

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Ibn Khaldoun – Tiaret*



*Faculté des Sciences de la Matière*  
*Département de Physique*

## **Mémoire**

*Présenté par :*

**ALI CHERIF MOHAMED**

*Pour obtenir le diplôme de*

***Master***

*Spécialité : Technologie et Physique des Couches Mincees Nanostructurées*

**SUJET :**

**Etude par simulation numérique d'une  
cellule solaire à base de silicium par PC1D**

**Soutenu le : 12 juin 2016**

**Devant le jury :**

➤ Mr A.DEHBI	Professeur	Président	U-Tiaret
➤ Mr A.LARABI	MAA	Examineur	U-Tiaret
➤ Mr N. OULDHAMADOUCH	MCB	Encadreur	U-Tiaret
➤ Mr D. YESREF	Docteur	Co-cadreur	U-Tiaret

**ANNEE UNIVERSITAIRE 2015/2016**

## Remerciements

---

Je remercie Dieu, tout puissant de m'avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser ce mémoire.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Génie physique, Faculté des sciences de la matière, Université Ibn khaldoun Tiaret, sous la Direction de monsieur : **N.Ould hamadouche, Docteur** à l'Université d'Ibn Khaldoun de Tiaret et à monsieur **Dj.Yesref** qui a co-dirigé ce travail, je tiens à leur témoigner mes sincères remerciements.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur : **A.Dehbi**, Professeur à l'Université d'Ibn Khaldoun de Tiaret, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Je remercie également monsieur : **A.Larabi** Maitre-assistant classe « A » à l'Université d'Ibn Khaldoun de Tiaret d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je termine en remerciant **mes parents** qui m'ont soutenu le long de mon parcours avec leurs conseils et leurs soutiens, sans oublier tous mes amis qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

# TABLE DES MATIERES

Introduction Général .....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I : L'état de l'art

I.1 Introduction .....	5
I.2 Le flux Solaire .....	5
I.3 Généralités sur les Semi-conducteurs : .....	7
I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques : .....	8
I.3.2 Dopage des semi-conducteurs : .....	9
I.3.3 Les propriétés électro-optiques des semi-conducteurs : .....	11
I.4 L'effet photovoltaïque : .....	14
I.5 Les cellules solaires .....	15
I.5.1 Rappels de fonctionnement des cellules solaires : .....	15
I.5.2 Les caractéristiques des cellules solaires : .....	16
I.5.3 Descriptifs des différentes générations .....	17
I.6 Fonctionnement d'une cellule solaire à base de silicium : .....	18
I.6.1 Description de la cellule idéale : .....	19
I.6.2 Schéma électrique équivalent : .....	21
I.6.3 Les pertes physiques et technologiques : .....	22
I.7 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque : .....	26
I.7.1 Passivation des faces avant et arrière : .....	26
I.7.2 Couche antireflet : .....	27
I.7.3 Texturation de la surface : .....	27
I.7.4 Contacts face avant et arrière : .....	27
I.7.5 BSF .....	28
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque : .....	28
I.8.1 Avantage : .....	28
I.8.2 Inconvénients : .....	28
Référence : .....	30

## CHAPITRE II: Le silicium en couche mince

II-1 Introduction :.....	33
II-2 Les filières technologiques du photovoltaïque : .....	33
II-3 Définition d'une « couche mince » :.....	35
II-4 Le silicium monocristallin en couche mince : .....	36
II-4 .1 La méthode de Czochralski :.....	37
II-4 .2 La méthode de Bridgman :.....	38
II-4 .3 Méthode de la zone flottante (FZ) :.....	38
II-5 Le silicium poly-cristallin en couche mince : .....	39
II-6 Le silicium multi-cristallin en couche mince :.....	40
II-7 Le silicium amorphe en couche mince : .....	41
II-8 Les Propriétés optoélectroniques du silicium (Si) : .....	42
II-8.1 Les Propriétés électroniques du silicium (Si) :.....	42
II-8.2 Les Propriétés optiques du silicium (Si) : .....	43
II-9 Les cellules solaires en couche mince de silicium cristallin :.....	44
II-10 Méthodes générales pour déposer une couche mince :.....	44
Référence :.....	47

## CHAPITRE III: Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à base de silicium par PC1D

III.1 Introduction :.....	49
III.2 Description du Logiciel PC1D :.....	49
III.2.1 Aperçu du logiciel : .....	49
III.2.2 Les paramètres du dispositif (Device) :.....	50
III.2.3 Les paramètres des régions .....	51
III.3 Le fonctionnement du logiciel PC1D .....	51
III.4 La Structure à simuler :.....	52
III.4.1 Paramètres de la structure simulée .....	53
III.5 Influence de l'épaisseur (Xe) de base sur le rendement, la tension Vco et le courant Icc :.	54
II-6 Influence de l'émetteur sur le rendement des cellules solaires utilisées :.....	56
II-6.1 Effet de l'épaisseur :.....	56

II-6.2 Effet du dopage (Nd) de l'émetteur : .....	58
III-7 Influence de la base « collecteur » sur le rendement des cellules solaires utilisées :.....	59
III-7.1 Effet du dopage de la base des cellules solaires : .....	59
III-7.2 Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires : .....	61
III-8 Influence du substrat utilisé :.....	63
III-8.1 Effet de dopage du substrat :.....	64
III-8.2 Effet de l'épaisseur du substrat :.....	66
III-9 Influence de la couche de passivation : .....	67
III-9.1 Effet de la variation (SF) : .....	68
III-9.2 Effet de la variation (SR) :.....	69
III-10 Caractéristique I(V) de la cellule solaire étudiée : .....	70
III-11 Conclusion :.....	71
Référence : .....	72
Conclusion Général.....	73

## Introduction Général

## Introduction général :

Depuis de nombreuses années, l'Humanité fait face à une demande en énergie croissante. Cette croissance, qui n'est que la conséquence directe de la croissance démographique mondiale et la mutation progressive des nombreuses économies primaires (basées sur l'agriculture) vers des économies secondaires (basées sur la production) dans les pays en voie de développement, entraîne une raréfaction des ressources naturelles utilisées pour répondre à ce besoin en énergie. Une très grande partie de ces ressources sont aujourd'hui fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel). Bien que diversifiées et très abondantes, ces ressources ne sont pas inépuisables et l'exploitation qui en est aujourd'hui faite ne pourra durer plus d'un siècle. Mais la sûreté énergétique à long terme des pays du monde n'est pas le seul péril que fait encourir le recours aux énergies fossiles. Leur utilisation génère considérablement de dioxyde de carbone, gaz en parti responsable de l'effet de serre. Cet effet de serre met en péril de nombreuses populations de par le monde [1], l'énergie solaire est une des solutions, pas la seule, mais elle présente beaucoup d'avantages, elle est une énergie abondante, et propre.

Cette énergie solaire photovoltaïque nous permet de convertir directement le rayonnement solaire en électricité en utilisant des composants optoélectroniques appelé cellules photovoltaïques. Pour cette raison La production de l'électricité à partir de l'énergie solaire est devenue très importante, ce qui conduit à développer les cellules photovoltaïques et améliorer leurs rendements. Le silicium est le matériau le plus largement utilisé pour la conversion photovoltaïque. Cependant, le coût du silicium constitue près de 50 % du prix de revient d'un module photovoltaïque. La réduction de consommation du matériau silicium est une solution très importante.[2]

Pour cela, toute cette nouvelle technologie de transport de films minces est prise en considération. Elle est utilisée pour les films minces de silicium monocristallin qui est le seul type de silicium capable de conserver un rendement d'environ 20% avec Ce qui est de l'ingrédient actif qui est l'objet du présent mémoire.

Dans ce travail nous présentons la simulation d'une cellule solaire à base du silicium en couche mince déposé sur un substrat silicium en utilisant le logiciel PC1D

Le manuscrit ainsi présenté est réparti en trois chapitres, en commençant par une introduction générale et en terminant par une conclusion.

# Introduction Général

---

**Le premier chapitre** dresse l'état d'art des recherches portant sur le monde du photovoltaïque, Nous exposons le principe photovoltaïque et les différentes technologies permettant les développements des cellules solaires. Un descriptif du fonctionnement de ces cellules est présenté, l'accent est mis sur les propriétés optiques des semi-conducteurs, à travers une présentation de leur structure de bande et l'effet des défauts de structure et leur influence sur les propriétés émissives induites par l'absorption et la photoluminescence de ces structures.

**Le deuxième chapitre** : Nous étudions les propriétés de silicium en couche mince ainsi, en décrivant les différentes méthodes de dépôt des couches minces, leurs avantages et leurs inconvénients sont bien détaillés.

**Le troisième chapitre** est consacré à la présentation et à la discussion des principaux résultats obtenus à partir de l'étude de simulations faites par le logiciel PC1D utilisé.

Nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale qui fait un rappel des principaux résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse ainsi que sur les perspectives qu'ouvre cette étude.

# Introduction Général

---

## Référence :

[1] : « SoltaneZeghina » Mémoire de magister en microelectronique thème simulation et analuse d'une cellule solair organique- UV de Batna-2013

[2] : « Bencherrat Abdennebi » Mémoire de master physique énergétique et matériaux-Thème : Etude de transfert des films mices de silicium monocristallin dans la réalisation de cellule solair a faible budget thermique, UV Abou BeKr Belkaid-Tlemcen-24 juin 2012

## CHAPITRE I : L'état de l'art

## I.1 Introduction

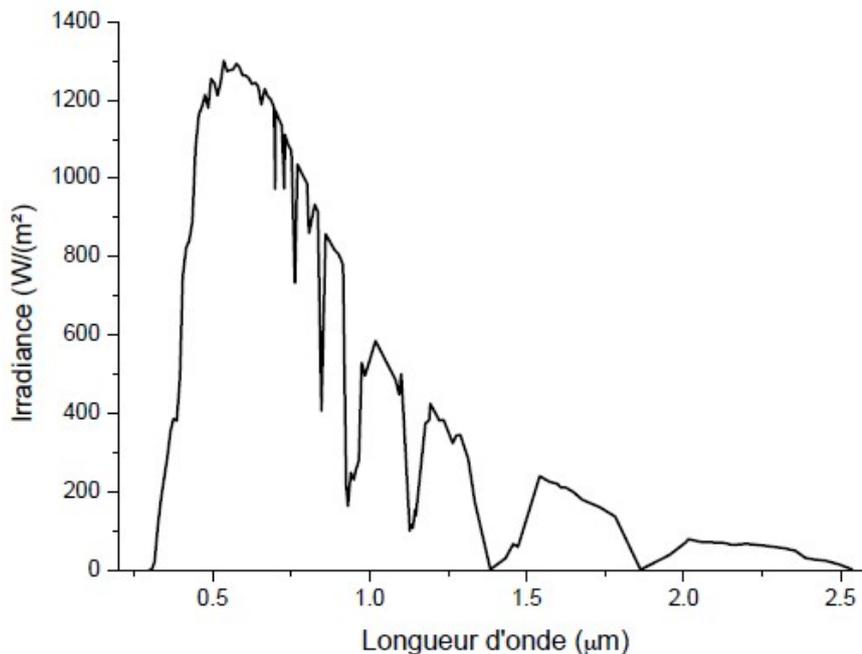
Ce chapitre constitue une base théorique et bibliographique et a pour but la compréhension des chapitres suivants. Nous aborderons d'abord les notions nécessaires sur la source d'énergie exploitée dans le domaine photovoltaïque : flux solaire. Nous décrirons ensuite les cellules solaires qui sont une des applications les plus importantes des couches minces de silicium utilisées. Nous présentons dans la deuxième partie, leur mode de fonctionnement et les différents types de cellules solaires inorganiques utilisées durant les deux dernières décennies. La fin de ce chapitre est consacrée à la présentation des propriétés optiques des semi-conducteurs et ses applications.

