



Cellule solaire classique en Si

**Figure 2.4 :** Structure de la cellule photovoltaïque

### 2.3 - Fonctionnement d'une cellule solaire

La conversion photovoltaïque met simultanément en jeu trois phénomènes physiques :

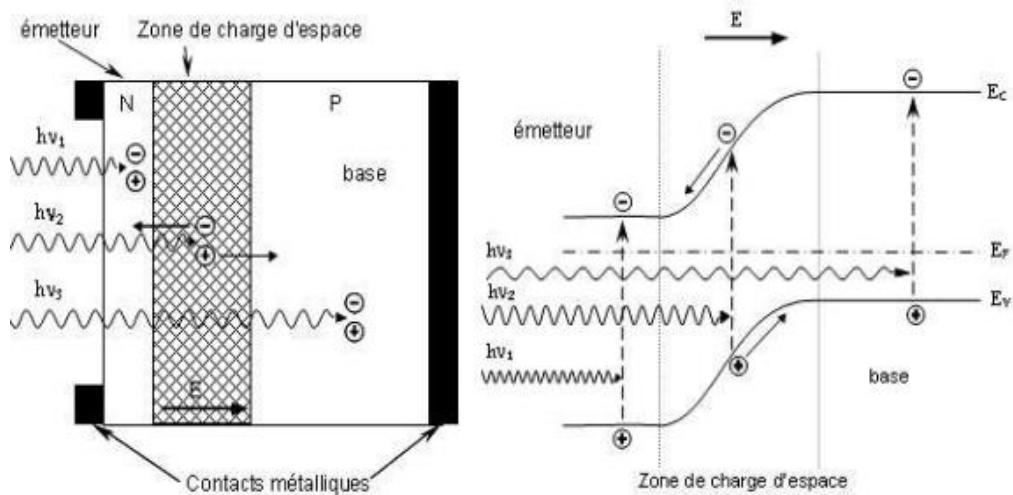
- l'absorption de la lumière dans le matériau,
- le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- la collecte des charges.

La cellule solaire est notamment composée d'un semi-conducteur de silicium. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres (électrons) est très faible par rapport aux métaux. Pour produire du courant à partir d'un semi-conducteur, il faut arracher un électron à son atome (bande de valence), et pour cela il faut une énergie, ici la lumière, lui permettant d'atteindre les niveaux

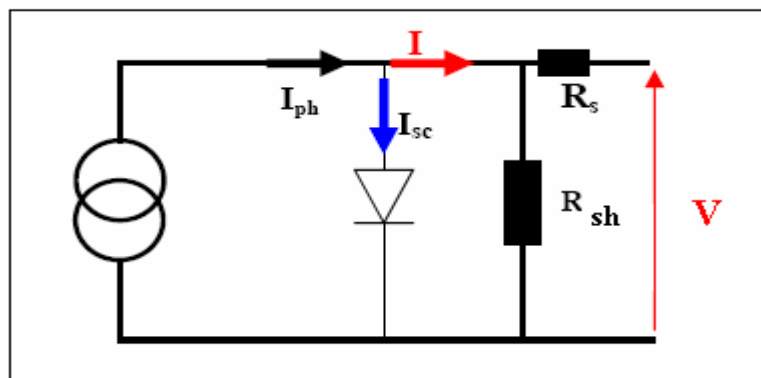
énergétiques supérieurs (bande de conduction). Cette énergie est appelée énergie de la bande interdite (gap) et est mesurée en électrons-volts (eV). L'énergie nécessaire à la séparation de l'électron à son atome varie en fonction du semi-conducteur: Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin, et 1,7 eV pour le silicium amorphe.

Cependant, tous les rayons lumineux ne sont pas utilisés par la cellule: certains rayons lumineux sont déviés, soit par la couche antireflet, soit parce que leur énergie n'est pas suffisante pour arracher un électron, et d'autres passeront tout simplement à travers de la cellule [78].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 4.3



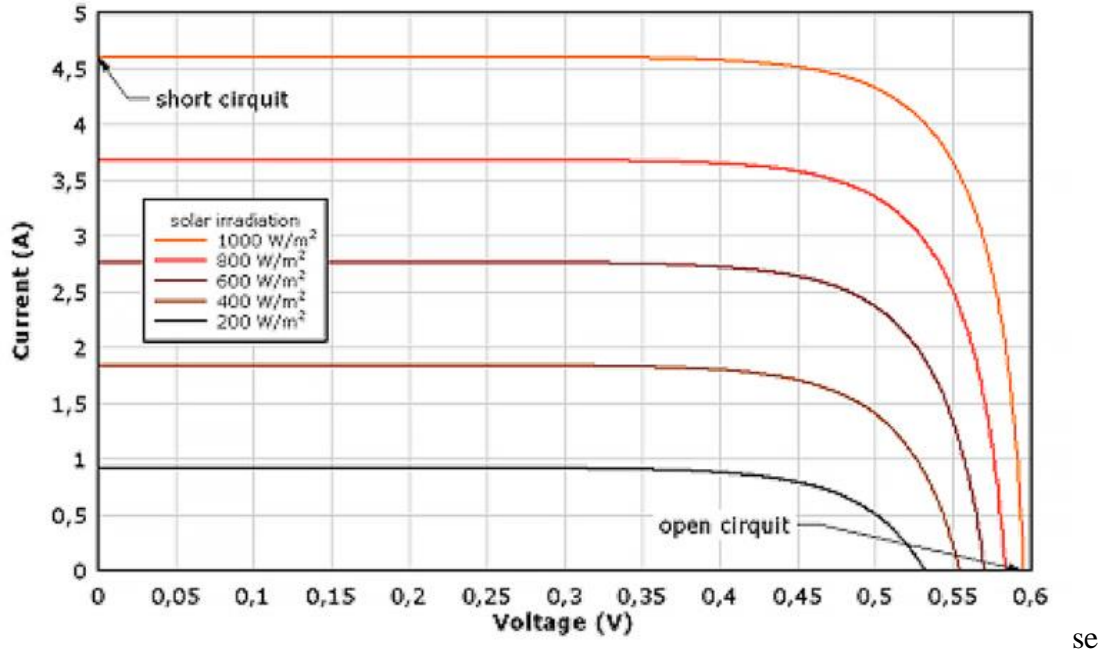
**Figure 2.5:** Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.



