

## I. Introduction

Toutes les énergies renouvelables sont issues, directement ou indirectement du soleil. Le rayonnement direct de cette étoile peut être utilisé de deux manières :

Energie solaire thermique : qui représente la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique ; transformation utilisée directement pour chauffer un bâtiment par exemple ou indirectement pour la production de vapeur d'eau dans l'entraînement des turboalternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique. Des rendements élevés peuvent être atteints.

En revanche l'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques [1]. Nous consacrons ce chapitre aux généralités et notions fondamentales sur la cellule solaire. Les différents types de ces cellules sont également étalés. Nous insistons sur deux matériaux à base de la cellule solaire ; « Si » et « ZnO »

## II. Rayonnement solaire

### 1. Soleil

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques (figure n°1). Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.[2]

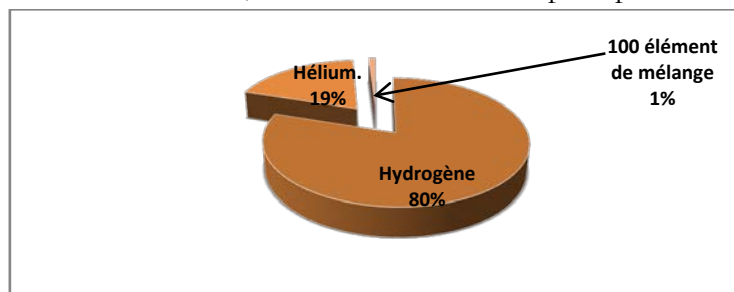


Figure I.1 : composition du soleil par différents éléments chimiques

### 2. Spectre solaire

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Des photons; grains de lumière composent ce rayonnement électromagnétique. En 1924, Louis de Broglie a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules (photons) et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de 6000 °C. L'intensité du rayonnement au dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m<sup>2</sup>, avec un spectre centré au voisinage de  $\lambda=0.48 \mu\text{m}$ . A la surface du sol, la densité de puissance n'est plus que de 0.9

$\text{kW}/\text{m}^2$  en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique. En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption.

Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par  $AM=1/\cos \alpha$  ou  $\alpha$  représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM0 est utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère. AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de  $48^\circ$  avec l'équateur). De plus, on distingue les spectres AM1.5D et AM1.5G qui correspondent respectivement au flux direct et au flux global (direct et diffus). La figure 5 donne ces spectres. Elle indique quelques semi-conducteurs utilisés pour les applications photovoltaïques ainsi que leurs énergies de gap  $E_g$  correspondantes [2].

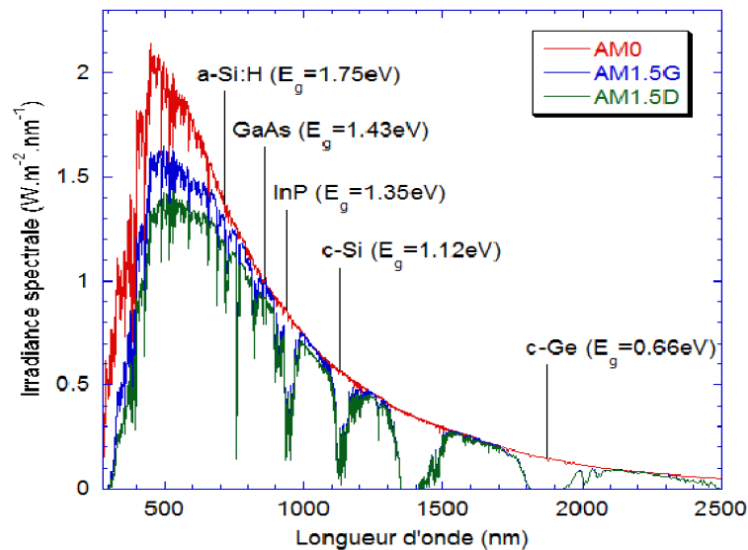


Figure I.2: Irradiance ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D ET AM1.5G)

### III. La cellule solaire

#### 1. Historique [3]

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par le français, Antoine Becquerel en 1839, mais il a fallu attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux [4]. Ce fut le seul procédé non nucléaire d'alimentation des satellites en énergie, en cette époque.

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été entrepris pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres [4].

L'industrie photovoltaïque a depuis connu une croissance spectaculaire. D'autres dates marquant l'historique de la cellule solaire sont résumées dans la figure suivante.

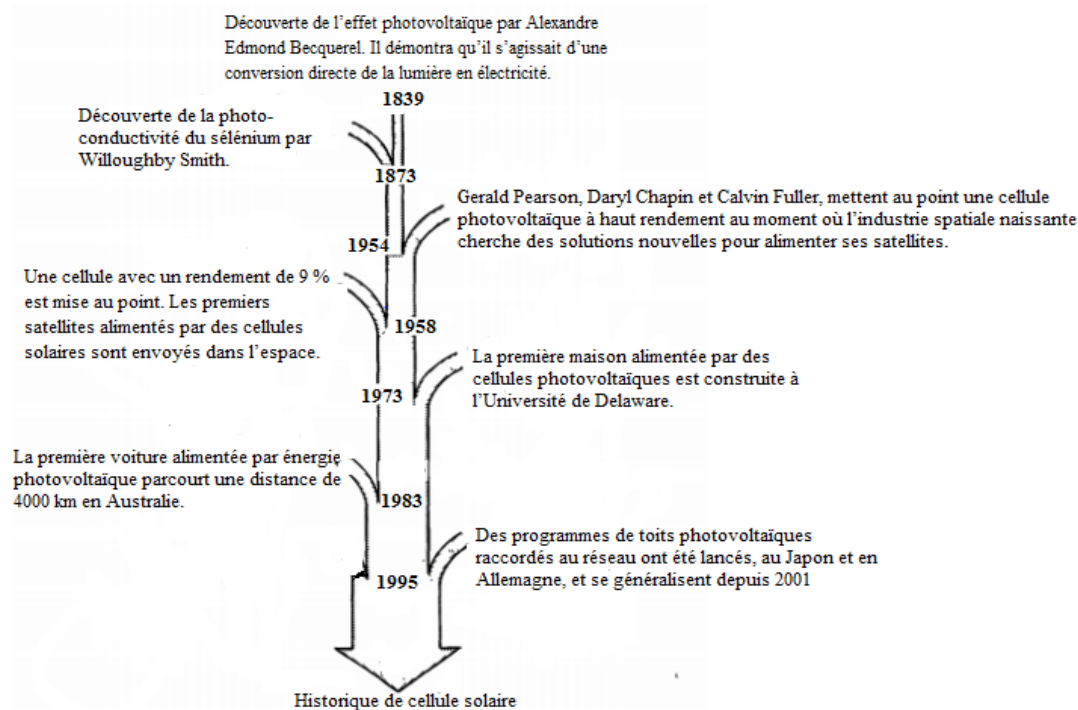


Figure I.3 : Historique de la cellule solaire

## 2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [3]

La cellule solaire est un composant semi-conducteur convertissant l'éclairement incident en puissance électrique. Le phénomène mis en jeu, l'effet photoélectrique, consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction. La cellule solaire est une jonction **p-n** dont le fonctionnement est basé sur l'absorption du flux lumineux solaire. Concernant, l'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires, il permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [4].