## I.2 Le flux Solaire

Etymologiquement, le mot photovoltaïque dérive du grec ancien « *photos* qui signifie lumière, et du terme « *volta* » qui fait référence au physicien Alessandro Volta, premier à avoir découvert le procédé de la pile en 1800. Une cellule photovoltaïque sera donc dans son sens le plus général, un dispositif qui, exposé à la lumière, générera un courant électrique.

La source d'énergie, le soleil, est un nuage interstellaire qui se condense sous l'effet de la gravité, dont la température est de l'ordre de  $10^7$  degrés Kelvin en son centre et environ  $6000^\circ\text{K}$  à sa surface. Le flux énergétique constant produit par des réactions thermonucléaires qui prennent forme à sa surface traverse l'atmosphère terrestre, qui est alors considérée comme un filtre. Le flux lumineux qui frappe la Terre est donc considérablement amoindri par rapport à celui qui est émis par le soleil. Pour caractériser la part d'énergie reçue en fonction de l'épaisseur de l'atmosphère traversée on utilise le nombre de masse d'air (AM). Ainsi, lorsque le soleil est au zénith, le flux reçu au niveau de la mer est de l'ordre de  $1300\text{W}/\text{m}^2$ . Ce flux est défini comme le rayonnement solaire pour une masse d'air (AM1). Le rayonnement traverse l'atmosphère sur une épaisseur de 7.8 kilomètres. Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, le rayonnement lumineux traversera une plus grande quantité atmosphérique, ce qui lui fera perdre une plus grande quantité d'énergie. Ainsi, avec un soleil à  $30^\circ$  sur l'horizon, on définit les conditions AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions AM0. Les conditions AM0 sont utiles pour les applications spatiales. Le spectre standard de la lumière du soleil équivalent à un flux continu de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  est défini comme étant AM1.5, c'est-à-dire que le rayonnement aura parcouru une distance 1,5 fois supérieure au parcours minimal du rayonnement du soleil dans l'atmosphère. On peut écrire AM1.5G pour discuter du rayonnement global, incluant le rayonnement direct et le rayonnement diffus, on écrit AM1.5D pour indiquer uniquement le rayonnement direct. La Figure I-1 reporte le spectre du rayonnement de référence utilisé comme

base dans l'industrie pour définir les conditions de test des panneaux photovoltaïques (AM1.5G). Si l'on analyse le flux solaire, 46% du rayonnement se situe dans le visible, 49% dans le proche infrarouge et le reste du rayonnement est dans l'ultraviolet.



**Figure I-1 : Spectre solaire énergétique normalisé (AM1.5G)**

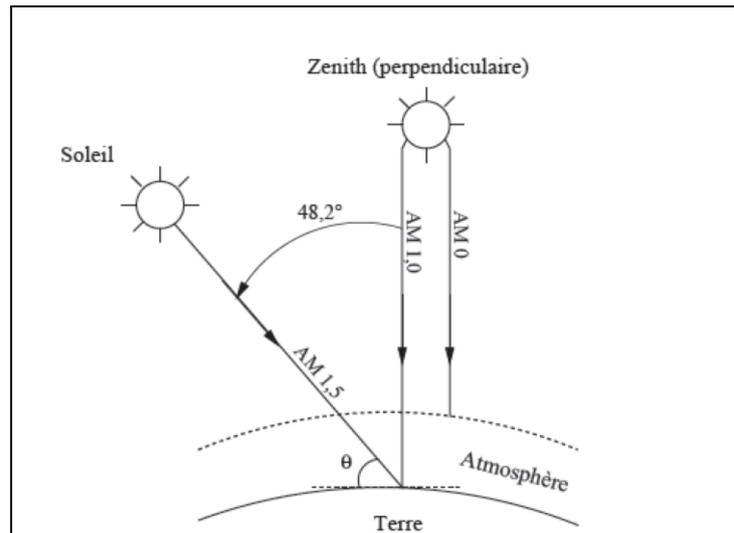
L'enjeu de la conversion de l'énergie solaire est donc très important. De nouvelles techniques de conversion de l'énergie solaire sont apparues durant les dernières décennies. Parmi celles-ci, celle fondée sur l'utilisation de matériaux organiques et inorganiques. Ces cellules hybrides sont nommées cellules solaire organiques.

La suite de ce chapitre sera dévolue à la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique, et en particulier au fonctionnement des cellules solaires à base de silicium.

Pour caractériser la part d'énergie reçue en fonction de l'épaisseur de l'atmosphère traversée on utilise le nombre de masse d'air (AM). Ainsi, lorsque le soleil est au zénith, le flux reçu au niveau de la mer est de l'ordre de  $1300W/m^2$ . Ce flux est défini comme rayonnement solaire pour une masse d'air de 1 (AM1). Le rayonnement a traversé l'atmosphère sur une épaisseur de 7.8 kilomètres.

# Chapitre I : L'état de l'art

Le spectre standard de la lumière du soleil équivalent à un flux continu de  $1000 \text{ W/m}^2$  est défini comme étant AM1.5, c'est-à-dire que le rayonnement aura parcouru une distance 1,5 fois supérieure au parcours minimal du rayonnement du soleil dans l'atmosphère. On peut écrire AM1.5G pour discuter du rayonnement global, incluant le rayonnement direct et le rayonnement diffus, on écrit AM1.5D pour indiquer uniquement le rayonnement direct.



**Figure I-2 Description du nombre de masse d'air AM.**

## I.3 Généralités sur les Semi-conducteurs :

Les matériaux semi-conducteurs sont en général des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants, disant de  $10^{-3}$  à  $10^4 \Omega\text{-cm}$  (ou plus). Dans les semi-conducteurs, le gap est assez faible, ce qui permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction simplement grâce à leur énergie d'agitation thermique, ainsi le semi-conducteur en tant que mauvais conducteur ou mauvais isolant a lui une conductivité qui augmente avec la température.

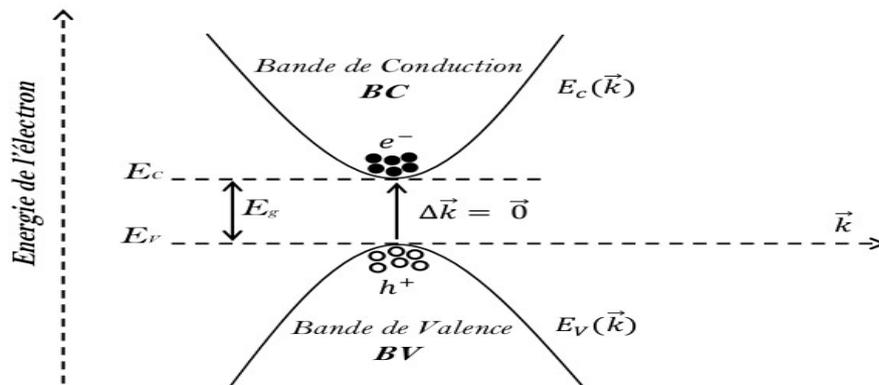
Un des matériaux semi-conducteurs le plus couramment utilisé est le Silicium, qui appartient au groupe IV; il contribue grâce à sa grande disponibilité et de sa bonne conductivité thermique, à la réalisation des circuits intégrés, la majorité des premières générations de cellules solaires sont à base de silicium[1],[2].

## I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques :

### I.3.1.1 Semi-conducteurs intrinsèques à gap direct :

Dans les semi-conducteurs à gap direct le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont au même point (même vecteur d'onde  $\vec{k}$ ) dans la zone de Brillouin (ZB), figure I-3. La transition électronique entre le haut de la bande de valence (BV) et le bas de la bande de conduction (BC) conserve le vecteur d'onde ( $\Delta \vec{k} = \vec{0}$ ) Dans ce cas :

$$\Delta \vec{p} = h \Delta \vec{k} = \vec{0} \quad (I-1)$$



**Figure I-3 Semi-conducteurs à gap direct [3]**

$\vec{k}$  est le vecteur d'onde associé à l'électron.

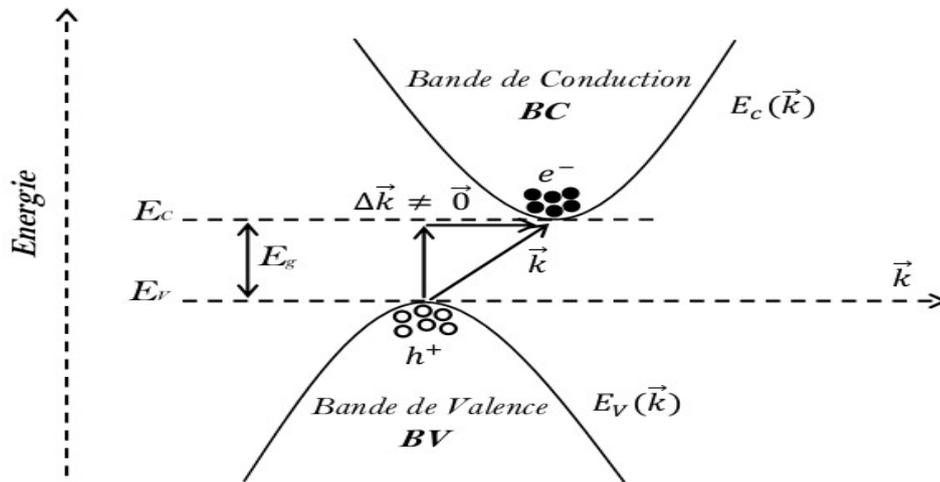
$\vec{p} = h\vec{k} = m\vec{v}$  : La quantité de mouvement.

$E_c(\vec{k})$  et  $E_v(\vec{k})$  sont respectivement les relations de dispersion dans la bande de conduction et la bande de valence.  $E_c$  et  $E_v$  sont respectivement l'énergie minimum de la bande de conduction et l'énergie maximum de la bande de valence.

### I.3.1.2 Semi-conducteurs intrinsèques à gap indirect :

Dans le cas des semi-conducteurs à gap indirect le minimum de la bande de conduction est situé à une distance  $\Delta \vec{k} \neq \vec{0}$  du maximum de la bande de valence dans la zone de Brillouin (ZB), voir figure I-4. La transition électronique entre le haut de la bande de valence (BV) et le bas de la bande de conduction (BC) est accompagnée par le changement de

la quantité de mouvement  $\Delta\vec{P}$ , c'est-à-dire le vecteur d'onde n'est pas conservé ( $\Delta\vec{k} \neq \vec{0}$  Et  $\Delta\vec{p} = h\Delta\vec{k} \neq \vec{0}$ ) [3]



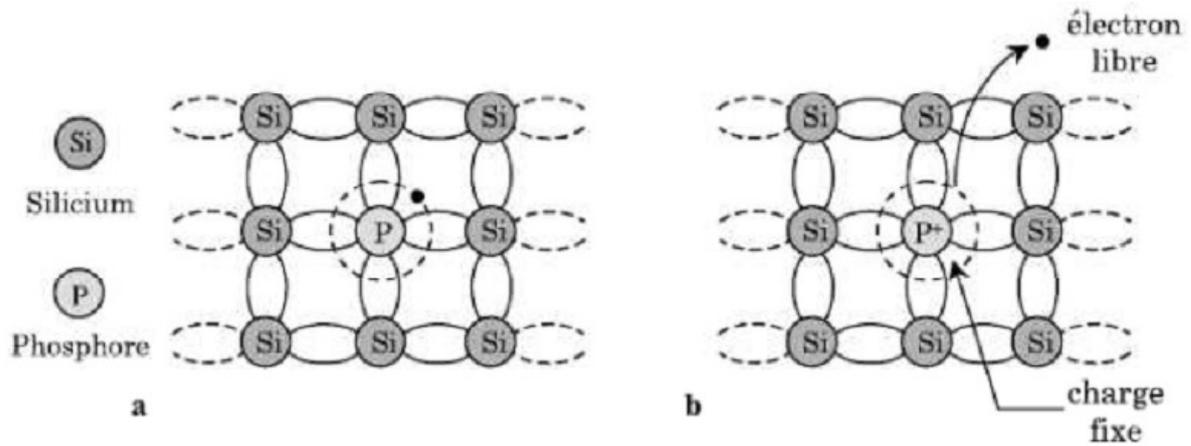
**Figure I-4 Semi-conducteurs à gap indirect [3]**