**Figure 2.6 :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

## 2.4 - Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La représentation la plus commune d'une cellule solaire au silicium, due à Schokley [79], est un circuit électrique (Fig. 4.5), composant d'un générateur de courant  $I_{ph}$ , d'une diode, d'une résistance en série  $R_s$  et d'une résistance parallèle  $R_{sh}$ .



**Figure 2.7 :** Caractéristique  $I=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque

Sa caractéristique  $I(V)$  peut être décrite par une relation mathématique plus ou moins compliquée, cette complexité est en fonction des phénomènes à décrire, ayant lieu dans la cellule.

Le courant délivré par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit:

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad (4.1)$$

où

$I_{ph}$  est la densité de courant photogénéré et  $I_{obs}$  est la densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (4.4) peut être écrite sous la forme suivante:

$$I = I_{ph} - I_s [\exp(qV / KT) - 1] \quad (4.2)$$

avec :

$I_s$  est le courant de saturation de la diode,  $q$  est la charge élémentaire,  $k$  est la constante de Boltzmann et  $T$  est la température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La

caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairage, la caractéristique a l'allure présentée sur la figure 4.6.

A partir de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

$I_{cc}$  : courant de court-circuit (obtenu pour  $V=0$ ),

$V_{co}$  : tension en circuit ouvert (obtenu pour  $I=0$ ),

$I_m$  : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque,

$V_m$  : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

## 2.5 - Le rendement (performance) d'une cellule solaire

La caractéristique la plus importante est le rendement énergétique qui est défini par le rapport de la puissance électrique maximum fournie, à la puissance du rayonnement incident que reçoit la photopile. Il donne un facteur de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{G \cdot S} \quad (4.3)$$

La performance d'une cellule solaire se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité.

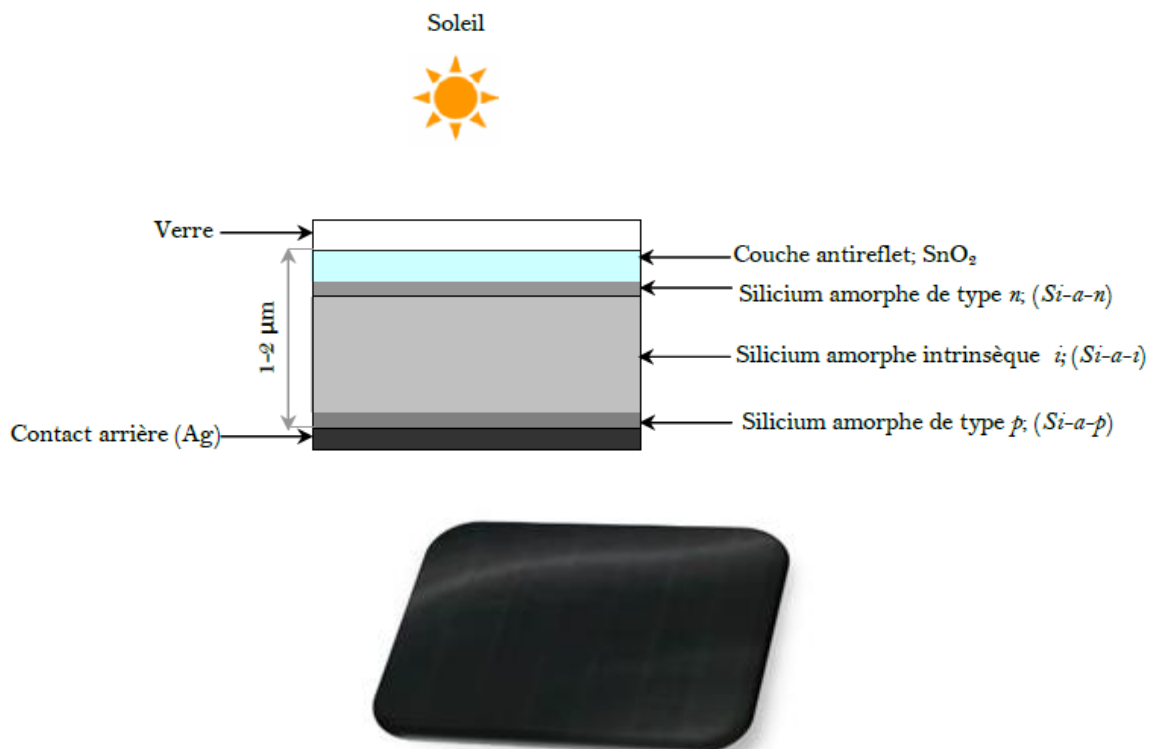
$$\eta(\text{rendement}) = \frac{\text{la puissance produite}}{\text{la puissance du rayonnement capté}}$$

Il dépend essentiellement de la puissance maximale du panneau solaire, de l'intensité de l'ensoleillement, du nombre d'heures d'exposition, de l'angle d'incidence des rayons sur le panneau et de la température. La température extérieure influence le rendement du panneau d'environ 15% ; plus il fait froid et mieux on pourra produire. Le paramètre qui joue le plus est l'angle d'incidence des rayons lumineux : ils doivent arriver perpendiculairement au panneau. Les cellules solaires les plus répandues dans le commerce ont un rendement de 15%.