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est comme suit (figure n°4):

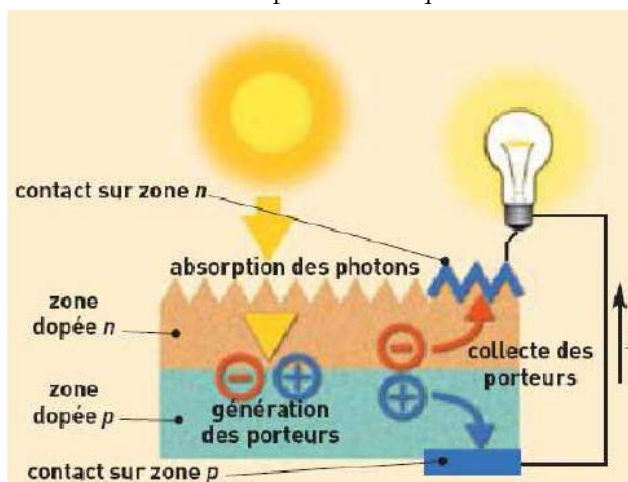


Figure I.4: principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].

:

1. Les "grains de lumière" les photons heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince,
2. Ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière, et se mettent alors en mouvement dans une direction particulière,
3. Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminés à la cellule suivante. [4]

### 3. Rappel sur le semi-conducteur

Un semi-conducteur, n'est ni tout à fait un conducteur d'électricité, ni tout à fait un isolant. Il peut être soit l'un, soit l'autre selon diverses conditions. Le caractère conducteur ou isolant prend sa source dans la structure même des atomes : chaque élément du tableau périodique possède un certain nombre d'électrons qui sont agencés autour d'un noyau. C'est cet agencement sous la forme de couches d'électrons, différent selon les éléments, qui est responsable de la conductivité électrique. Les électrons des atomes peuvent avoir plusieurs rôles au sein d'une structure d'atomes :

- électrons de cœur : ceux-ci sont proches du noyau et n'interagissent pas vraiment avec les autres atomes,
  - électrons de valence : ils sont sur les couches externes de l'atome et permettent de créer des liaisons interatomiques et de former les molécules,
  - électrons de conduction : ils sont responsables de la circulation du courant électrique [5].
- On peut schématiser l'ensemble sous la forme de couches. Sur le schéma suivant, on a représenté les couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction :

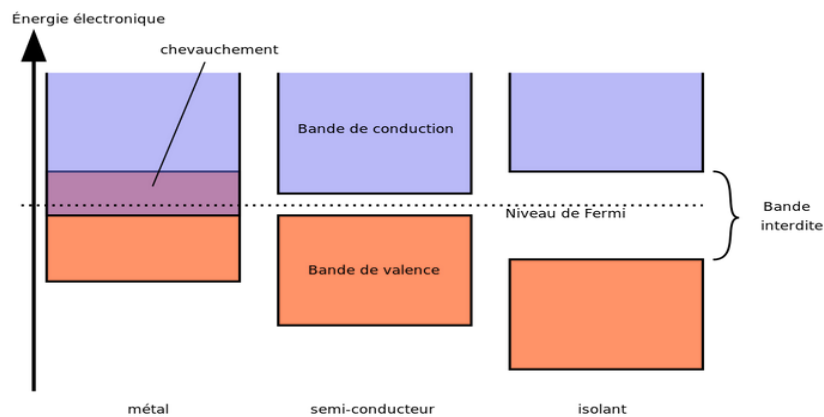


Figure I.5 : représentation les couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction [5]

On note que dans un métal, certains électrons sont à la fois dans la bande de valence et dans la bande de conduction. Cela signifie qu'un métal peut conduire le courant sans autre forme de traitement-physico-chimique.

Dans un isolant, par contre, les deux bandes sont séparées par un espace appelé « bande interdite » : cela signifie que les électrons ne peuvent pas s'y trouver. Dans le cas des isolants, les électrons externes sont tous dans la bande de valence et aucun ne se trouve dans la bande de conduction : ces matériaux ne peuvent donc pas conduire l'électricité. Enfin, dans le cas des semi-conducteurs, au milieu, il existe une bande interdite aussi, mais cette dernière est très fine. Il suffit de donner de l'énergie aux électrons, en les excitant pour que les électrons de valence puissent passer dans la bande de conduction et ainsi rendre le semi-

conducteur conducteur. Un semi-conducteur est donc un isolant mais qui peut devenir un conducteur très facilement en excitant les électrons de valence. Ceci peut se faire soit en chauffant le matériau, soit en l'éclairant, ou en le soumettant à une tension électrique bien définie. Par exemple, si on éclaire une plaque photovoltaïque, la plaque devient conductrice et on crée un courant électrique : c'est l'effet photoélectrique [5].

#### 4. L'interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre les bandes de valence et la de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des SC. La figure 5 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des K, il s'agit d'un gap indirect.

Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure 6.a)

Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas de Si, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au minimum de la bande de conduction, pour absorber un photon (figure 6.b). notons que la valeur de gap indirect du Si est 1.12 eV à 300K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3.4 eV(soit 365 nm)[6].

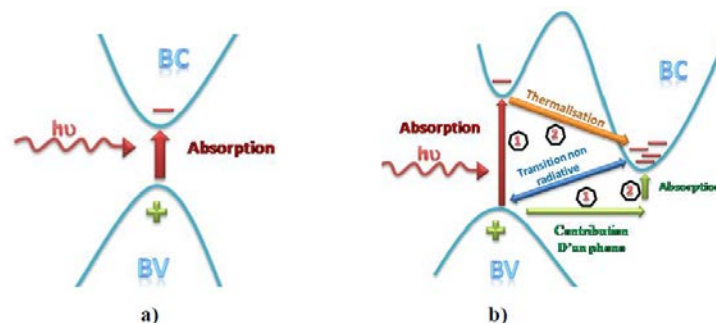


Figure I.6 : transition inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas (a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le (b) à un gap indirect [7]

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Ce dernier traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde.