### I.3.2 Dopage des semi-conducteurs :

#### I.3.2.1 Semi-conducteur de type n :

Dans le Silicium pur, les quatre électrons de valence (2s et 2p) forment avec les atomes voisins quatre liaisons sp<sup>3</sup> covalentes, chaque liaison étant due à deux électrons dans le même état orbital mais de spin opposé. Introduisons un atome de la colonne V, par exemple un atome de phosphore (configuration électronique: 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>3</sup>), qui prend la place d'un atome de Si. Le phosphore possède cinq électrons de valence, quatre électrons vont former des liaisons covalentes avec les quatre atomes de Si voisins (voir figure I.5.a), l'électron supplémentaire n'est pas engagé dans une liaison covalente faite avec le reste du cristal, il est faiblement lié à un atome P qui porte une charge résiduelle positive, et que l'on peut considérer comme un ion P<sup>+</sup> (charge fixe). Un faible apport d'énergie (de l'ordre de 0,04 eV) dû par exemple à la température peut libérer cet électron de l'ion P<sup>+</sup>, lequel électron est susceptible de participer à la conduction électronique (voir figure I.5 .b). L'atome de phosphore est dit donneur car ionisé, il donne un électron de conduction. Ce phénomène correspond à l'apparition d'un niveau d'énergie E<sub>D</sub> situé dans la bande interdite tel que :

$$E_c - E_D \approx 0,04 \text{ eV} \quad [4]$$



**Figure I-5 Réseau de silicium avec un atome de phosphore en substitution. (a)  $T = 0 \text{ K}$ , (b)  $T > 0 \text{ K}$  [4]**

De cette façon et au fur et à mesure que  $T$  augmente, on arrive à créer un excédent d'électrons de plus en plus important par rapport à la situation d'équilibre (qui correspond initialement à un matériau semi-conducteur intrinsèque). Le matériau est alors appelé semi-conducteur de type n. [4]

### ***1.3.2.2 Semi-conducteur de type p :***

Dans ce cas les impuretés sont de type "accepteur d'électrons" et correspondent aux atomes de la colonne III du tableau périodique pour un cristal semi-conducteur de la colonne IV.

Introduisons par exemple dans le réseau du silicium un atome de bore (configuration électronique :  $1s^2 2s^2 2p^1$ ) qui appartient à la colonne III, cet atome possède donc trois électrons sur sa couche externe (couche de valence). La figure I-6 montre ce qui se passe dans ce cas : l'atome de bore se substitue à un atome de silicium et voit sur sa couche externe sept électrons, suite à son association avec quatre atomes Si voisins. Cependant une configuration sept électrons n'est pas stable et l'atome B cherche à capter un huitième électron d'un atome Si voisin, qui lui-même tentera d'en prendre à un autre atome voisin et ainsi de suite. Pour cela il faut un apport minimum d'énergie qui peut être fourni par les vibrations thermiques du cristal; le bore se trouve alors ionisé négativement (création d'un ion B<sup>-</sup>) avec libération d'un trou qui peut participer à la conduction électronique. Ce trou libre peut se déplacer d'atome en atome. Les trous libérés vont voir leur concentration augmenter rapidement avec la température et ce sont les porteurs de charge majoritaires; le matériau obtenu est appelé semi-conducteur de type p. [4]

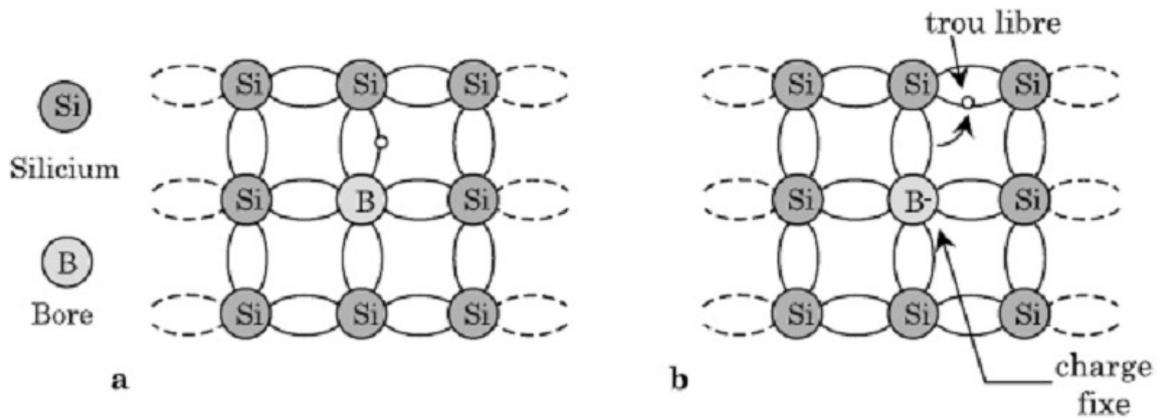


Figure I-6 Réseau de silicium avec un atome de bore en substitution. (a)  $T = 0 \text{ K}$ , (b)  $T > 0 \text{ K}$  [4]

### I.3.3 Les propriétés électro-optiques des semi-conducteurs :

#### I.3.3.1 L'absorption optique :

Soit un faisceau lumineux d'énergie  $E = h\nu$  arrivant à la surface d'un semi-conducteur. Une partie de ce faisceau est réfléchi. Selon la longueur d'onde, le faisceau incident traverse le cristal sans ou avec atténuation. L'intensité d'une onde lumineuse,  $I$ , décroît exponentiellement suivant la loi de Bouguer Lambert [5].

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (\text{I-2})$$

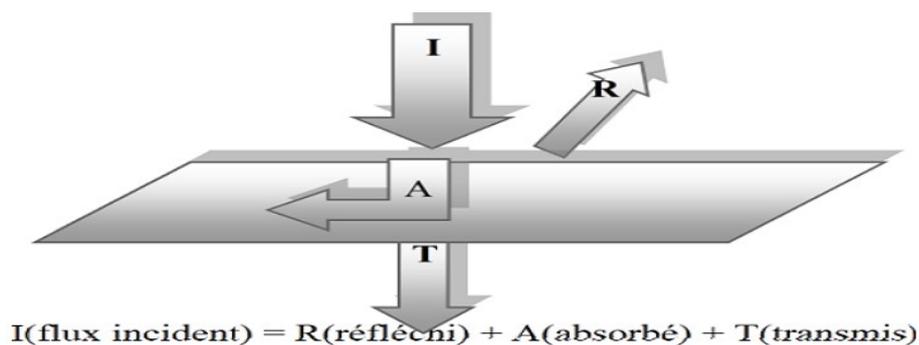


Figure I-7 Schéma représentatif de la Réflexion, la transmission et l'absorption

On définit le coefficient d'absorption noté  $\alpha$  qui peut être exprimé sous la forme [6]

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^\gamma \quad (\text{I-3})$$

Où  $\gamma$  est une constante dépendant de la nature des transitions.

### ***1.3.3.2 La génération électrons-trous :***

Le taux de génération des électron-trou dans un matériau semi-conducteur à une profondeur  $x$  de la surface, noté  $G(x, \lambda)$ , dépend de l'intensité lumineuse  $I(x)$ , et du coefficient d'absorption. Le taux de génération est donnée par l'expression suivante : [6]

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)(1 - R)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (I-4)$$

Où :  $F$  est le nombre des paires électron-trou photo générés par unité de surface ,par seconde et par unité de longueur d'onde (Flux solaire) .

$R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion.

### ***1.3.3.3 Courant de conduction dans les semi-conducteurs :***

Le semi-conducteur comporte toujours deux types de porteurs électron et trous, la densité de courant de dérive sous l'effet du champ électrique à pour expression :

$$J = \sigma \vec{E} \text{ Ou } \sigma = q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \quad (I-5)$$

$\sigma$  est la conductivité liée avec la résistivité donnée par la relation suivante :  $\rho = 1 / \sigma$

-Pour un semi-conducteur de type N [5] :

$$\vec{J}_n = q n \mu_n \vec{E} = q N_d \mu_n \vec{E} \quad (I-6)$$

-Dans le cas d'un semi-conducteur de type P [5] :

$$\vec{J}_p = q p \mu_p \vec{E} = q N_a \mu_p \vec{E} \quad (I-7)$$

### ***1.3.3.4 La diffusion dans les semi-conducteurs :***

Dans un semi-conducteur et en absence de tout champ électrique, il existe un phénomène de diffusion des porteurs de charge du à la répartition non uniforme de ces porteurs. Sous l'effet de cette inhomogénéité, les porteurs de charge (soient électrons ou trous) diffusent de la région de forte concentration vers celle de faible concentration.

Cette diffusion est régie par la première loi de Fick, reliant le flux de porteur au gradient de concentration.

Les densités de courants de diffusion des électrons et des trous, sont respectivement donnés par les relation suivantes : [5]

$$j_n = qD_n \overrightarrow{\text{grad}}(n) \quad (\text{I-8})$$

$$j_p = qD_p \overrightarrow{\text{grad}}(p) \quad (\text{I-9})$$

### ***1.3.3.5 La recombinaison de surface dans les semi-conducteurs :***

Les propriétés des matériaux semi-conducteurs dépendent en grande partie de l'état de leur surface . Les liaisons chimiques des atomes de surface étant incomplètes. La structure énergétique qui se trouve juste à la surface se caractérise par l'existence des états quantiques localisés près de la surface dont l'énergie se situe souvent dans la bande interdite.

La présence d'impuretés à la surface contribue, elle aussi, à la présence d'états de surface pouvant être des centres de recombinaison très efficaces. Le processus de recombinaison consiste en ce qu'un électron de la bande de conduction passe à un niveau de surface à la frontière du corps et ensuite dans la bande de valence en se recombinant avec un trou. La probabilité d'un tel processus est plus élevée que celle de passage direct de l'électron d'une bande à l'autre.

### ***1.3.3.6 La vitesse de recombinaison en surface (SRV) :***

La vitesse de recombinaison en surface, S, d'un semi-conducteur est un paramètre important dans la caractérisation des propriétés de surface des matériaux.

Elle décrit directement le taux de recombinaison des porteurs en excès via les états électronique de surface. Elle est déterminée principalement par l'imperfection et la contamination de la surface.