## 2.6 - Cellules au silicium amorphe

Le silicium amorphe (a-Si) est un matériau possède un gap de 1,7 eV et un coefficient d'absorption plus élevé que celui du Si monocristallin et polycristallin. Ses atomes sont désordonnés et ne sont pas rangés de façon régulière définissant une structure cristalline, les liaisons chimiques entre un atome Si et ses plus proches voisins satisfont la configuration tétraédrique caractéristique de l'hybridation où chaque atome est lié à ses quatre voisins par une liaison covalente Si-Si.

Figure présente schéma d'une cellule solaire à base de silicium amorphe il est composé d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est déposée une fine couche de silicium



**Figure 14:** Cellule au silicium amorphe

### Avantages :

- ✓ (couvert)
- ✓

Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps

Un peu moins chère que les autres technologies

### Inconvénients :

- ✓
- ✓

Rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%

Performances qui diminuent avec le temps (environ 7%).

## 2.7 - Le module PV

Les cellules ne développent qu'une puissance relativement faible (de l'ordre de 3 W) et sont extrêmement fragiles et sensibles aux éléments extérieurs (corrosion). Pour utiliser l'énergie PV à grande échelle, les cellules sont connectées entre elles en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant. Elles sont ensuite encapsulées entre une feuille de verre et une feuille de Tedlar (Polyvinyl fluoride (PVF)) à l'aide d'un polymère (éthylènevinylacétate EVA) et prise en sandwich entre deux supports et éloignés de 1cm du bord

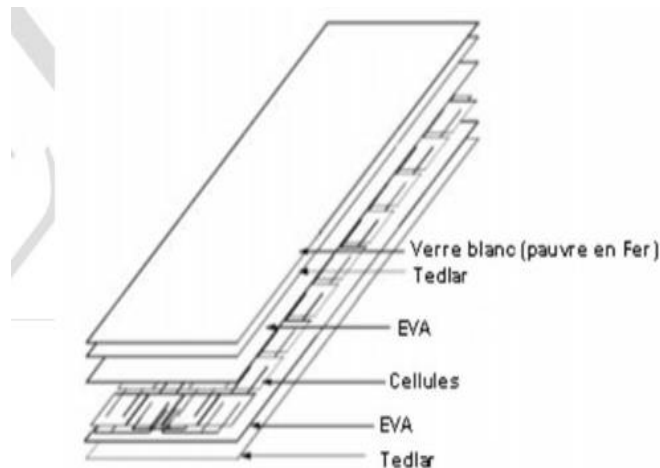
En face avant, en mit du verre trempé, résistant, transparent et de haute transmission de 3 à 4mm d'épaisseur.

En face arrière, si c'est pour des applications architecturales en mit du verre, si non (économie et efficacité) en mit des films en plastique (contre l'humidité).

On ajoute un cadre de fixation avec une sortie électrique (boîte de jonction) pour connecter le panneau .

Les modules les plus courants mesurent 1580 x 808 mm et contiennent 72 cellules pour une puissance de 200 Wc. Il existe des modules de tailles différentes allant de 1 cellule (100 mm x100mm) jusqu'à des modèles pour intégration en façade de 2631 x 1645 (117 kg pour 580Wc). Actuellement, des modules de 300 Wc et plus se développent sur le marché.

Les cellules d'un module typique sont séparées en plusieurs segments d'environ 18cellules qui sont protégées par des diodes. Si une de ces cellules venait à être ombragée, la diode se déclencherait de manière à protéger les cellules de cette partie de module



**Figure 11 :**Composition d'un module photovoltaïque au silicium

7

## **Chapitre 3**

### **DIFFERENTES TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES**



### **3.1-Introduction**

On utilise actuellement du silicium pour la fabrication des cellules photovoltaïques car c'est le second élément le plus courant sur terre et son obtention est donc peu chère. En plus du silicium, d'autres éléments, comme le cuivre, le gallium ou le cadmium, sont utilisés en photovoltaïque. On distingue généralement plusieurs technologies à couche sépaisses, à couches minces et organiques.

### **3.2-Les différents types de cellules solaires**

Il existe différents types de cellules solaires, et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle:

#### **3.2.1- Les cellules monocristallines:**

La réalisation de nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier la fabrication de puces microélectroniques nécessite des substrats monocristallins semi-conducteurs [82,83], par exemple du silicium, du germanium ou de l'arséniure de gallium. Dans le cas du Silicium, la fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) sont les deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté longs de plusieurs mètres et d'un diamètre allant jusqu'à 300mm. On a des rendements photovoltaïques élevés supérieurs à 15 %.

**3.2.2-Les cellules polycristallines:** Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important. On peut réaliser d'un seul coup un lingot de grandes dimensions par refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion. Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins de 13% dans le commerce, mais sa fabrication est plus facile. Ces lingots de silicium multicristallin doivent être eux aussi coupés en tranches de 200 à 400 mm, grâce cette fois-ci à une scie à fil.

**3.2.3- Les cellules amorphes:** Elles ont un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin.

Une couche mince de 0,3 mm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible. Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur une plaque de verre à partir du gaz silane

SiH<sub>4</sub>. En fait, les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide, puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence; le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène est également nécessaire pour la qualité du matériau. L'adjonction des dopants est réalisée par ajout de gaz 3 PH ou 26 BH au silane Avec ce type de matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium.

Le tableau 4.1 représente les rendements et le domaine d'application pour des différents types de cellules solaires.

Types de silicium	Rendement En laboratoire	Rendement commercial	Domaine d'application
Silicium monocristallin	24.7%	14.0-16.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, pour appareils de faibles puissances pour l'espace (satellites)
Silicium polycristallin	19.8%	12.0-14.0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades ; pour générateurs de toutes tailles
Silicium amorphe	13.0%	6.0-8.0%	Modules de grandes dimensions pour intégration dans les bâtiments, pour appareils de faibles puissances

**Tableau 4.1 :** Rendement des différents types de cellules solaires.

Ainsi notre recherche de la performance maximale, nous a amenés à nous procurer des cellules monocristallines, qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation.