L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

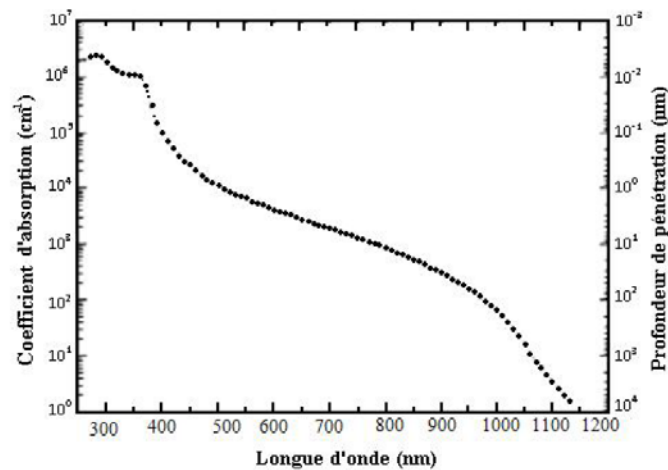


Figure 1.7 : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons [35]

L'interaction photon / électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau.

Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est-à-dire que la densité de porteurs photo-générés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée N et électrons dans celle dopée P). la cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur [8].

## 5. Jonction P-N

La jonction N-P est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée N et l'autre dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation. Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction N-P joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région P ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région P ; ils le font au bout d'un temps  $\tau$  appelé durée de vie des porteurs minoritaires [9].

Cette durée de vie est l'un des paramètres fondamentaux qui définit la qualité de la jonction. Plus  $\tau$  est grand, plus l'effet redresseur est marqué. Le silicium est à ce sujet le meilleur semi-

conducteur connu ( $\tau$  peut atteindre la valeur de 1 milliseconde, alors qu'il est de l'ordre de la microseconde pour la plupart des autres semi-conducteurs). Un autre paramètre important est la longueur de diffusion : l'électron injecté dans la région P diffuse sur une certaine distance  $l$  avant de disparaître au bout du temps  $t$  ; c'est cette longueur moyenne parcourue par les électrons dans la région P qui est appelée longueur de diffusion. Elle est de l'ordre de plusieurs micromètres pour le silicium [9].

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux [9].

## 6. Les différents rendements d'une cellule photovoltaïque [2]

### 6.1 Réponse spectrale

La réponse spectrale  $RS$  d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

La réponse spectrale  $RS$  est donnée par la relation suivante:

$$RS = \frac{I_{CC}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (1)$$

### 6.2 Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe  $EQE$  de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par :

$$EQE = SR(\lambda) \frac{hc}{\lambda q} \quad (2)$$

### 6.3 Rendement quantique interne

Le rendement quantique interne  $IQE$  de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe  $EQE$  par l'équation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (3)$$

Le coefficient de réflexion s'écrit :

$$R(\lambda) = \left( \frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda) + n_1(\lambda)} \right)^2 \quad (4)$$

si les matériaux en contact sont d'indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$ .

## 7. Mécanismes de recombinaison et durée de vie des porteurs minoritaires [10,11, 12]

Les principaux mécanismes de recombinaison des porteurs de charges libres dans les semi-conducteurs sont : (i) les mécanismes de recombinaison via les centres profonds (ou recombinaison Shockley-Read-Hall, SRH) introduits par les défauts cristallins (ponctuels, linéaires, 2D et 3D ; qui seront exposés dans le 2ème chapitre) et les atomes impurétés (en insertion ou en substitution), (ii) les recombinaisons radiatives ou bande à bande et (iii) les recombinaisons Auger (figure I-7).

A ces trois mécanismes de recombinaison, on peut ajouter les recombinaisons de type SRH à la surface ou, tout simplement, recombinaisons en *surface* par opposition aux recombinaisons (SRH, radiatives et Auger) qui ont lieu dans le *volume*.

A chaque mécanisme de recombinaison des porteurs de taux  $R$  est associée une durée de vie  $\tau$  par la relation [12] :

$$R = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (5)$$

Avec  $\Delta n$ : concentration de porteurs en excès. La neutralité électrique du matériau étant conservée, on a :  $\Delta n = \Delta p$ .

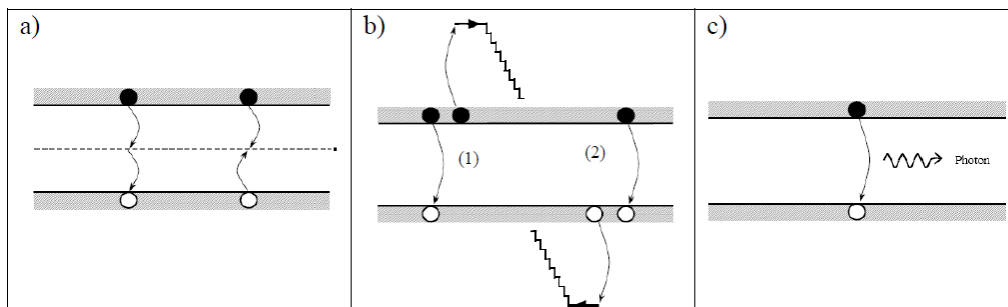


Figure I.8 : Schémas représentant les différents mécanismes de recombinaison[35]

## 8. Génération et recombinaison des porteurs [2]

### 8.1 Recombinaison en volume de type radiative

Le porteur en excès repasse directement de la bande de conduction à la bande de valence, en évacuant son énergie par émission d'un photon (figure 9).

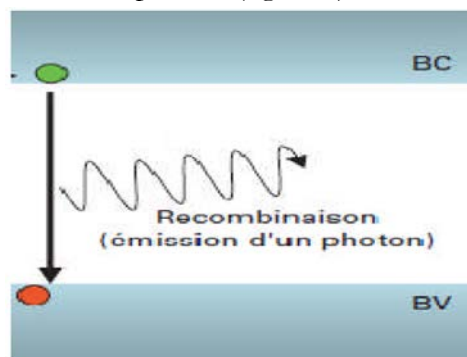


Figure I.9 : Recombinaison radiative d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence [2]



Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe et faible pour les matériaux à gap indirect.

### **8.2 Recombinaison en volume de type Auger**

Recombinaison Auger traduit la transmission de l'énergie de recombinaison d'une paire électron-trou à un autre électron qui se trouve exciter sur un niveau énergétique plus élevé. Ce mécanisme se manifeste lorsque la densité de concentration des porteurs libres dépasse un certain seuil de densité de l'ordre de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

### **8.3 Recombinaison en volume de type RSH par piège**

Ce type de recombinaison concerne les défauts cristallographiques et les impuretés métalliques (Cu, Fe, Au, Al, ...) présents dans le matériau est reposant les recombinaisons assistés par les multi photons. Il est plus couramment appelé Shokly-Read-Hall. Des niveaux profonds d'énergie dans la bande interdite sont responsables de la chute de la durée de vie des porteurs de charge, en créant des centres de recombinaison. Ils sont caractérisés par leur densité de concentration et leur position énergétique et dans la bande interdite, leur section efficace de capture des porteurs. Le taux de recombinaison RSH est en fonction du niveau d'injection

### **8.4 Recombinaison en surface par piège**

Des niveaux d'énergie d'états spécifiques (états de surface), provenant de phénomènes intrinsèques (des liaisons non satisfaites des atomes de surface, disparition de la périodicité du réseau, adsorption d'atomes étrangers), peuvent se situer dans la bande interdite. Certains de ces états jouent également le rôle de centres de recombinaison. La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont nombreuses.