En pratique un décapage de la surface des matériaux diminue la valeur de S depuis de 100 fois. La continuité de la densité de courant aux surfaces limites du matériau semi-conducteur au point  $X=X_s$  (coordonnée de la surface), est donnée par les relations suivantes pour un semi-conducteurs de type p et de type n respectivement [6] .

$$-qD_p(\delta p_n | \delta x)_{x=x_s} = qS_p \Delta p(X_s) = qS_p(P_n(X_s) - P_{n_j}) \quad (\text{I-10})$$

$$-qD_n(\delta p_p|_{\delta x})_{x=x_s} = qS_n\Delta n(X_s) = qS_n(n_p(X_s) - n_{p_0}) \quad (\text{I-11})$$

Pour un semi-conducteur de type P Où  $S_p$  et  $S_n$  sont les vitesses de recombinaison en Surface des trous et des électrons respectivement. Le taux de recombinaison des électrons dans un semi-conducteur de type P et le taux de recombinaison des trous dans un semi-conducteur de type N est donné respectivement par les relations : [6]

$$U_p = \frac{P - P_0}{\tau_p} \quad (\text{I-12})$$

$$U_n = \frac{n - n_0}{\tau_n} \quad (\text{I-13})$$

La distance parcourue par un porteur pendant une durée de vie est appelée longueur de diffusion. La longueur de diffusion des électrons et celle des trous est donnée respectivement par les relations [6]:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (\text{I-14})$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (\text{I-15})$$

### I.4 L'effet photovoltaïque :

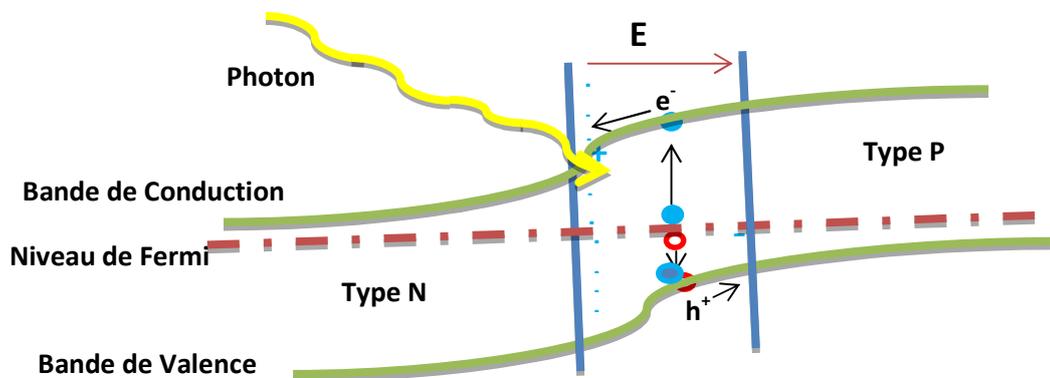
Le terme « photovoltaïque » fait référence à un effet du même nom, qui a été décrit pour la première fois en 1839 par Antoine Becquerel. Utilisé dans les cellules solaires, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction p-n a été formée [7]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue [8]. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite

communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Qui, dissociées, donnent naissance à des porteurs de charges mobiles. [9]

## I.5 Les cellules solaires

### I.5.1 Rappels de fonctionnement des cellules solaires :

Dans ce paragraphe, nous allons aborder le cas des matériaux utilisés dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ces matériaux clés sont des semi-conducteurs, à savoir des matériaux qui ont la capacité d'absorber une part du rayonnement solaire avec génération de paires électrons-trous résultant du passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Sous l'effet du champ électrique créé au niveau de la zone de charge d'espace de la jonction np, un courant électrique pourra alors s'établir sous irradiation, la paire électron-trou étant dissociée. Ce principe est largement utilisé dans les cellules solaires. Le principe du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque peut donc se résumer au schéma de la Figure I-7.



**Figure I-7 Principe simplifié d'une jonction p-n et application de cette jonction pour la séparation de charge**

Il suffit de raccorder la jonction p-n ainsi définie à un circuit extérieur pour l'alimenter en électricité. La jonction joue alors le rôle de générateur photoélectrique. Le rendement de la cellule photovoltaïque dépendra de la capacité des matériaux à absorber l'énergie solaire incidente, et de leur propension à générer des paires électron-trou qui, dissociées, donnent naissance à des porteurs de charges mobiles.

## I.5.2 Les caractéristiques des cellules solaires :

Plusieurs grandeurs permettent de juger des performances d'une cellule. Celles-ci sont accessibles lors d'un test en circuit fermé et sous illumination. La courbe  $I(V)$  obtenue a typiquement l'allure qui est décrite en Figure I-8. De cette courbe, on peut extraire le photo-potential de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) qui est la valeur de la différence de potentiel entre les deux électrodes à une valeur de courant nulle, le photo-courant de court-circuit ( $J_{SC}$ ) qui est la valeur de l'intensité maximum débitée dans le circuit quand la tension est nulle, la puissance maximale  $P_{max}$  délivrée par la cellule (puissance à laquelle sont associées une tension  $V_M$  et une intensité  $J_{M,}$ ) et le facteur de forme  $FF$  défini par la relation :

$$FF = \frac{J_{max} \cdot V_{max}}{J_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (I.16)$$

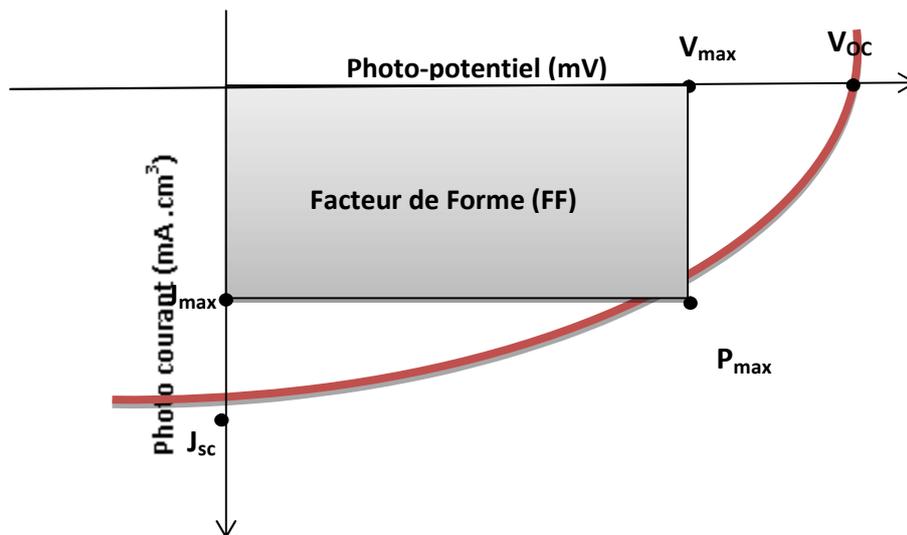


Figure I-8 Caractéristique courant/tension  $I(V)$  d'une cellule solaire.

Le facteur de forme traduit l'écart à l'idéalité de la cellule que l'on teste lorsqu'elle est comparée à un générateur de courant. Cela signifie que le pourcentage que l'on trouve par ce calcul permet de jauger de la qualité du dispositif.

Le rendement de conversion photovoltaïque en puissance  $\eta$  (%) des cellules photovoltaïques se définit comme le rapport entre la puissance maximale délivrée  $P_{in}$  est la puissance de l'excitation lumineuse incidente ( $P_s \sim 1000 \text{ W/m}^2$  pour un spectre standard AM1.5G). Tous les tests sont effectués à température ambiante [10].

Il est calculé d'après l'expression suivante :

$$\eta = \frac{FF \cdot J_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad (I.17)$$

# Chapitre I : L'état de l'art

Fortunado *et al* dressent un panorama des différentes utilisations des TCO pour les cellules solaires transparentes [11]. Principalement deux types de structures sont déposés :

- L'homojonction : structure réalisée à partir de 2 matériaux identiques mais de type différent.
- L'hétérojonction : structure réalisée à partir de 2 matériaux différents.

### I.5.3 Descriptifs des différentes générations

Trois de générations de cellules existent Selon Conibeer [12], chacune présente des nouveautés technologiques. Ces différentes générations sont classées par chronologie, en fonction des connaissances et des procédés techniques qui étaient disponibles au moment de leurs arrivées dans le domaine de la recherche. Le tableau I-1 rassemble toutes les propriétés et les performances des cellules visées par chacune des nouvelles générations.

Les différentes générations de cellules solaires sont répertoriées dans le tableau I-1.

		Structure	Réalisation	Avantages	Inconvénients	Utilisations
	<b>1<sup>ère</sup> génération</b>	monojonction	-Refroidissement de Si fondu (Si mono et poly cristallin ou en ruban)	-Haute mobilité des porteurs de charges - $\eta=20\%$	production coûteuse et énergivore	85% de l'ensemble des installations solaires dans le monde
	<b>2<sup>ème</sup> générations</b>		-Dépôt par les techniques des couches minces -cellules à base de Si amorphe, de CdTe et de CIGS (Cuivre-Indium-Gallium Sélénium) .	-une réduction des coûts de production, - $\eta=16\%$ -Substrats Moins coûteux	composition avec des éléments toxiques	Depuis les années 2000, Cellules commercialisées et concurrencées.
<b>3<sup>ème</sup> génération</b>	<b>1<sup>ère</sup> Tech</b>	Multi-jonctions,	Association de nombreux matériaux (Différents gap optique)	-Absorption et conversion (grande partie du spectre solaire). - $\eta = (35\% \text{ à } 50\%)$ .		le domaine spatial
	<b>2<sup>ème</sup> Tech</b>		A base de nanomatériaux	-Absorption d'une large partie du spectre Solaire		Encore au stade de recherche
	<b>3<sup>ème</sup> Tech</b>		A base de matériaux Organiques	-un coût de production faible - Possibilité d'être transparente.	$\eta$ plus faible (8.13%)	-visant des applications «jetables» -commencent à être commercialisées

**Tableau I-1 : L'ensemble des propriétés des cellules solaires divisées en trois générations**

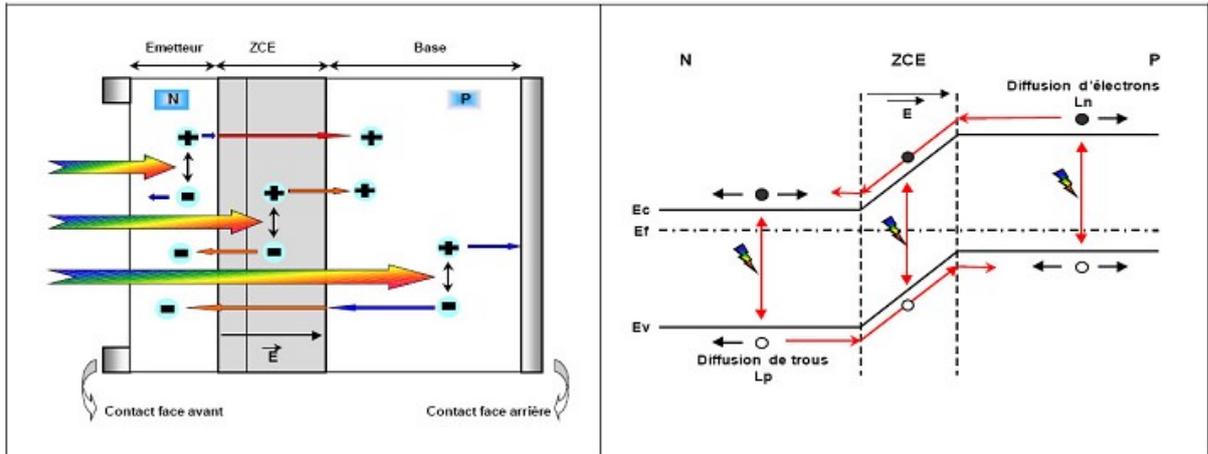
### I.6 Fonctionnement d'une cellule solaire à base de silicium :

Le fonctionnement d'une cellule solaire est comme suit : Il s'agit de l'absorption de photons par un matériau, qui convertit cette énergie lumineuse en énergie électrique. Dans le cas qui nous intéresse, le matériau utilisé est un semi-conducteur, à savoir le silicium. La source d'énergie lumineuse est le soleil. Les photons absorbés créent une paire électron-trou, les porteurs de charges ainsi photo-générés sont ensuite séparés et collectés vers un circuit extérieur.

Dans la cellule solaire, la séparation des porteurs de charges se fait grâce à la jonction pn (Figure I-9). Il s'agit de la juxtaposition de silicium avec un excès de trous (ou un défaut d'électrons) dû au dopage par un élément de la colonne III du tableau périodique, le silicium type p, avec du silicium de type n, qui comporte un excès d'électrons en raison du dopage par un élément de la colonne V. Généralement, la zone de type p est uniformément dopée au bore à hauteur de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et forme la quasi-totalité de l'épaisseur de la plaquette, tandis que la zone de type n est fortement dopée au phosphore (densité de dopant supérieure à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ). [13]

Ces deux zones forment respectivement la base et l'émetteur de la cellule. La juxtaposition des zones p et n forme un champ électrique qui repousse les électrons vers la zone n et les trous vers la zone de type p. A la jonction de ces deux parties, il y a alors une déplétion en porteurs de charge, c'est la zone de charge d'espace (ZCE).