### **3.3- Générations des filières technologiques**

Aujourd'hui, il existe trois principales filières technologiques : Le Silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques :

#### **3.3.1-1<sup>ère</sup> génération: Silicium cristallin (mono et poly)**

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Cette génération est caractérisée par des efficacités de conversion allant de 12% à 14% (polycristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), au niveau des modules commerciaux les plus largement utilisés.

#### **3.3.2-2<sup>ème</sup> génération : CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin**

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced

Chemical Vapour Deposition) ou l'épitanie par jet moléculaire (molecular beam epitaxy) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération

Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

- ✚ CdTe : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)
- ✚ CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide
- ✚ -Silicium en couche mince : silicium amorphe  $\alpha$ Si et microcristallin

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion allant de 6% ( $\alpha$ Si) à 5 à 11% (CdTe).

D'autres types de cellules à couches minces très rares dans le commerce ou encore au stade de la recherche :

Les cellules à l'arséniure de gallium utilisées essentiellement dans les applications spatiales

Les cellules multicouches, multijonctions, hybrides ou tandem qui superposent plusieurs couches minces afin d'exploiter différentes longueurs d'onde de la lumière et d'offrir des rendements plus élevés (dépassant parfois 40% en laboratoire)

### 3.3.3-3<sup>ème</sup> génération : Cellules organiques

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types:

- ✚ Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires
- ✚ Les cellules photovoltaïques organiques en polymères

Les cellules solaires organiques créées à partir de matériaux de synthèse, donc moins chères et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication, mais qui offrent encore des rendements et une durée de vie trop faibles.

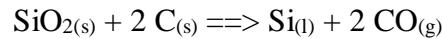
Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans)

## **Chapitre 4**

### **TECHNOLOGIES DE FABRICATION**

## 4.1- Élaboration du silicium

Le silicium est obtenu à partir de minerai de quartz ou de silice ( $\text{SiO}_2$ ) qui est un constituant de base des roches primaires, la majorité des roches étant en effet des silicates. Son extraction s'effectue par carbo-réduction, réaction à haute température entre le quartz et le carbone :



Ce, couramment à l'aide de charbon de bois (charcoal) plus pur que la houille (hardcoal).

Les températures pour cette réaction sont proches de  $2000^\circ\text{C}$ . Le chauffage s'effectue en utilisant des barres de carbone servant de résistances dans lesquels on injecte de très forts courants électriques : en réalité, elles sont un consommable car elles participent à la réaction. On repasse au silicium en décomposant la molécule par activation thermique dans des fours (dépôt chimique en phase vapeur).

On obtient le silicium de grade métallurgique (MG-Si) par la réduction de la silice avec le carbone (C) dans un four à arc électrique. Le creuset du four est rempli de la silice et du carbone puis est porté à une température élevée d'environ  $1800^\circ\text{C}$ . La réaction globale de cette réduction est donnée par  $\text{SiO}_2(\text{solide}) + 2\text{C}(\text{solide}) \rightarrow \text{Si}(\text{liquide}) + 2\text{CO}(\text{gas})$

Le silicium en fusion est rempli dans des poches puis séparé du laitier avant d'être coulé dans des lingotières. Le silicium ainsi obtenu présentera une pureté typique de 98.5 %. Les impuretés présentes proviennent soit des intermédiaires de réaction comme le SiC (solide) et  $\text{SiO}_2$  (solide), soit des impuretés contenues dans la matière première (métalliques, carbone, bore et phosphore)