## **9. Pertes physiques et technologiques**

La base pour réaliser un rendement élevé est la réduction de la totalité des pertes. Les considérations et les calculs suivants sont basés exclusivement sur les cellules solaires faites à base de silicium cristallin. La Figure I.8 donne une vue d'ensemble et une classification des différents mécanismes de pertes. Ceux-ci peuvent être divisés principalement en deux secteurs soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Cependant, des choix technologiques appropriés peuvent avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau [14].

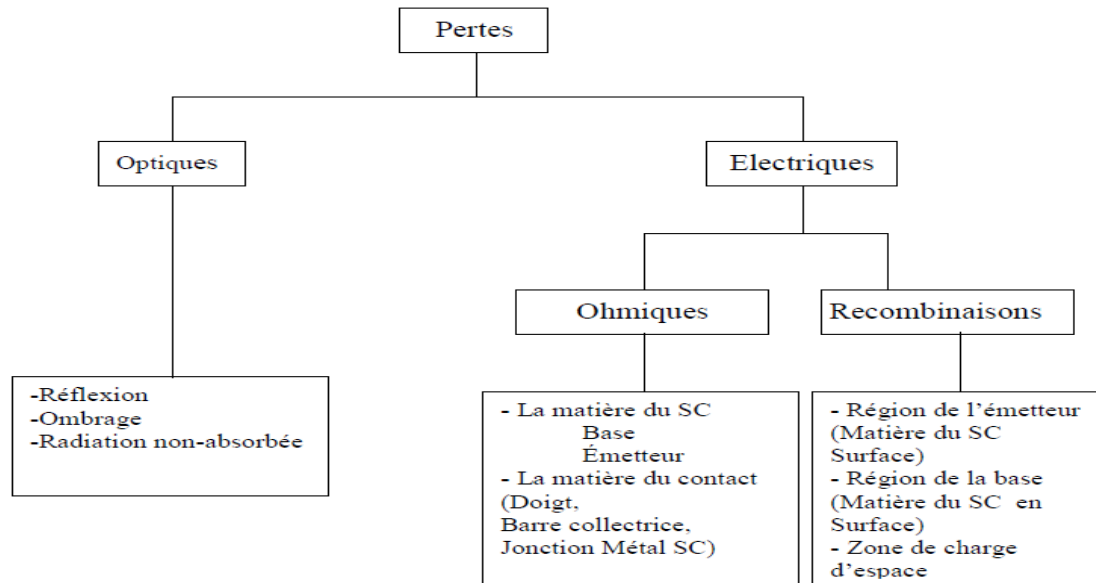


Figure I.10 : Mécanismes de perte dans une cellule solaire [13].

## 9.1 Pertes physiques

### 9.1.1 Pertes par les photons de grande longueur d'onde

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ( $\lambda > \lambda_g$ ) ne peuvent générer de paires électron-trou et sont donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par phonons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondante au gap du matériau (1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium [15], sous un éclairage d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 18.5% dans le cas du silicium [16].

### 9.1.2 Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons

Un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur. Sous un éclairage AM1.5, ces pertes sont évaluées à 47% de la puissance totale dans le cas du silicium [16].

## 9.2 Pertes technologiques

### 9.2.1 Pertes de photons incidents

Pour le cas d'un matériau faiblement absorbant d'aspect métallique très réfléchissant par exemple le silicium d'indice de réfraction d'environ 3.85 et de coefficient de réflexion d'une interface air/Silicium de l'ordre de 34%, les pertes directes de photons par réflexion sur la face avant sont très présentes. Aussi, son coefficient d'absorption diminue très vite au voisinage du gap, conduisant à des pertes par transmission dans le proche infrarouge. Pour diminuer les réflexions face avant, la solution courante est le dépôt d'une couche très fine (quelques dizaines de nanomètres) d'un matériau dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du Silicium. Pour augmenter l'absorption dans le silicium, il faut augmenter le trajet optique des photons, c'est-à-dire les confiner dans l'épaisseur de la plaque [17].

### 9.2.2 Pertes par ombrage de la surface active de la cellule.

Le dépôt des contacts métalliques nécessaires pour collecter les charges photo générées entraîne une zone d'ombrage sur la surface exposée de la cellule « face avant » qui est perdue pour la conversion photovoltaïque. Dans le cas des cellules à contacts arrières (ou RCC pour Rear Contact Cell), le taux d'ombrage est nul [18].

### 9.2.3 Pertes par absorption

L'épaisseur des cellules peut limiter l'absorption de certains photons. Dans le cas du silicium, du fait de son gap indirect, les photons infrarouges sont particulièrement exposés à ce problème [35].

### 9.2.4 pertes de collecte

Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total de charges photo-générées. Ce terme prend en compte les recombinaisons électron-trou en volume et en surface de la cellule. Il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires et donc de leur longueur de diffusion  $L$  via la relation :  $L = \sqrt{D\tau}$  avec  $D$  coefficient de diffusion. Pour le silicium multicristallin de type P,  $L$  est de l'ordre d'une centaine de  $\mu\text{m}$  pour les électrons [13].

## 10. Les paramètres d'une cellule solaire

### 10.1 Les paramètres physiques [19]

Les paramètres physiques sont : le gap énergétique, la concentration intrinsèque, les masses effectives, la durée de vie des porteurs, la mobilité des porteurs de charges, la constante de diffusion, le coefficient d'absorption et le coefficient de réflexion.

#### 10.1.1 Coefficient d'absorption

Le premier phénomène à optimiser est l'absorption de la partie la plus intense du spectre solaire par un matériau approprié, ayant pour résultat la libération d'électrons. Avant, le matériau idéal était choisi parmi les matériaux à petit "gap" afin d'absorber tous les photons solaires y compris les photons infrarouges dont l'énergie est inférieure à 1 eV mais de nos jours, des expériences ont montré qu'il est très intéressant d'utiliser même les matériaux à grand gap. Il est à signaler que la valeur de la tension de sortie de la photopile est directement proportionnelle au "gap" du matériau.

$$V_{oc} = E_g / q \quad (6)$$

Dans la réalité, à cause de nombreuses sources de pertes, la tension de circuit ouvert d'une photopile dépasse rarement la valeur de la moitié du "gap" [19].