Lors de l'absorption d'un photon, un électron de la bande de valence du semi-conducteur va être excité et se retrouver en bande de conduction, laissant un défaut d'électron dans la bande de valence. Deux porteurs de charge mobiles sont donc générés, l'électron et le trou. Si cela se produit hors de la ZCE, les porteurs minoritaires (électrons dans le type p et trous dans le type n) vont diffuser dans le matériau jusqu'à se recombiner ou arriver à la ZCE. Si un porteur se trouve dans la ZCE que ce soit parce qu'il a été généré ou qu'il s'est déplacé jusque-là, le champ électrique le poussera vers la zone où il sera majoritaire : les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p. Les charges sont ensuite collectées par des contacts métalliques sur les faces avant et arrière de la cellule. Un courant est ainsi généré par la cellule. [13]



**Figure I-9 : Structure d'une cellule (à gauche) et son diagramme de bande (à droite) [16]**

### I.6.1 Description de la cellule idéale :

Les performances d'une cellule solaire sont principalement évaluées à partir de sa caractéristique courant-tension sous un éclairage normalisé (spectre solaire AM1.5G, d'une puissance de 1000 W/m<sup>2</sup>, à 25°C). [13]

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit : [14]

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (I-18).$$

Avec :  $I_{ph}$  : densité de courant photogénéré et  $I_{obsc}$  : densité de courant d'obscurité Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (I-19) peut être écrite sous la forme suivante : [14]

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (I-19).$$

Avec:  $I_s$  : courant de saturation de la diode,  $q$  : charge élémentaire,  $k$  : constante de Boltzmann,  $T$  : température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairage 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 I-10.

A partir de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule notamment : [14]

## Chapitre I : L'état de l'art

$I_{CC}$ : 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

$\eta$  : rendement de conversion ;

FF : facteur de forme.

$\eta = (\text{Puissance électrique maximale fournie}) / (\text{Puissance solaire incidente})$ :

$$\eta \frac{V_m \cdot I_m}{P_i \cdot S} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i \cdot S} \quad (I-20)$$

Avec  $P_i$  : puissance d'éclairement reçue par unité de surface ;  $S$  : surface de la cellule photovoltaïque.

FF = (Puissance maximale délivrée sur la charge) / ( $V_{co} \cdot I_{cc}$ ) : [14]

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I-21)$$

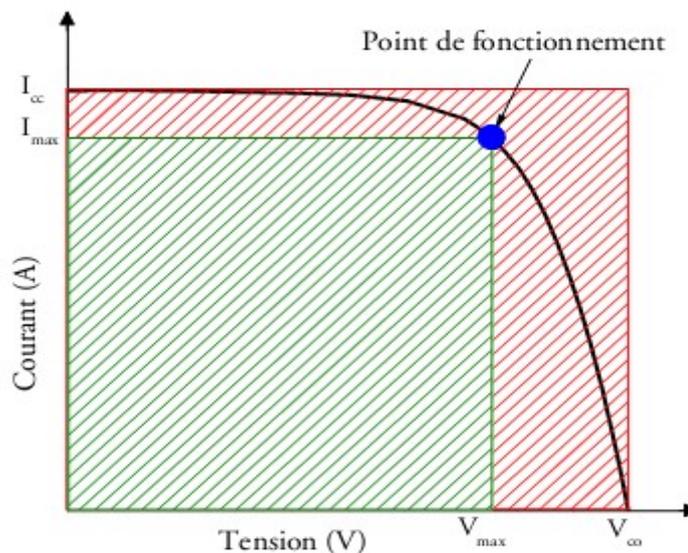
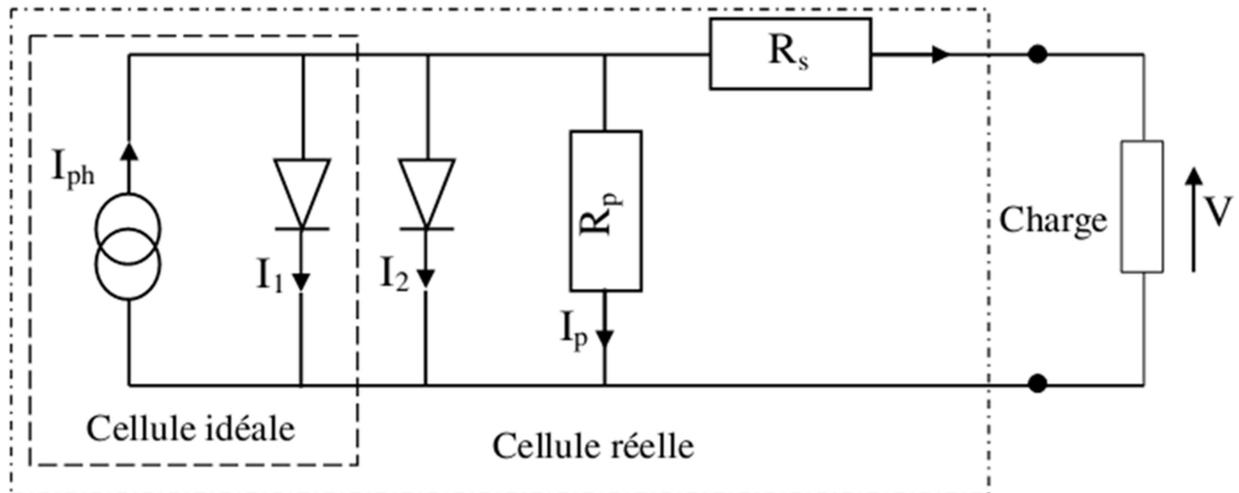


Figure I-10 Caractéristique courant-tension sous éclairement typique d'une cellule solaire [13].

## I.6.2 Schéma électrique équivalent :

L'équation (I) correspond à un cas idéal du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une résistance série et une résistance parallèle. Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant voir figure I-11 [15]



**Figure I-11 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.**

L'équation du courant devient : [15]

$$I = I_1 + I_2 + I_p - I_{ph} \quad (I-22)$$

$$I = I_{01} \left( \exp \left( \frac{q(V-IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left( \exp \left( \frac{q(V-IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (I-23)$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photo-généré  $I_{ph}$ . La première diode (facteur d'idéalité  $n_1 = 1$ ) correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur.  $I_{01}$  est le courant de saturation de ce phénomène.  $I_2$  est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec  $I_{02}$  le courant de saturation et  $n_2$  le facteur d'idéalité de la seconde diode ( $n_2 = 2$ ).

Afin de modéliser les courants de fuite existant dans la structure, la résistance parallèle  $R_p$  est ajoutée. Ces courants de fuite peuvent avoir lieu par exemple sur les bords de la cellule ou à travers l'émetteur. La résistance parallèle doit être la plus élevée possible. La résistance série  $R_s$  modélise les pertes résistives dans la structure (base et émetteur), les résistances de contact aux

interfaces métal/semi-conducteur et celles du métal à proprement parler. Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule,  $R_s$  doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semi-conducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs : un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes. Les valeurs de résistivité retenues sont comprises en général entre 0.5 et 5  $\Omega \cdot \text{cm}$  pour le substrat initial. [15]

### I.6.3 Les pertes physiques et technologiques :

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en prenant en compte les facteurs de pertes donné par la relation :

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} p(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda} * \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda} * \frac{qV}{E_g} * FF * (1 - R) * \frac{S - S_{\text{métal}}}{S} * \eta_{\alpha} * \eta_{\text{col}} \quad (\text{I-24}).$$

Les différents facteurs de pertes, cités ci-dessous, sont dus soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix technologiques appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau. [15]

#### I.6.3.1 Pertes physiques :

##### I.6.3.1.a Pertes dues aux photons de grande longueur d'onde :

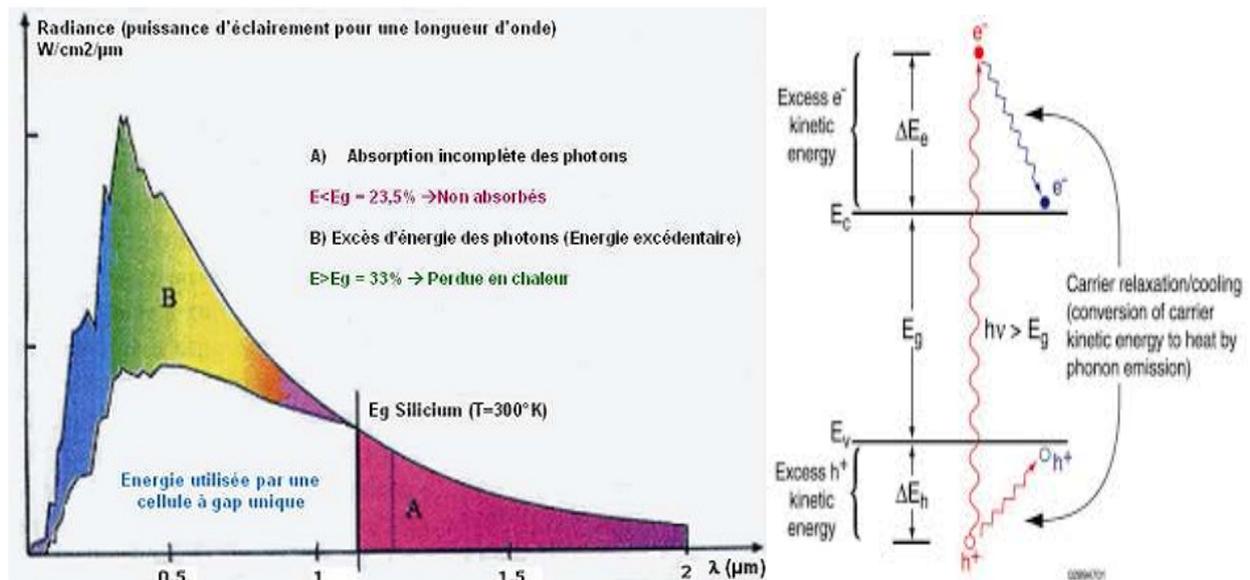
Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ( $\lambda > \lambda_g$ ) ne peuvent générer de paire électron/trou et sont donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par phonons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondant 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). Sous un éclairage d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium. [16]

##### I.6.3.1.b 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 voir figure I-12. Sous un éclairage d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium. [16] Les valeurs obtenues de  $V_{oc}$  sont de l'ordre de 700 mV, donnant pour ces cellules à haut rendement un facteur de tension de seulement 0.65.

# Chapitre I : L'état de l'art

Les équations courant-tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ( $\exp [qV/kT]$ ). La courbe  $I(V)$  ne peut donc avoir une forme rectangulaire et même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 0.89 .Ce terme dépend également des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle [11]. Le rendement est donc limité par ces différents facteurs à une valeur théorique maximale. D'après les travaux de Schokley et Quiesser, une limite d'environ 30% peut être démontrée, valeur qui a été affinée depuis à 29% .De nouveaux concepts dits de 3<sup>ème</sup> génération permettraient cependant de contourner cette limite théorique en exploitant notamment les photons de hautes et basses énergies (facteurs A et B). Comme illustré par la figure I-12, ces deux phénomènes entraînent une chute du rendement maximal à 44% et de nombreuses recherches sont menées afin de développer des systèmes offrant une meilleure conversion énergétique. [16]



**Figure I-12 Principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium. (A) Pertes des photons de grandes longueurs d'onde. (B) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons. L'insert illustre le phénomène de thermalisation [17] [16].**

## ***I.6.3.2 Pertes technologiques :***

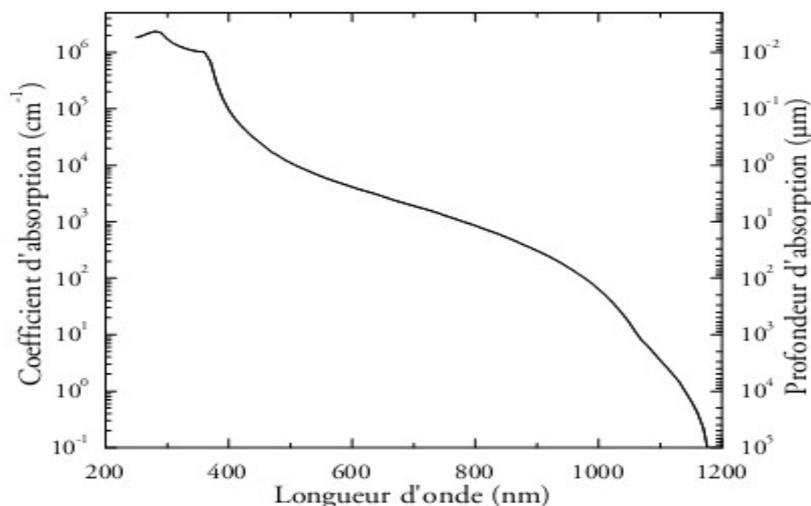
### ***I.6.3.2.a Les pertes optiques :***

Elles proviennent de photons qui ne sont pas absorbés par le silicium, malgré leur énergie supérieure au gap. Il en résulte principalement une réduction du courant de la cellule.