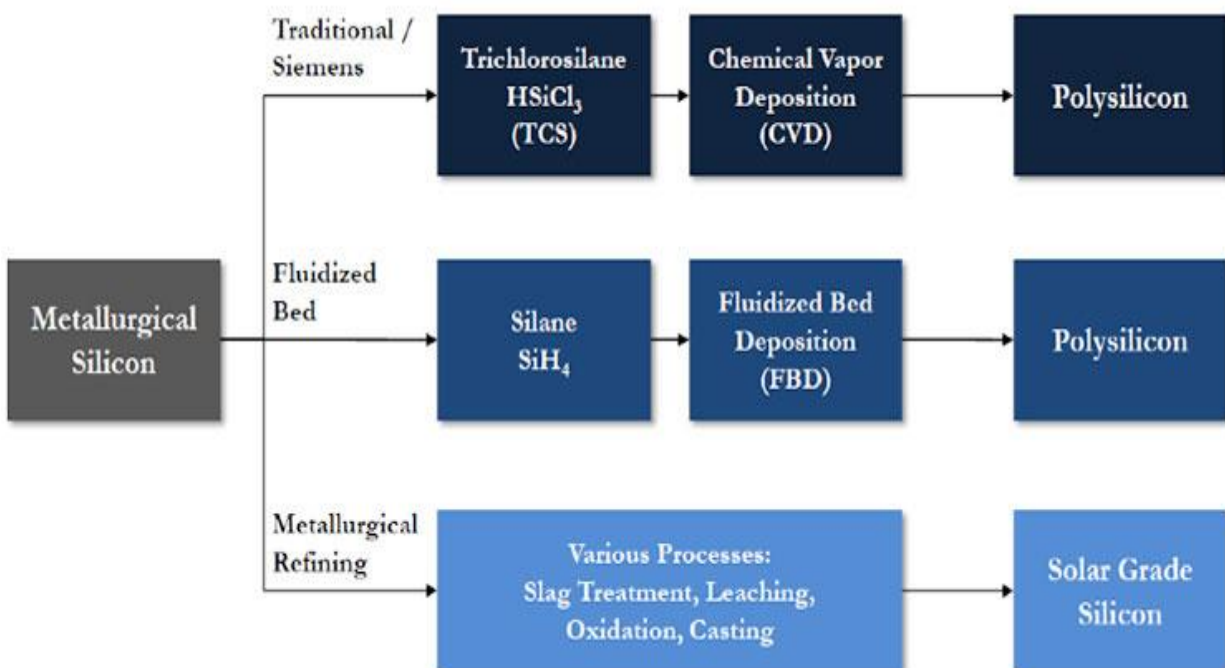
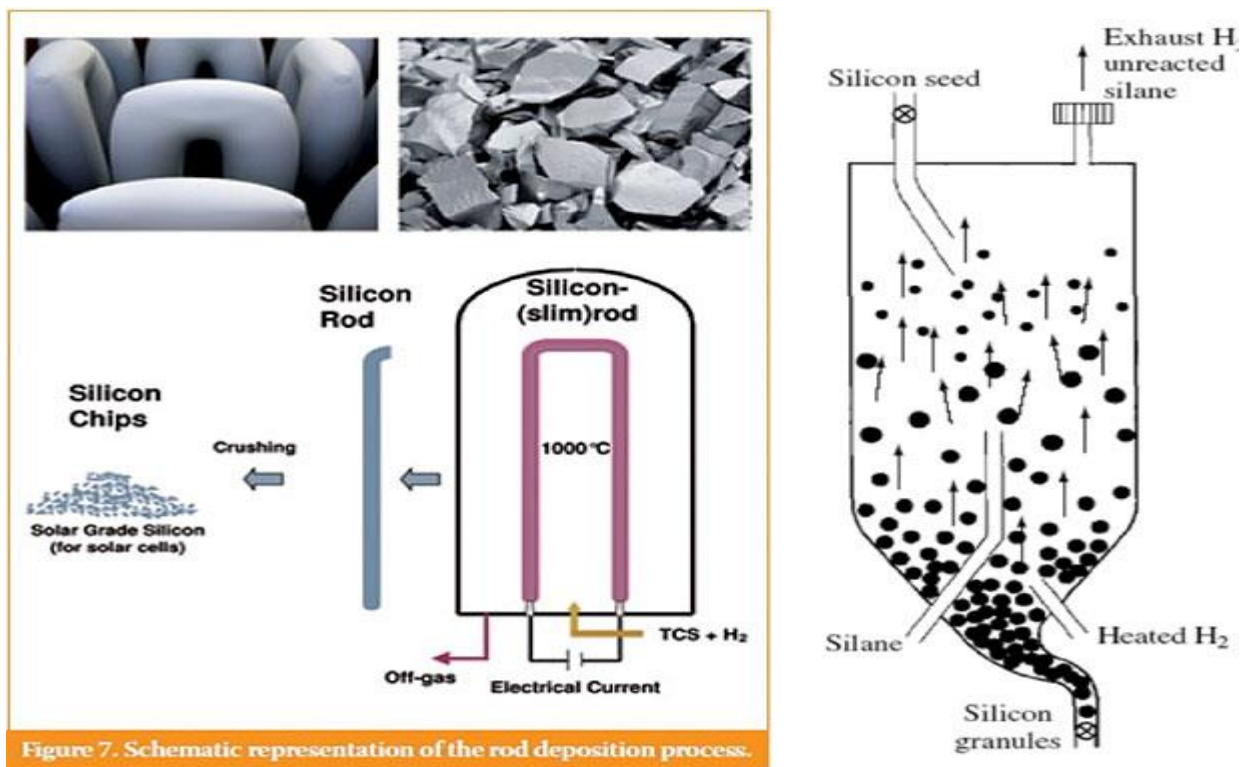


Figure 4.1 : Schéma des méthodes de purification du silicium

Le silicium liquide ainsi obtenu s'écoule du four, et, en se refroidissant, il cristallise. À ce stade, il contient environ 1% d'impuretés. S'il est utilisé tel quel et en grande masse dans l'industrie des polymères (silicone) et celle de la métallurgie (additif de l'aluminium des moteurs automobile), il est beaucoup trop impur pour l'industrie microélectronique ou pour le photovoltaïque (Figure 2). Il est donc ensuite purifié essentiellement à l'aide de trois méthodes dont les deux premières consistent à obtenir un gaz (Tri-Chloro-Silane ou TCS :  $\text{SiHCl}_3$  ou Silane :  $\text{SiH}_4$ ). Pour ce faire, on fait réagir le silicium solide avec le chlore ( $\text{Cl}_2$ ) ou l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ).