#### 10.1.2 Le coefficient de réflexion :

Dans le cas de la photopile idéale, 100 % du rayonnement solaire pénètre le matériau, sachant qu'en réalité il faudra tenir compte de la réflexion sur la face avant et de l'absorption du verre protecteur, de la réflexion due au changement d'indice, et de la perte de surface active due à l'ombre portée par les grilles métalliques de collecte [19].

## 10.2 Les paramètres photovoltaïques

### 10.2.1 La caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire explique comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température. En observant la caractéristique (figure 11), on remarque trois points importants:

- Point un (1) correspondant au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéro (courant à court-circuit).
- Point trois (2) correspondant à la tension maximale de la cellule solaire sans charge (circuit ouvert).
- Point deux (3) correspondant à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire [20].

Dans une cellule solaire, la caractéristique peut être divisée en trois intervalles différents:

- L'intervalle où la cellule solaire est considérée en tant que source courant; le courant est constant tandis que la tension est variable (Intervalle I).
- L'intervalle, elle n'est considérée ni comme source de courant ni comme une source de tension (intervalle II).
- L'intervalle où elle est considérée comme une source de tension. Comme la tension est variable, le courant est constant (intervalle III).

Une fois qu'une cellule solaire est chargée avec une charge résistive constante, la charge est présentée avec un point quelque part sur la caractéristique de cellules d'I-V. Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. Cependant, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche de la direction [20].

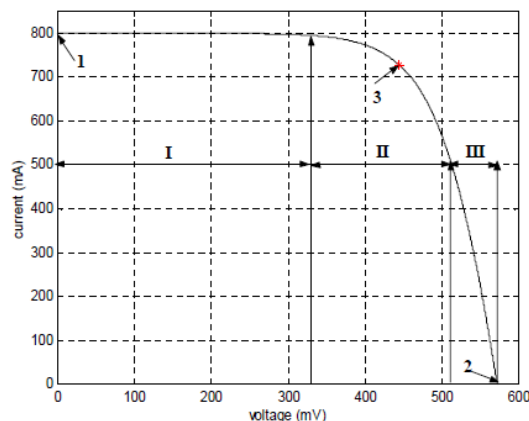


Figure I.11 : Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire [20].

Rappelons certaines grandeurs liées à la cellule solaire :

#### a. courant de court-circuit, $I_{cc}$

$I_{cc}$  correspond à l'intensité du courant de court-circuit, c.à.d. à  $V=0$ . Il est directement proportionnel à l'énergie du rayonnement à la température ambiante et à la surface de la cellule.

**b. tension de circuit ouvert,  $V_{oc}$** 

La valeur  $V_{co}$  correspond à la tension en circuit ouvert c.à.d.  $I=0$ . Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux.

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \log\left(1 + \frac{I_{cc}}{I_0}\right) \quad (7)$$

**c. La puissance maximale  $P_m$** 

C'est la puissance maximale de sortie correspondant au point pour lequel le produit de la tension et de l'intensité du courant soit maximal, elle est donnée par :

$$P_m = I_m \times V_m \quad (8)$$

**d. Facteur de forme FF**

C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et le produit entre  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  correspondant à la puissance maximale idéale, il est exprimé par :

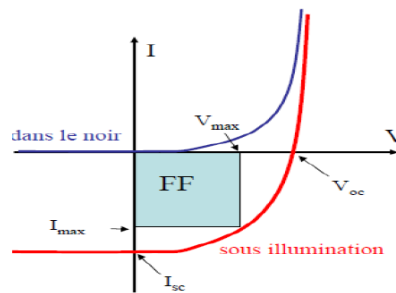


Figure 1.12 : Les courbes  $I = f(V)$

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (9)$$

**e. Rendement de la cellule,  $\eta$** 

Il représente la grandeur la plus importante dans l'étude d'une cellule solaire. Il donne le rapport entre la puissance électrique optimale délivrée et la puissance solaire reçue par la cellule à une température donnée. Il est définie par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = FF \frac{I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc}} \quad (10)$$

$P_{inc}$  : la puissance incidente de la lumière est égale à la puissance solaire  $P_{solaire}$  ( $P_{solaire} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ( $R_c = \infty$ ,  $I = 0$ ,  $V = V_{co}$ ) ou en court-circuit ( $R_c = 0$ ,  $I = I_{cc}$ ,  $V = 0$ ), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale  $R_{opt}$  de la résistance de charge  $R_c$  pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée  $P_{max}$  (figure 13).

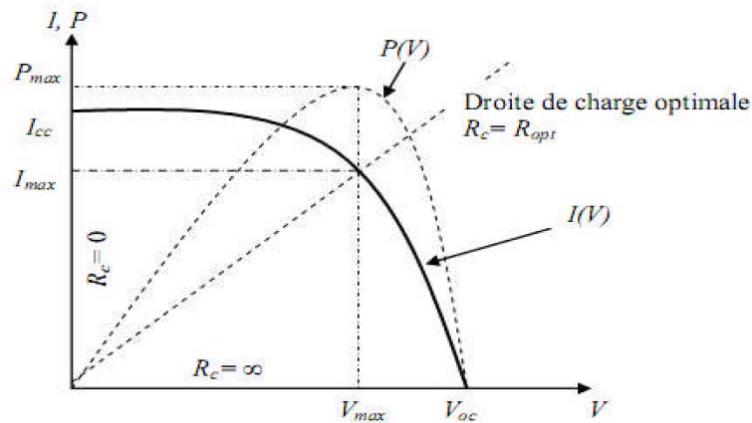


Figure I.13 : Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'une cellule solaire.

## 11. Les filières photovoltaïques

### 11.1 Première génération : cellules solaires au Si cristallin [2]

Cette génération de cellules repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99999% de Silicium. Dans la figure suivante, nous présentons à titre d'exemple les différentes étapes de fabrication d'un wafer de Si.

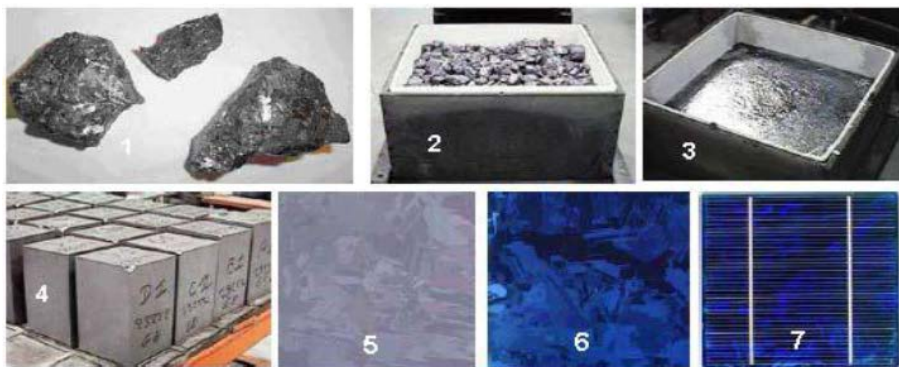


Figure I.14 : Etape de fabrication des cellules : (1) minerai de Silicium – (2) raffinage (pour Etape de fabrication des cellules) (3) Silicium en fusion donnant des lingots (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage du lingot – (6) traitement de surface par procédés physico-chimiques et (7) cellule finie avec électrodes [2]

Les cellules cristallines se subdivisent en deux catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure (Figure 15).