- ❖ La collecte des porteurs en face avant utilise une grille de métal. Cette grille n'étant pas transparente, elle cause de l'ombre sur la cellule et donc des zones où aucun photon ne

pourra pénétrer. Pour cette raison, on essaie de minimiser la surface de cette grille. Cependant, si elle est trop faible, cela créera des pertes résistives, on cherche donc un compromis.

- ❖ L'indice de réfraction optique du silicium est beaucoup plus élevé que celui de l'air, ce qui cause une réflexion importante. Elle est atténuée par une texturisation de face avant, qui modifie l'angle incident de la lumière et favorise la possibilité pour le rayon réfléchi d'arriver une seconde fois à l'interface avec la cellule. Un autre moyen de l'atténuer est d'effectuer une adaptation d'indice, par un dépôt de diélectrique en face avant, mais aussi pour un module par le biais du verre et de l'encapsulant.
- ❖ La profondeur d'absorption des photons de grandes longueurs d'onde est supérieure à l'épaisseur de la cellule voir figure I-13. Cela signifie que le silicium est partiellement transparent pour ces photons. Un confinement optique peut alors être utilisé pour réduire cette perte [13].



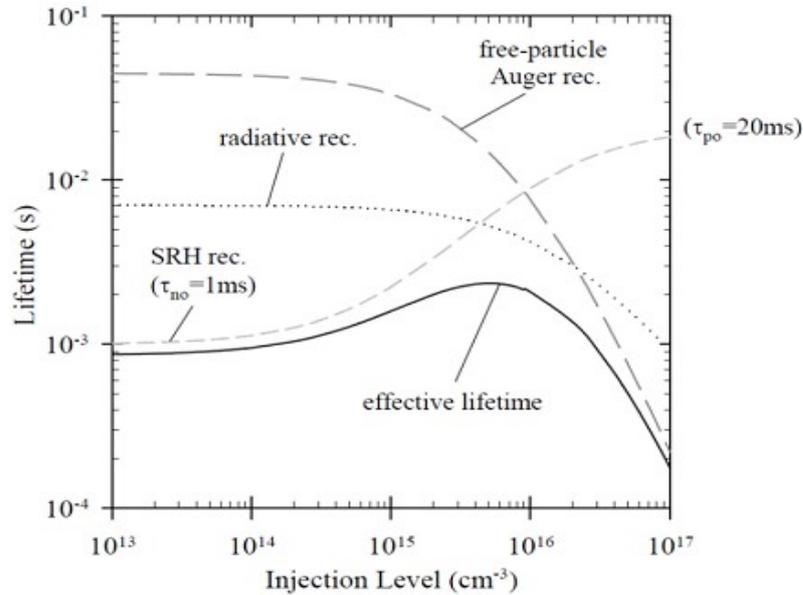
**Figure I-13 Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration de la lumière dans le silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde à 300K. [13]**

### *1.6.3.2.b Les pertes par recombinaison :*

Une fois que la paire électron-trou est formée par absorption d'un photon, les porteurs de charge doivent migrer vers la ZCE et vers les zones de collecte. En chemin, il est possible qu'un électron et un trou s'assemblent : c'est la recombinaison. Les porteurs de charge sont alors perdus, ils ne pourront pas être collectés pour être utilisés au circuit. Le temps et la distance parcourus par un porteur avant d'être recombiné sont caractérisés par leur durée de vie et

leur longueur de diffusion . Il existe différents mécanismes de recombinaison, leur importance relative est donnée dans la figure I-14.

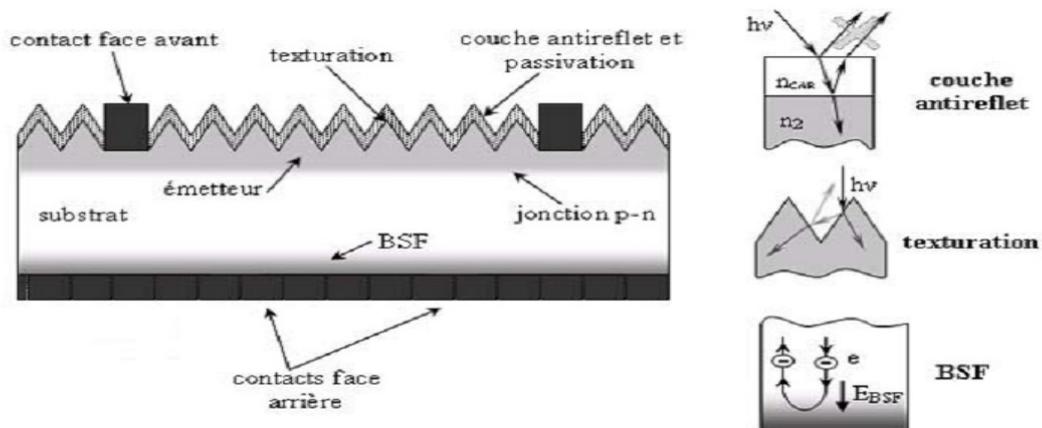
- La recombinaison radiative est le procédé inverse à la photo-génération : un électron et un trou se recombinent pour donner un photon ayant une énergie égale au gap du silicium. Dans les conditions de fonctionnement des cellules en silicium, ce mode de recombinaison est négligeable.
- La recombinaison Auger est un phénomène à trois particules : l'énergie de la recombinaison bande à bande de l'électron et du trou va être transférée à un électron de la bande de conduction ou à un trou de la bande de valence. Cette énergie est par la suite dissipée par thermalisation. L'influence de ce type de recombinaison n'est significative qu'à haut niveau d'injection, comme pour les cellules sous lumière concentrée, ou à haut niveau de dopage, comme dans les émetteurs. La durée de vie des porteurs varie alors avec la densité de porteurs.
- La recombinaison en volume due aux défauts, ou recombinaison SRH pour Shockley-Read-Hall. Les défauts cristallins et les impuretés créent des niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite .Ces niveaux facilitent la recombinaison par un mécanisme en deux étapes. Un électron va par exemple se relaxer de la bande de conduction vers le niveau discret puis à nouveau vers la bande de valence pour se recombiner avec un trou. C'est pour cette raison que les impuretés et défauts cristallins sont à éviter dans une cellule solaire. Les joints de grains sont également des zones très recombinantes par ce mécanisme.
- La recombinaison de surface est elle aussi due aux défauts. En surface, la discontinuité du milieu cristallin cause la présence de nombreuses liaisons pendantes, qui sont autant de niveaux intermédiaires dans la bande interdite, et causent des recombinaisons par le Mécanisme en deux étapes mentionné ci-dessus. Ces défauts sont passivés de deux façons. D'une part, les états d'interfaces sont neutralisés en supprimant les liaisons pendantes par l'ajout d'un diélectrique qui assure la continuité des liaisons. D'autre part, en utilisant un effet de champ, les porteurs sont repoussés du voisinage de la surface et ne peuvent donc pas s'y recombiner. Ceci est réalisé par un dopage localement plus élevé (Front- ou Back Surface Field), ou bien par un diélectrique chargé, qui engendre une couche d'accumulation ou d'inversion. [13]



**Figure I-14 Contribution des recombinaisons radiatives, La recombinaison Auger et La recombinaison en volume SRH sur la durée de vie effective des porteurs minoritaires en volume, en fonction du niveau d'injection. [13]**

## I.7 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque :

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure I-15.



**Figure I-15 Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium. [14]**

### I.7.1 Passivation des faces avant et arrière :

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en

surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x : \text{H}$ ). [14]

### I.7.2 Couche antireflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure I-15). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2.N + 1).\lambda}{4.n_{CAR}} \quad N = 0, 1, 2, 3... \quad (\text{I-24})$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque :  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}$ ,  $\text{SiN}_x$ , etc. [14]

### I.7.3 Texturation de la surface :

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées. Par conséquent, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

### I.7.4 Contacts face avant et arrière :

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi-cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées [14].

### **I.7.5 BSF**

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure I-15). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée [14].

## **I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

### **I.8.1 Avantage :**

Une haute fiabilité car les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs, Elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;

Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore olfactive [18].

### **I.8.2 Inconvénients :**

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;

L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;

Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %) ;

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées ;

## Chapitre I : L'état de l'art

---

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.[18]

### Référence :

- [1] OleksiyNichiporuk / Thèse en physique / 2005 / INSA de Lyon « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités.
- [2] A.Chovet&P.Masson: «physique des semi-conducteurs», ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE, 2004/2005.
- [3] «Dr. AH. SOUICI », Cours Physique des Semi-conducteurs : 2013-2014, Université de Béjaia, Algérie
- [4] «Pr. Hajzoubir » Cours Physique des Semi-conducteurs CHAPITRE II : PROPRIETES ELECTRIQUES «Pr. Hajzoubir » Université Ibn Khaldoun tiaret
- [5] H. Mathieu. «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques», Dunod, Paris, 2009
- [6] S. M. Sze, Physics of semi-conductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by John,Wiley and Son, Inc
- [7] Sato. H. et al. Thin Solid Films, 1993. 236: p. 27.
- [8] Fujii. E , et al., Jpn. J. Appl. Phys. Lett., 1996. 35( L328).
- [9] Nuli, Y.-N., S.-L. Zhao, and Q.-Z. Qin, J. Power Sources, 2003. 114(113).
- [10] *Standard Test Conditions (STC) in the Photovoltaic (PV) Industry, in [http://www.imtsolar.com/public/files/IMT%20Solar\\_STC%20for%20PV%20APP%20NOTE.pdf](http://www.imtsolar.com/public/files/IMT%20Solar_STC%20for%20PV%20APP%20NOTE.pdf).*
- [11]: E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D. C.Paine, *Conducting Oxides for Photovoltaics*,MRS Bulletin, vol. 32, 2007
- [12] D. S. Ginley, C. Bright, *MRS Bulletin* 2000, 25, 15.
- [13] [G. Maïlys], [2012], INSA de Lyon. Thèse « Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres ».
- [14] « OleksiyNichiporuk »,2005 / INSA de Lyon. Thèse en physique :( Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités).

## Chapitre I : L'état de l'art

---

[15] «Jean-François LELIEVRE » (INSA de Lyon)-2007 Thèse : Elaboration de SiNx:H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques.

[16] « YEZID Ali ».université Abou-Bekr BELKAÏD-Tlemcen-2011 Mémoire De Magister - thème : optimisations des cellules solaires conventionnelle à base de silicium de type N.

[17] « YESREF Djamel » université Abou-Bekr BELKAÏD- Tlemcen-2013. Mémoire de Magister-thème : Optimisation d'une cellule solaire à base du silicium poly cristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique.

[18] « BOUAFIA MOUNIR et DEBLAOUI LAID ».Mémoire master thème : Modélisation et simulation d'une cellule solaire encouche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indiumet de Gallium « CIGS ».Université KasdiMerbah–Ouargla-2012.