**Figure 4.2 :** Purification du silicium en phase gazeuse

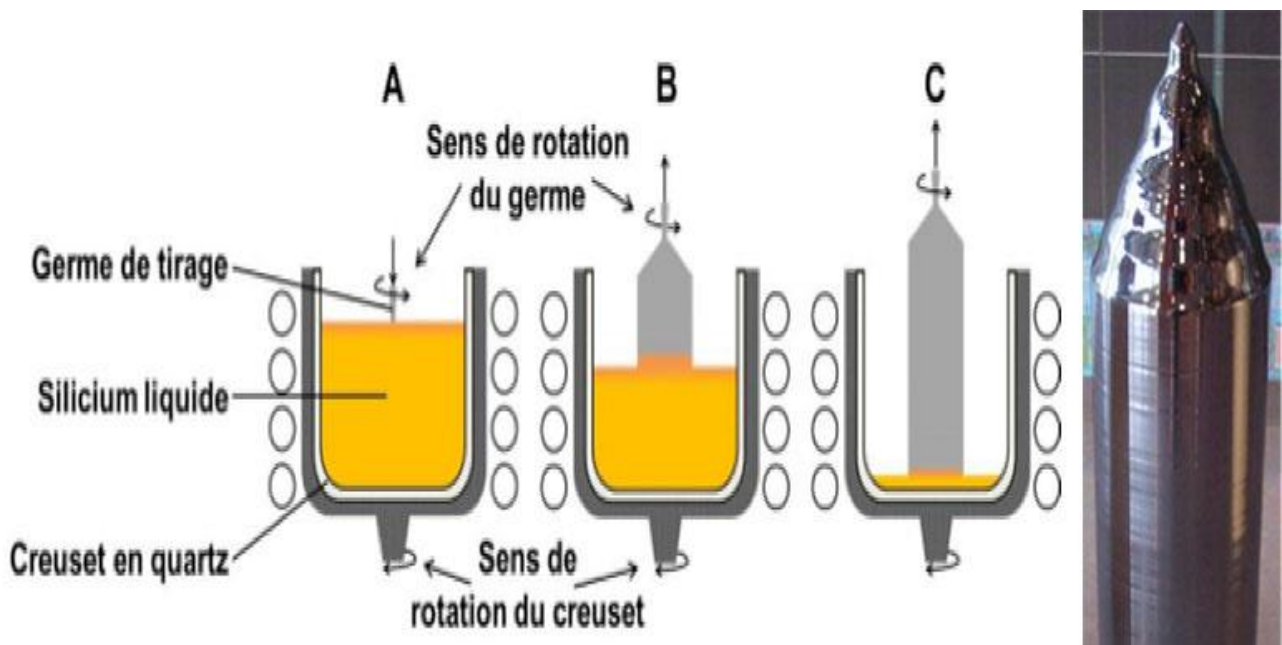
Pour le chlorosilane  $\text{SiHCl}_3$ , on utilise des fours résistifs en chauffant des barreaux de silicium sur lesquels le silicium se dépose (procédé Siemens), procédé le plus courant. Pour le silane  $\text{SiH}_4$ , on utilise des fours en lits fluidisés, le silicium se condensant et formant des poudres dans le flux de gaz que l'on récupère en sortie (Figure 3).

Une dernière méthode de purification peu utilisée consiste à garder le silicium en phase solide ou liquide et à procéder à divers traitements soit chimiques soit de fusion/cristallisation : on utilise alors l'effet de ségrégation des impuretés entre les deux phases lors de la cristallisation. Ces procédés de purification sont dits métallurgiques.

Mais le Silicium ainsi obtenu, s'il est très pur, avec des taux d'impuretés approchant la partie par milliard -ppb ( $10^{-9}$ ) n'est pas encore apte pour faire une bonne cellule, car comme nous l'avons vu dans l'article sur les principes, il doit avoir une structure cristalline (arrangement des atomes) proche de celle des monocristaux.

L'étape suivante consiste donc à le fondre et à le cristalliser à nouveau dans des conditions particulières. Pour le photovoltaïque, on utilise essentiellement deux méthodes.

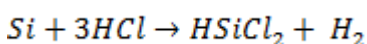
- Le tirage de monocristaux, par le méthode de Czochralski, consiste à fondre le silicium dans un creuset en silice, puis à tremper un germe monocristallin en rotation dans le bain et enfin, par une maîtrise des gradients de température dans la bain et du déplacement du germe vers le haut, à progressivement faire cristalliser le silicium à partir du germe en veillant à augmenter le diamètre du cristal. La rotation du germe et du creuset permet d'obtenir à la fin un barreau cylindrique et long parfaitement monocristallin et sans dislocations avec un diamètre de l'ordre de 20 cm et une longueur de plusieurs mètres (Figure 4).



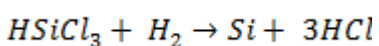
**Figure 4.3 :** La croissance de mono-cristaux de silicium par la méthode de Czochralski

#### 4.2- Elaboration du silicium polycristallin (Silicium électronique)

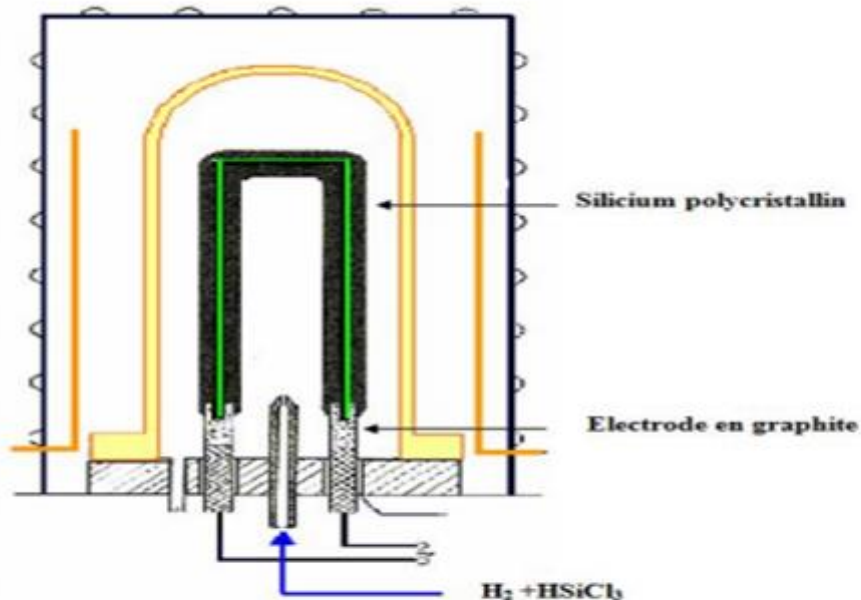
La méthode la plus fréquemment utilisée pour diminuer les impuretés dans le silicium est le procédé SIEMENS. Cette voie de purification est dite chimique (opposée à la voie métallurgique). Elle consiste à la réduction de trichlorosilane ( $\text{HSiCl}_3 = \text{TCS}$ ). Le TCS est formé à partir d'une réaction d'hydrochloration entre le MG-Si et de l'acide Chlorhydrique (HCl) à des températures comprises entre 300-350°C :



Ensuite, le  $\text{HSiCl}_3$  est purifié par distillation, puis réduit par l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ) à 1000-1100°C.