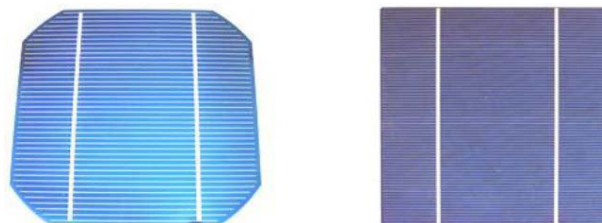


Figure I.15 : cellule mono cristalline et poly cristalline [2].

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

## 11.2 Deuxième génération : cellule en couches minces [2]

Cette génération de cellules repose sur la déposition de matériaux semi conducteurs en couches minces (*thin films*). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) 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 : ZnO/CIS / CIGS.

## 11.3 Troisième génération : Technologies photo-électro-chimiques (Dye Sensitised Cell et Organic PV) [36, 37]

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.

Apparues dans les années 1990, ces technologies ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires. A titre d'exemple, la figure 16 présente un sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC.



Figure I.16 : sac à dos incorporant un module de technologie organique DSC [2].

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). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir.

Concernant notre travail, il réside dans la présentation de la cellule solaire à base de Si (faisant partie de la filière 1<sup>ère</sup> génération) et la cellule à base de couches minces ZnO (2<sup>ème</sup> génération).

## A. Cellule solaire à base de Si

### • Matériau Si

#### 1. Définition

Le silicium est l'élément chimique de numéro atomique 14, de symbole Si. C'est un membre du groupe des cristallogènes. Il se classe dans la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, comportant 4 électrons de valence, il se classe dans les matériaux semi-conducteurs. Il possède un gap égale à 1.12 Ev.



Figure I.17 : la poudre de silicium [21].

Ce semi-conducteur présente en effet différents avantages [22,23]:

- ✚ Il est abondant à la surface du globe terrestre ;
- ✚ Il n'est pas toxique;
- ✚ Il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- ✚ Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

#### 2. Les différents types de silicium

Il existe deux types de silicium. L'amorphe et le cristallin. Pour le type cristallin il existe le monocristallin, le poly cristallin et le multi-cristallin.

##### 2.1 Silicium amorphe :

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 fine couche de  $0,3 \mu\text{m}$  est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [24].

Le silicium amorphe peut être déposé en couches minces à basse température sur un grand nombre de substrats,

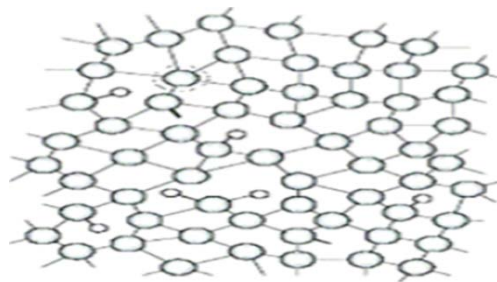


Figure I.18 : Structure du silicium amorphe [25]

##### 2.2 Silicium cristallin :

Le silicium cristallin se caractérise par sa structure ordonnée.



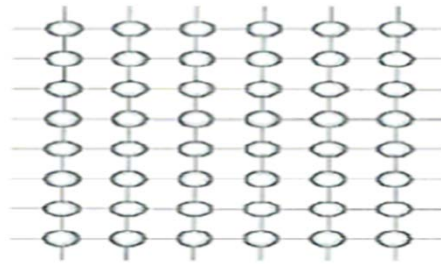


Figure I.19 : Structure du Si cristallin [25]

#### a. Structure cristalline :

Le silicium, se cristallise dans la structure du type diamant (figure 20).

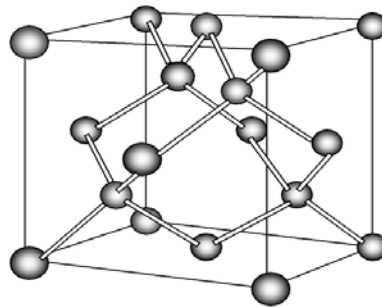


Figure I.20 : Structure cristalline du diamant [26]

Cette structure consiste en deux réseaux cubiques à faces centrées qui s'interpénètrent. Chaque atome d'un des réseaux est entouré par quatre proches voisins équidistants de l'autre réseau, formant un tétraèdre, avec lesquels il échange ses quatre électrons de valence.

#### 2.2.1 Le silicium monocristallin

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très coûteuse. [27]

#### 2.2.2 Le silicium multi-cristallin :

Le silicium multi-cristallin est constitué de grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres [28].

Les techniques de production du silicium multi cristallin sont beaucoup plus simples que celle du monocristallin donc bien moins onéreuses à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. [27]

#### 2.2.3 Silicium poly cristallin :

Le silicium poly cristallin, appelé aussi poly silicium ou poly-Si est une forme particulière du silicium. Il se différencie du silicium monocristallin et du silicium amorphe. Contrairement au premier (composé d'un seul cristal) et au second (n'ayant aucune ou une très faible cohérence cristallographique), le silicium poly cristallin est constitué de multiples petits cristaux de taille et de forme variées. Ces dernières lui confèrent des propriétés différentes des deux autres formes[29].

### 3. Les propriétés physiques du silicium

Le tableau 1 regroupe quelques paramètres physiques du silicium (la masse volumique, la conductivité thermique, l'énergie de la bande interdite,...).

Propriétés	Valeur
Masse volumique $\rho = (\text{à } 300\text{k}) \text{ g/cm}^3$	22.239
Masse volumique $\rho = (\text{à } 1687\text{k}) \text{ g/cm}^3$	2.51
Gain en densité transition liquide, solide %	9.1
Conductivité thermique (300k) $\text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$	1.5
Température de fusion $T_f(\text{k})$	1687
$E_g(\text{gap})$ (300k)	1.126

Tableau I.1: Quelques propriétés du silicium [30].

Dans le cas du Si, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon. La valeur de gap indirect du Si est 1.12 eV à 300K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3.4 eV (soit 365 nm) [6].