**CHAPITRE II :**  
**LE SILICIUM EN COUCHE MINCE**

### II-1 Introduction :

Ce chapitre vise à exposer les notions essentielles à la compréhension du sujet dans sa globalité avant d'aborder plus en détail les travaux effectués dans le cadre de ce travail. Après avoir présenté succinctement les différentes filières photovoltaïques et détaillé, en particulier, la filière du Si massif avec la présentation des principaux procédés de purification, de cristallisation et de découpe des plaquettes, la filière des couches minces en Si cristallin est présentée. Les problématiques, que pose cette technologie, sont mises en évidence : à savoir le choix de l'épaisseur de la couche mince, du substrat

### II-2 Les filières technologiques du photovoltaïque :

Durant ces 20 dernières années, grâce aux efforts accrus et soutenus de la recherche et du développement, les technologies photovoltaïques (PV) ont considérablement amélioré leurs performances, réduit leurs coûts et accéléré leurs transferts dans l'industrie. Aujourd'hui, les technologies PV sont mûres et sont reconnues comme une solution au défi énergétique et une composante essentielle de la production d'énergie mondiale. Actuellement, la recherche se concentre sur l'augmentation du rendement et de la durée de vie, tout en réduisant les coûts de fabrication. Pour cela, elle tente de réduire les facteurs de pertes liés à des limitations propres au matériau et à la technologie d'élaboration de la cellule. L'industrie PV repose à près de 92% sur l'utilisation du silicium (Si) comme matériau de base [1] contre 99% en 2004 [2]. Ainsi, depuis 10 ans, différentes technologies PV se sont déployées sur le marché. Elles sont à des niveaux différents de développement. Certaines sont commercialisées et d'autres sont encore au stade d'études. Ces technologies sont regroupées actuellement en trois catégories qui se classent également suivant la 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération : le Si cristallin (c-Si), les couches minces et les technologies émergentes, incluant le PV à concentration, les cellules organiques et d'autres concepts originaux. Le Si cristallin est de loin le matériau le plus utilisé sur le marché et couvre près de 91% de la production mondiale suivi par les couches minces : 9%. Parmi les couches minces, le marché concerne essentiellement le Si amorphe, le CdTe et le CuInGaSe. Parmi les technologies émergentes, les cellules organiques et les cellules à concentrations (CPV) viennent d'entrer sur le marché et devraient s'accroître d'ici 2020 (quelques %)

Dans la partie suivante, une vue d'ensemble sur les technologies PV d'aujourd'hui et leurs performances est exposée en commençant par les filières technologiques alternatives au Si cristallin (Tableau I.1). La filière Si qui domine le marché est abordé de façon plus détaillée.

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

Filière	matériaux	Cellule / module	Surface Active (cm <sup>2</sup> )	Rendement (%)	chercheurs	Référence
Le silicium cristallin	Si mono (cellule 4cm <sup>2</sup> )	cellule	4	24.7	UNSW	ZHA099
	Si mono (module 15775 cm <sup>2</sup> )	Module	15775	22.4	Sunpower	COUSINS10
	Si mult (cellule 1cm <sup>2</sup> )	cellule	1	20.4	Fraunhofer ISE	SCHULTZ04
	Si multi (module 14661 cm <sup>2</sup> )	Module	14661	18.5	Q-cells	PVTECH12
	Si quasi mono (cellule 243cm <sup>2</sup> )	cellule	243	18.8	INES	VESCHETTI13
	Si ruban (cellule 2cm <sup>2</sup> )	cellule	2	16	Solar Force	DEMORO13
Les couches minces	Si mono (transfert de film) (cellule 243cm <sup>2</sup> )	cellule	243	20.4	Solexel	KAPUR13
	Si polycristallin (module 661cm <sup>2</sup> )	Module	661	8.2	Pacific Solar	BASORE02
	Si amorphe : $\mu$ c-Si:H (cellule 1cm <sup>2</sup> )	cellule	1	10.7	EPFL, neuchatel	HANNI13
	a-Si / $\mu$ c-Si (cellule 1cm <sup>2</sup> )	cellule	1	13.4	LG Electronics	YOU13
	a-Si /a-Si (module 14316 cm <sup>2</sup> )	Module	14316	10.5		YOU13
	CdTe (cellule 1 cm <sup>2</sup> )	cellule	1	19.6	GE Global Research	TIWARI13
	CdTe (module 7200 cm <sup>2</sup> )	module	7200	16.1	First solar	FIRSTSOLAR13
	CIGS (1cm <sup>2</sup> )	cellule	1	19.6	NREL	REPINS08
	CIGS (module 9703 cm <sup>2</sup> )	Module	9703	15.5	Miasole	MIASOLE12
Les technologies émergentes	Photosensible (cellule 1cm <sup>2</sup> )	cellule	1	11.9	Sharp	KOMIYA11
	Organique (cellule 1cm <sup>2</sup> )	cellule	1	10.7	Mitsubishi chemical	SCIENCE11
	GaAs (cellule 1cm <sup>2</sup> )	cellule	1	27.6	Alta devices	KAYES11
	GaAs (cellule 859 cm <sup>2</sup> )	Module	859	23.5		MATTOS12
	InGaP/GaAs /InGaAs (CPV) (cellule 0.16cm <sup>2</sup> )	cellule	0.16	44.4	Sharp	BETT13

**Tableau I-1 Meilleurs rendements des cellules et modules mesurés sous le spectre AM1,5 (1000W/m<sup>2</sup>) à 25°C sur l'année 2013 pour les différentes filières technologiques [3].**

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la figure II-1. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, amorphe) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince [4].

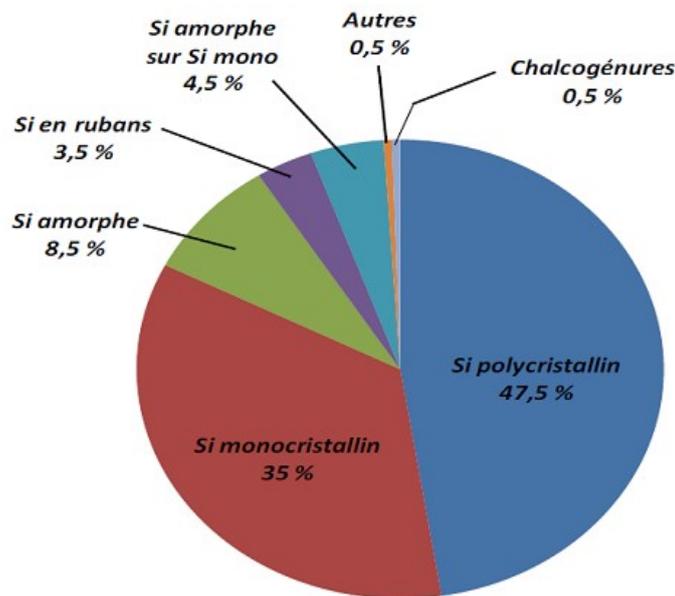


Figure II-1 Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [4].

### II-3 Définition d'une « couche mince » :

Il est important de bien définir le terme de « couche ou film mince » pour applications PV. Chopra et al. Donnent une définition précise des couches minces dans le cas des technologies solaires et présentent les critères permettant de différencier une couche « mince » d'une couche « épaisse » [5]. Ils définissent une couche mince comme un matériau créé par un procédé de croissance et une germination aléatoire d'espèces atomiques/ioniques/moléculaires, réactives/condensées, sur un substrat. Les propriétés structurales, chimiques et physiques d'un tel matériau, dépendent fortement des paramètres du procédé de dépôt et dépendent de son épaisseur. De manière générale, les technologies couches minces recouvrent l'utilisation de matériaux dont l'épaisseur varie de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres. Le second critère qui permet de définir un film mince est le matériau d'absorption. Conventionnellement, les matériaux absorbants sont des semi-

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

---

conducteurs inorganiques. Idéalement, le matériau absorbant pour la réalisation d'une cellule solaire doit être un semi-conducteur avec une largeur de bande interdite comprise entre 1 et 1,5eV, avec une absorption élevée ( $10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) dans la région de longueur d'onde 350 - 1000 nm, un rendement quantique élevé pour les porteurs excités, une longueur de diffusion importante et une vitesse de recombinaison lente. Si ces conditions sont remplies et que le matériau est abondant, alors il permet, en principe, de fabriquer des cellules solaires en couches minces.

### II-4 Le silicium monocristallin en couche mince :

Le silicium pur est un matériau semi-conducteur utilisé pour la fabrication des cellules cristallines. Pour la fabrication d'une cellule en silicium monocristallin, le silicium est fondu puis solidifié en un seul et grand cristal. Ce cristal est découpé en tranches pour la fabrication des cellules. Les cellules sont ensuite enveloppées dans du plastique ou du verre. Elles ont un aspect bleu uniforme. La production de ce type de cellule est assurée par de nombreux fabricants. Leur rendement énergétique est élevé en plein soleil (entre 14 et 16%, et jusqu'à 20% pour certains modèles), sachant que le rendement d'une cellule photovoltaïque correspondant au ratio entre l'énergie lumineuse reçue et l'électricité produite. Elles ont une longue durée de vie (30ans).

Ces cellules occupent peu d'espace en raison de leur bon ration : environ  $150 \text{ Wc/m}^2$  (le watt crête étant l'unité utilisée pour mesurer la puissance d'un panneau photovoltaïque dans des conditions standards : ensoleillement de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , température des cellules de 25 degrés). Mais le prix des cellules en silicium monocristallin est élevé car leur fabrication requiert beaucoup de silicium, disposé en une couche épaisse.

De plus leur rendement est moins bon quand la température dépasse 25 degrés et quand la luminosité est faible [6].



**Figure II-2 Schéma représentatif d'une plaque de silicium monocristallin [6].**

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

Il est généralement obtenu par trois méthodes principales :

### II-4.1 La méthode de Czochralski :

Pour le procédé Czochralski ou Cz, un germe de silicium monocristallin est plongé dans le bain de silicium légèrement surfondu et le silicium du bain est épitaxié sur ce germe voir figure II-3. Le lingot et le creuset contenant le silicium liquide sont en rotation dans les sens opposés. Le lingot qui se forme est tiré vers le haut à une vitesse d'une dizaine de centimètres par heure. On obtient ainsi un lingot de section circulaire. Ses flancs sont ensuite découpés pour obtenir une forme pseudo-carrée qui permettra une meilleure compaction des cellules dans le module, tout en évitant d'éliminer une trop grande quantité de matière. [7]

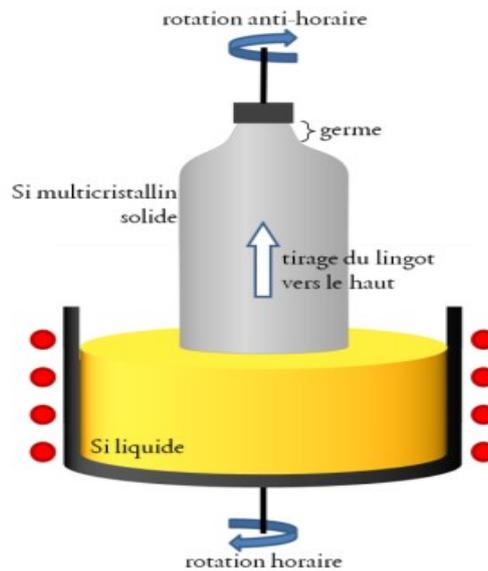


Figure II-3 Schéma représentatif la méthode de Czochralski [7].

Des monocristaux de silicium de grand diamètre ( $> 10\text{cm}$ ) et d'une longueur considérable ( $> 1\text{m}$ ) peuvent être produits industriellement par cette méthode comme le montre la figure II-4



Figure II-4 Schéma représentatif des lingots de Si monocristallin [8].

### II-4 .2 La méthode de Bridgman :

Le second procédé est celui de la solidification directionnelle. Le silicium est fondu dans un lingot et refroidi de bas en haut, soit en déplaçant le creuset hors du four (méthode Bridgman, voir figure II-5, soit en ouvrant le four par le bas, soit en créant un gradient de température à l'intérieur du four. Dans tous les cas, le silicium commence à cristalliser par le bas et le front de cristallisation se déplace vers le haut. On obtient alors un lingot de section horizontale carrée dont les grains sont allongés selon la direction verticale.