Le silicium est alors obtenu sous une forme polycristalline et il est prêt à être utilisé pour la cristallisation des lingots



**Figure 4.4 :** Réacteur (siemens)

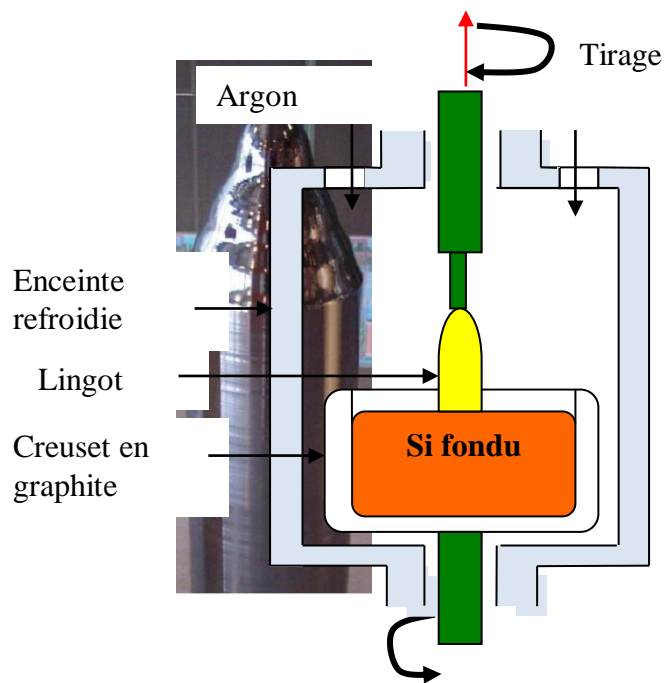
### 3.3.2-Elaboration du silicium monocristallin

Plusieurs techniques sont utilisées pour cristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, le procédé « **Czochralski** » (Cz) qui produisent du silicium monocristallin

### 4.3- Le procédé « Czochralski » (Cz)

Le principe de la méthode est de faire fondre le silicium polycristallin dans un four d'étirage sous argon à 1450°C. Un germe monocristallin est amené au contact du silicium fondu puis tiré lentement (de 0,4 à 3 mm/min). Lors de la croissance du cylindre de silicium, le creuset contenant le silicium liquide et le cylindre sont animés d'un lent mouvement de rotation en sens inverse. On obtient alors un lingot cylindrique de 60 à 100 kg pour environ 2 m de longueur dans le cas de disques (wafers) de 200 mm. Depuis 1998, la production s'est étendue à des diamètres de 300 mm. Un des principaux fondeurs de microprocesseurs annonce la transition vers des wafers de 450 mm de diamètre pour 2012.





**Figure 4.5** : La méthode de Czochralski (Lingot du silicium)

#### 4.4- Silicium monocristallin

La réalisation de panneaux solaires commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier, dans le cas du Silicium, la fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) sont les deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté longs de plusieurs mètres et d'un diamètre allant jusqu'à 300mm. Le silicium monocristallin comporte peu de défauts et permet d'obtenir les meilleurs rendements (supérieurs à 15 %). Cependant, son élaboration est très coûteuse, ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications photovoltaïques



**Figure 4.6** : Cellule au silicium monocristallin

#### Avantages :

- ✓ Bon rendement
- ✓ Permet un gain de place si nécessaire
- ✓ Nombre de fabricants élevé

**Inconvénients :**

- ✓ Coût élevé
- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement.
- ✓ Sensible à la haute température.

**4.5- Silicium multicristallin (Polycristallin)**

Afin de réduire les coûts de production, le silicium multicristallin, moins onéreux que le silicium monocristallin, a été introduit dans l'industrie photovoltaïque à partir des années 70. Il se présente une nouvelle fois sous forme de lingots de silicium, ce dernier étant constitué de grains d'une taille variant entre millimètre et quelques centimètres.

Les techniques de production du silicium multicristallin sont beaucoup plus simples que celle de monocristallin donc bien moins onéreuses à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité du matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs.



**Figure 4.7 :** Cellule au silicium polycristallin

**Avantages :**

- ✓ Bon rendement de conversion, environ 100 w/m<sup>2</sup>, mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin.
- ✓ -Lingot cout de production moindre que le monocristallin

**Inconvénient :**

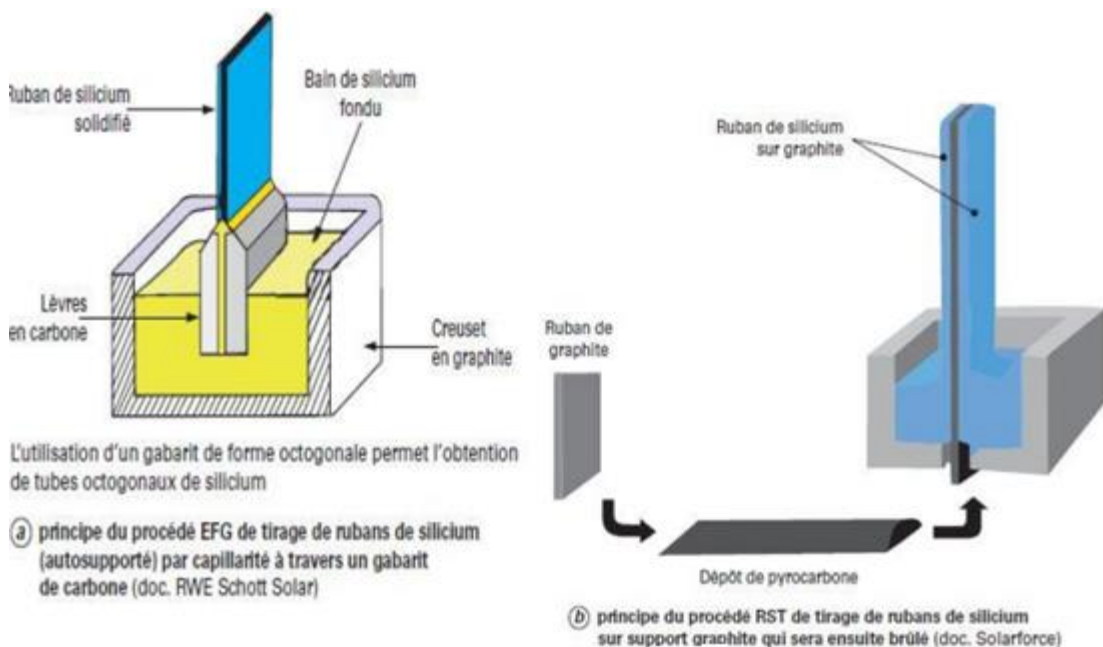
- ✓ Moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15%
- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement

- ✓ Sensible à la haute température.
- ✓ 2.3.2-Silicium multicristallin (Polycristallin)

#### 4.6 -Silicium en ruban auto supportée

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 10(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 10 (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

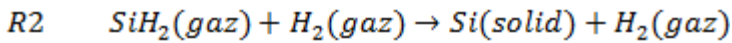
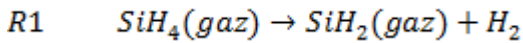


**Figure 4.8 :** Procédés de production du silicium en ruban

## 4.7- L'élaboration du Silicium amorphe

### Principe de Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma PECVD

Cette technique consiste à réaliser un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression, ce dépôt s'effectue normalement dans un four à mur chaud à des températures de l'ordre de 600°C. Le gaz réactif est ionisé par formation d'un plasma généré par un champ électrique alternatif d'une fréquence de 13.56 MHz (cas général). Turban [18] a étudié en détail les mécanismes de dissociation du silane dans un tel plasma:



Les produits de cette réaction sont des ions d'hydrures de silicium qui vont venir réagir sur la surface d'un substrat porté à une température d'environ 250 °C pour éviter de briser les liaisons Si:H. Du fait du faible température de la surface du dépôt, l'hydrogène n'exodiffuse pas et par conséquent le matériau obtenu est hydrogéné. La teneur en hydrogène des couches déposées varie selon des conditions expérimentales et est typiquement de l'ordre de 10% ou bien 20% dans notre cas. D'autre part, toujours à cause de la relative basse température du substrat, les conditions généralement utilisées aboutissent à un dépôt amorphe.

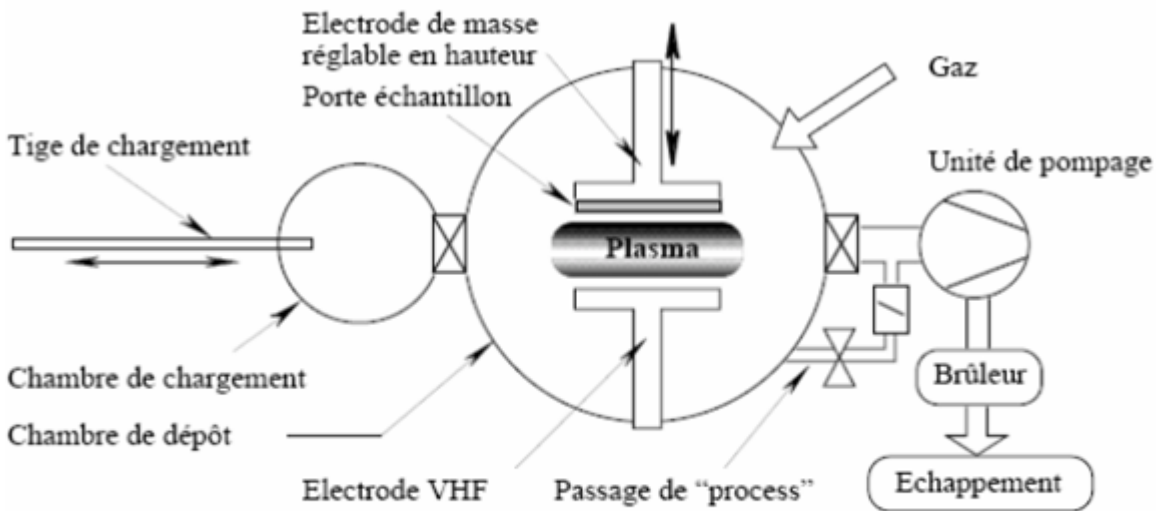


Figure 4.9 : Schéma du système CD-PECVD

## REFERENCES

- [1]- A. LUQUE, S. HEGEDUS, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Ed. J. Wiley. S. M. SZE, Semiconductor devices : Physics and technology, Ed. J. Wiley.
- [2]- OLY Jean-Pierre. <https://www.encyclopedie-energie.org/solaire-photovoltaique-les-technologies-et-leurs-trajectoires/>
- [3]-F.Dimroth and alFour-Junction Wafer-Bonded Concentrator Solar Cells. IEEE, Journal of Photovoltaics, Vol. 6, n°1, January. (2016).
- [4]-M. Salmi, Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en algerie et applications aux generateurs photovoltaïques, Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif, (2012).
- [5]-<https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaiques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaiques/>
- [6]- Sze Simon M. Semiconductor devices, physics and technology. London : Wiley. (2006).
- [7]- O. Nichiporuk, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités. Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon (2005).
- [8]- F. Abdo, Croissance de couches minces de silicium par epitaxie en phase liquide à basse temperature pour applications photovoltaïques. Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon (2007).
- [9]- A. Goetzberger, V. U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer Series in Optical SciencesAtlanta (2005).