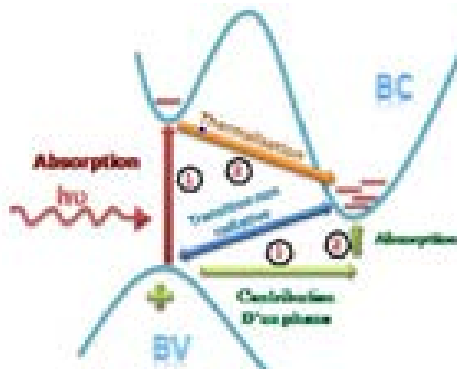


Figure I. 21 : transition inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur à un gap indirect

Quant au dopage du silicium (P ou N), il est en général supérieur au taux de photo-génération (régime de basse injection), les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type P et trous dans un matériau de type N) sont métastables et n'existeront en moyenne que pour un temps égal à la durée de vie  $\tau$ . Elle correspond au temps moyen entre la création d'une paire électron-trou et sa recombinaison. Dans les semi-conducteurs à gap indirect comme le silicium cristallin les recombinaisons sont, principalement, de type SRH et Auger [13].

### 4. Propriétés chimiques

Le silicium est l'élément électropositif le plus abondant dans la croûte terrestre. C'est un métalloïde avec un lustre métallique marqué et très fragile. Il est habituellement quadrivalent dans ses composés, bien que parfois son bivalent, et il est purement électropositif dans son comportement chimique. Indépendamment de ces isotopes normaux stables, de divers isotopes artificiels radioactifs sont connus. Le silicium élémentaire a les propriétés physiques des métalloïdes, semblables à ceux-ci ou au germanium. Le silicium est un semi-conducteur intrinsèque sous la forme la plus pure, bien que l'intensité de son semi conduction soit fortement augmentée en présentant de petites quantités d'impuretés. Le silicium est semblable aux métaux dans son comportement chimique. Il est presque aussi électropositif que l'étain et beaucoup plus positif que le germanium ou le plomb. [31]

- **La cellule solaire a base de Si**

### **1. Cellule en silicium monocristallin [32]**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal (mono cristallin) de grande dimension. Il est découpé ensuite en fines tranches. Ce cristal permet de planquer des cellules solaires qui sont en général d'un bleu uniforme.



Figure I.22 : Cellule en silicium monocristallin

### **2. Cellule en silicium multi cristallin**

Une cellule photovoltaïque à base de silicium multi cristallin s'obtient pendant le refroidissement du silicium, où il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme. Des motifs créés par les différents cristaux sont distingués.

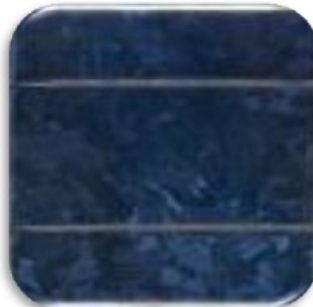


Figure I.23 : Cellule en silicium multi cristallin

### **3. Cellule en silicium amorphe**

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule se présente sous un gris très foncé. On la trouve sur les calculatrices et les montres qui sont dites "solaires".



Figure I.24 : Cellule en silicium amorphe

Nous présentons dans la figure n°24 le rendement des cellules à base de différents types de silicium. Un rendement de 27,6 % est atteint pour une cellule PV à base de silicium mono cristallin tandis que pour une cellule à base du silicium poly cristallin le rendement atteint est de 20,40% [38].

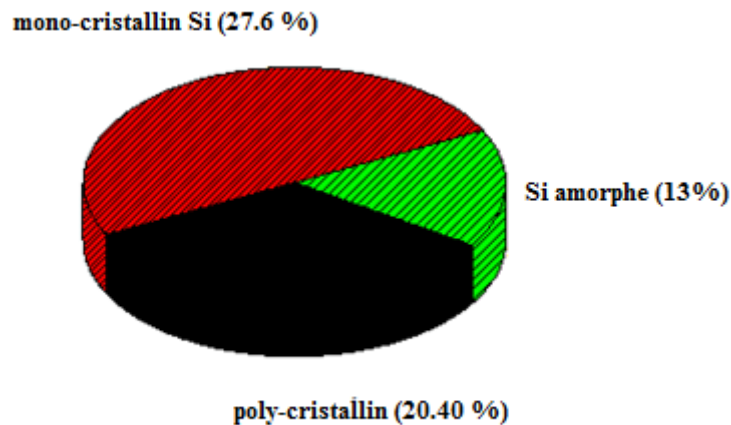


Figure I.25 : Le rendement de la cellule PV en Si

## B. La cellule solaire en couches minces à base de ZnO

### • Matériau ZnO

#### 1. Définition

L'oxyde de zinc est un composé inorganique de formule chimique  $ZnO$ . Il est sous forme de poudre blanche; la poudre est largement utilisée comme additif dans de nombreux matériaux tels les céramiques, le verre, le ciment. L'oxyde de zinc est présent dans la croûte terrestre comme une zincite minérale, mais la majorité d'oxyde de zinc utilisé dans l'industrie est produite par synthèse.

L'oxyde de zinc est un matériau transparent dans le domaine du visible grâce à son large gap, ce qui lui permet d'être classé parmi les oxydes transparents conducteurs TCO (transparent conductrice oxyde) [33].



Figure I.26 : poudre d'oxyde zinc

## 2. Structure électronique de bande

On rappelle que les structures électroniques de bande de l'oxygène et du zinc sont :

O:  $1s^2 2s^2 2p^4$

Zn:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$

Les états 2p de l'oxygène forment la bande de valence et les états 4s du zinc constituent la zone de conduction du semi-conducteur du ZnO.

## 3. Les propriétés physiques

### a. Propriétés physico-chimiques

L'oxyde de Zinc se présente sous forme d'une poudre blanche dont les caractéristiques physico-chimiques sont les suivantes [34]

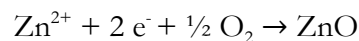
les caractéristiques physico-chimiques	Les valeurs
La masse molaire M	81.37g.
Une température de fusion très élevée	1975°C
La densité d	5.06 g/cm <sup>3</sup>
La résistivité électrique à 1073°K	$\rho = 67\Omega$
La résistivité électrique à 1622°K	$\rho = 1.2 \cdot 10^{-2} \Omega.m$
La pression de la vapeur de ZnO à 1300°C	200N/m <sup>2</sup>
La pression de la vapeur de ZnO à 1500°C	1387N/m <sup>2</sup>

Tableau I.2: propriétés physico-chimiques de ZnO

### b. Propriétés électriques

Le gap d'énergie de ZnO à la température ambiante peut varier selon la technique de préparation dans une gamme allant de 3,15 eV entre 3,4 eV [39].

Les mobilités des électrons dans des couches minces de ZnO, sont typiquement de l'ordre de 20 à 30 cm<sup>2</sup>/V.s. En outre, la mobilité maximale obtenue dans les cristaux simples de ZnO est de l'ordre de 200 cm<sup>2</sup>/V.s. La réaction de formation de ZnO (stoechiométrique) est la suivante :



Les cristaux de ZnO présentent une haute résistivité avec une grande concentration de porteurs de charge. Un traitement sous air ou sous oxygène donne un effet opposé pour des cristaux de faible résistivité [33].

- **La Cellule solaire en couches minces à base de ZnO**

Une des solutions pour augmenter le rendement des cellules photovoltaïques est l'intégration des couches minces de ZnO comme semi-conducteur de type  $n$  dans celles-ci afin d'agrandir la surface effective de l'interaction avec la lumière. Par ailleurs en dopant ces couches avec des nanoparticules de colorants, on pourrait également élargir leurs spectres d'absorption de la lumière, ce qui augmenterait aussi le gain de ces cellules [40].

#### **IV. Conclusion**

Ce chapitre concernait les bases indispensables à la compréhension du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Ses caractéristiques électriques ainsi que les différentes propriétés physiques des deux matériaux de notre étude ; le silicium et le ZnO matériaux intégrés dans la cellule solaire ont largement été décrits de Si et la cellule solaire en couche mince de ZnO.

## v. Référence

- [1] F. Therez, « Les Cellules Photovoltaïques au Silicium et à l'Arséniure de Galium : Modèles de Fonctionnement, Expérimentation et Application aux Générateurs sous Concentration », Thèse de Doctorat, Toulouse 1984.
- [2] H. Amar, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de Séléniure de Cuivre Indium Galium  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  (CIGS) », mémoire de magister, Biskra, 2014
- [3] S. Mostefa Kara, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS », Mémoire de Magister, Tlemcen, 2012.
- [4] « Photovoltaïque », M3P Solar , 2009.
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur>
- [6] S. Ghennou Enbakhti, « Etude des paramètres physiques des matériaux photovoltaïque a base se silicium monocristallin et polycristallin », Mémoire de Magister, Tlemcen
- [7] Honsberg C, Bowden. « Photovoltaic : Devices, Systèmes and Applications », Sydney, 1998.
- [8] M.Orgeret. « Les piles solaires, le composant et ses applications ». Ed. Masson, 1985, p247
- [9] Z.Bendjellouli, « contribution à la modalisation d'une cellule solaire », Mémoire de Magistère, Bechar, 2009
- [10] Y.Sayad, « Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière », Thèse de doctorat, Constantine, 2009.
- [11] H. Mathieu, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 2ème Edition, Masson, 1990.
- [12] M. J Kerr, "Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells, Thèse de Doctorat, Australian National University, 2002.
- [13] H. Hachemi, « contribution de n-c Si confinés ) l'intérieur des couches antireflets dans amélioration de la réponse spectrale des couches solaires conversionnelles », mémoire de magister, Université abou Bekr Belkais- Tlemcen, 2011
- [14] Jean-François Lelievre. Elaboration de  $\text{SiN}_x:\text{H}$  par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques. Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007.
- [15] .A. Green, Silicon Solar Cells. Advanced Principles and Practice. Sydney, Australia. Centre for photovoltaic devices and systems, UNSW, 1995, 366 p
- [16] A. ZERGA, « Modélisation, Simulation et Caractérisation des Cellules Solaires au silicium » Synthèse des travaux de recherche de l'habilitation universitaire présentée à l'Université de Tlemcen (2009).
- [17] A. Ould Abbas-Bensaoula, thèse de doctorat, Tlemcen, 2003.
- [18] Julien Dupuis, Elaboration et caractérisation de couches de  $\text{SiO}_x\text{N}_y:\text{H}$  et  $\text{SiN}_x:\text{H}$  réalisées par méthode PECVD : application à la face arrière des cellules photovoltaïques en silicium. 2009-ISAL-0085 Année 2009.
- [19] H.CHABANE, « Etude D'une Cellule Solaire A Base De Structure Pin », memoire de magister, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2015
- [20] « optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un generateur photovoltaïque », thèse, université mentouri de Constantine, 2007
- [21] Kröger, N., and E. Brunner. Complex-shaped microbial biominerals for nanotechnology: Complex-shaped microbial biominerals for nanotechnology. Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol. 6: 615–627. 2014.
- [22] S. Ben machiche: "Etude des paramètres limitant le rendement d'une photopile a base d'une structure MIS ", Thèse de Magister, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2009.

- [23] Ch.Hasni, « Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellules solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS », mémoire de master, Université Med Khider Biskra, 2013-2014
- [24] [ttp://membres.lycos.fr/energiesoltpe/principe.htm](http://membres.lycos.fr/energiesoltpe/principe.htm).
- [25] PoortmansJ. and ArkhipovV. Thin filmsolar cells, fabrication, characterization and applications. Edition Wiley, England 2007.
- [26] M. Gerl, J-P.Issi, «Physique des matériaux », presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (1997).
- [27] chapitre I etat de l'art des cellules solaires conventionnelles.
- [28] S. Quoizola, « Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium me soporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût », Thèse de doctorat, INSA de Lyon. 2003.
- [29] Jean-François LELIEVRE, « Elaboration de SiNx : H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, INSA de Lyon. 2007.
- [30] Marc Orgeret, « les piles solaires le composant et ses applications », Masson, 1985.
- [31] A.DJAFOUR, « Les semi-conducteurs Les propriétés des semi-conducteurs : Si-Ge-SiC-GaN-GaAs », Université de mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [32] S.MANSOUR, « Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé », mémoire de master, Université abou bekr belkaid, 2014
- [33] Y.MERABET, « Etude Des Caractéristiques Structurelles Des Couches Minces De ZnO. Application à une Cellule Photovoltaïque. » Mémoire de master, université aboubakr belkaid – tlemcen, 2013
- [34] Rezika BAKRI épouse BOUKHALFI « Etude Du Système ZnO- Al- ZrN » Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou le 26- 03- 2012
- [35] Honsberg C. and Bowdens « photovoltaics Devices Système and Applications (CDROM). Sydney, Australia, University of new southwales, 1998.
- [36] [http:// pveducation.org/pvcdrom](http://pveducation.org/pvcdrom)
- [37] D.Schroider and D.Meier, « solar cells contact resistance : a review « IEEE Transactions on electron devices, vol.ED.31,n°5, 1984, Ma
- [38] J. P ; Kleider, « photovoltaïque », Journées du GDR SEEDS, ENS Cachan, Juin, 2011.
- [39] L. Yang, « Caractérisation de couches minces de ZnO élaborées par la pulvérisation cathodique en continu », Thèse de Doctorat, Pas de Calais, 2013.
- [40] H.BELKHALFA. « Etude de l'effet du recuit à haute température sur les propriétés des couche minces de ZnO déposées par spray pyrolyse pour application photovoltaïque », mémoire de agister, Université M'Hamed Bougara BOUMERDES, 2010