La matière proche de la surface du lingot est sciée et écartée car elle contient plus d'impuretés. Le lingot est ensuite découpé verticalement en briques de section carrée égale à la surface des cellules finales [7]

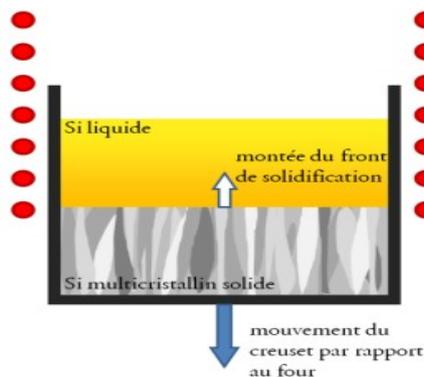


Figure II-5 Schéma représentatif de la méthode de Bridgman [7].

### II-4 .3 Méthode de la zone flottante (FZ) :

Cette méthode nous permet d'obtenir des diamètres jusqu'à 100mm. Dans la méthode de la zone flottante, il n'y a pas de creuset, ce qui permet de résoudre en même temps les problèmes de contraintes que ceux qui résultent d'une haute réactivité de matériaux ou de contamination par les impuretés contenues dans le creuset. Un barreau poly-cristallin du matériau semi-conducteur silicium disposé verticalement est chauffé localement par induction jusqu'à ce qu'il soit formée une étroite zone fondue qui reste stable entre les deux parties solides du barreau par effet de capillarité. Le déplacement lent de l'enroulement chauffant s'accompagne de celui de la zone flottante par fusion du silicium poly-cristallin d'un côté et par cristallisation de l'autre. Comme dans les méthodes précédentes, un germe convenablement taillé, placé à l'extrémité du barreau permet d'amorcer et d'orienter la croissance du cristal selon la direction cristallographique voulue, comme est présenté sur la figure II-6.

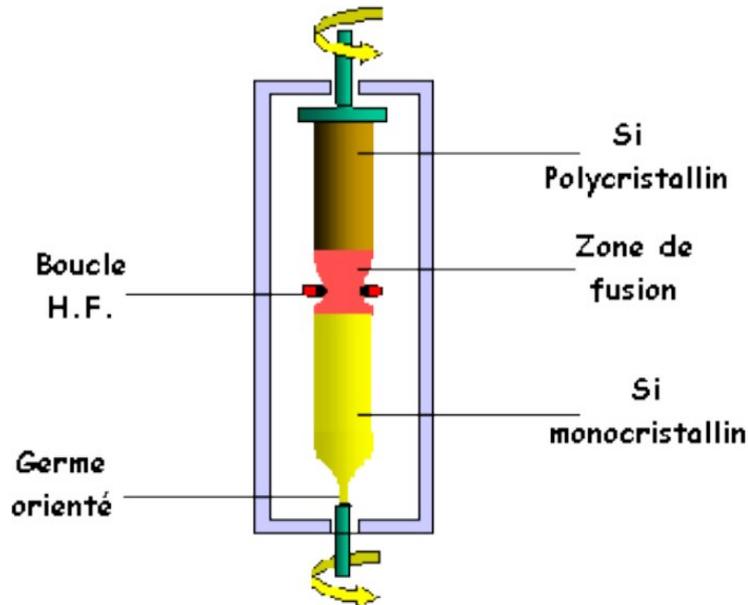


Figure II-6 Schéma représentatif de la méthode de la zone flottante (FZ) [8].

Les lingots vont être découpés en tranches qui seront ensuite polies pour pouvoir être utilisés dans l'industrie électronique comme est illustré sur la figure II-7 .



Figure II-7 Schéma représentatif du découpage de lingot [8].

La découpe est effectuée par des séries à bol diamanté. Elle se présente sous forme d'un large disque qui est animé d'un mouvement de rotation rapide environ (4000tr/mn) et de translation. L'opération de découpe est habituellement automatisée et l'ordre de découpe d'une plaque est d'une minute. Dans ce cas l'épaisseur d'une plaque est de 200 à 500  $\mu\text{m}$  suivant le diamètre du cristal. La partie perdue par le passage de la lame est d'environ 300 $\mu\text{m}$ . Toutes les plaques vont subir un polissage chimique pour éliminer toute perturbation en surface [8].

### II-5 Le silicium poly-cristallin en couche mince :

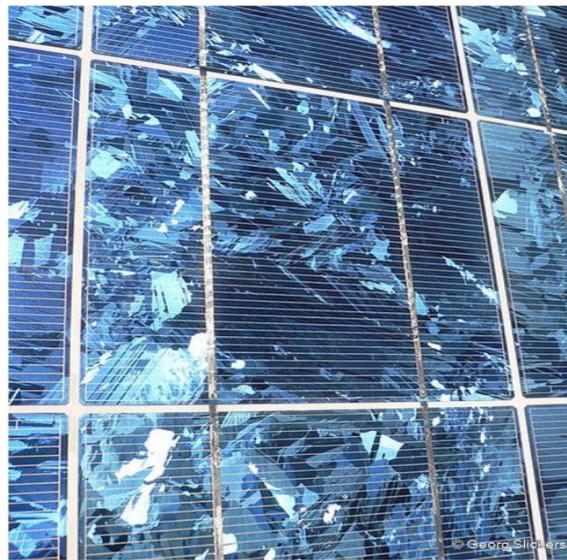
La technologie en couches minces de silicium cristallin déposé sur un support, dont le développement sera largement déterminé par le coût du silicium charge, consiste à déposer une couche mince de silicium polycristallin de 10-40  $\mu\text{m}$  d'épaisseur sur divers substrats de silicium métallurgique peu purifié, quartz, céramique ou métal. Ces couches minces devraient permettre d'obtenir des rendements de conversion du même ordre qu'une

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

---

cellule sur matériau massif, moyennant un confinement optique et un champ arrière répulsif pour les porteurs minoritaires et du fait que la distance qu'ils ont à parcourir est plus faible, on peut se contenter d'une pureté moindre pour le matériau de base.

Le potentiel des cellules photovoltaïques en couches minces n'est aujourd'hui plus à démontrer. Un rendement maximal de conversion de 21% a été obtenu, ce résultat est proche du rendement de conversion record de 24,7% obtenu avec la même technologie sur des plaques de silicium plus épaisses[9]. La figure II-8 présente une photo d'une plaque de silicium poly-cristallin.



**Figure II-8** Photo représentative d'une plaque de silicium poly-cristallin [6].

### **II-6 Le silicium multi-cristallin en couche mince :**

Le silicium est le matériau le plus utilisé dans le domaine photovoltaïque. Il apparaît sous différentes formes selon son mode d'élaboration : monocristallin, multi-cristallin, poly-cristallin ou amorphe. La différence entre ces matériaux réside dans leur régularité cristallographique : si le silicium monocristallin comporte des tailles de grains parfaitement ordonnés supérieures à 10 cm, elles sont comprises entre 1 mm et 10 cm pour le silicium multi-cristallin et entre 1  $\mu\text{m}$  et 1 mm pour le silicium poly-cristallin. Le silicium amorphe est quant à lui complètement désordonné [10].

Les techniques de production du silicium multi-cristallin sont beaucoup plus simples et 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. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

---

cristallographiques différentes voir figure II-9 et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de grains bloquent le flux de porteurs et sont une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction [10].



**Figure II-9 Photo représentative d'une plaque de silicium multi-cristallin [6].**

### **II-7 Le silicium amorphe en couche mince :**

Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou « substrat ») par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou poly-cristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium.

Ce type de cellule est donc moins cher et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet par exemple de les utiliser pour créer des panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m<sup>2</sup> pour obtenir 1kWc) elles sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance. Les cellules au silicium amorphe sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice...) [6]. La figure II-10 présente une cellule solaire à base de silicium amorphe.

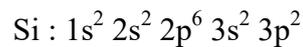


Figure II-10 Photo représentative d'une cellule solaire à base de silicium amorphe [6]

## II-8 Les Propriétés optoélectroniques du silicium (Si) :

### II-8.1 Les Propriétés électroniques du silicium (Si) :

L'atome du silicium (Si) possède 14 électrons, la configuration électronique du silicium ( ${}_{14}^{28}\text{Si}$ ) est donnée par la forme condensée suivante :



La distribution des électrons sur les orbitales atomiques obéit au principe d'exclusion de Pauli et à la règle de Hund. [11]. La figure II-11 présente une structure de type diamant du silicium.

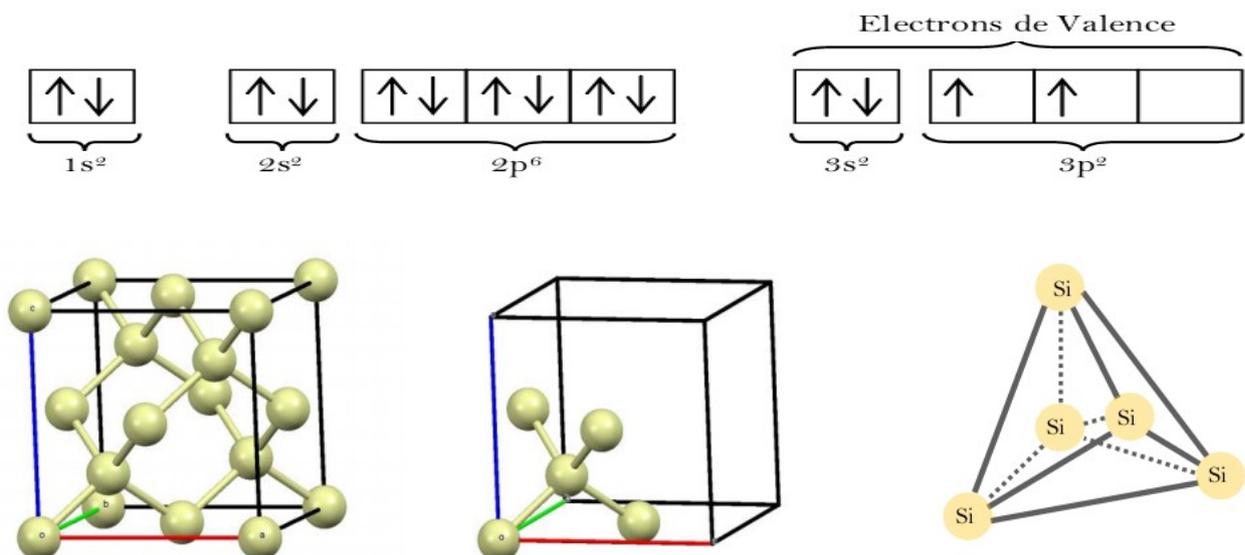


Figure II-11 Structure de type diamant de silicium [11]

### II-8.2 Les Propriétés optiques du silicium (Si) :

Dans un tome isolé, les électrons occupent des niveaux discrets d'énergie. Lorsque la distance entre deux atomes est de l'ordre atomique, distance interatomique ( $d \approx \text{Å}$ ), les niveaux d'énergie sont dédoublés. Dans le cas de plusieurs atomes, cas des cristaux ou des particules à caractère massif, la dégénérescence des niveaux d'énergie forme des bandes d'énergie. Dans les semi-conducteurs, ces bandes d'énergie sont appelées bandes de valence (BV) et bande de conduction (BC), elles sont séparées par une bande interdite (BI) de largeur  $E_g$ , figure II.2.[11]

La formation des bandes, bande de valence et bande de conduction, s'explique du fait que la distance interatomique ( $d_i$ ) diminue les niveaux d'énergie atomiques, par exemple l'atome isolé de silicium d'électrons de valence  $3s^2 3p^2$ , se couplent pour former  $4N$  états électroniques dans la bande de valence et  $4N$  états électroniques dans la bande de conduction ( $N$  est le nombre d'atomes). En effet, lorsque la distance diminue les états se donnent naissance à  $N$  états liants occupés par  $N$  électrons et  $N$  états anti liants occupés par  $N$  électrons et les états  $p$  donnent naissance à  $3N$  états liants occupés par  $2N$  électrons et  $3N$  états anti liants vides. Dans le cas de silicium massif (cristal), la distance  $a_0$  correspond au paramètre de maille. A cette distance les deux bandes (BC) et (BV) sont séparées par une bande interdite de largeur  $E_g$ . [11]

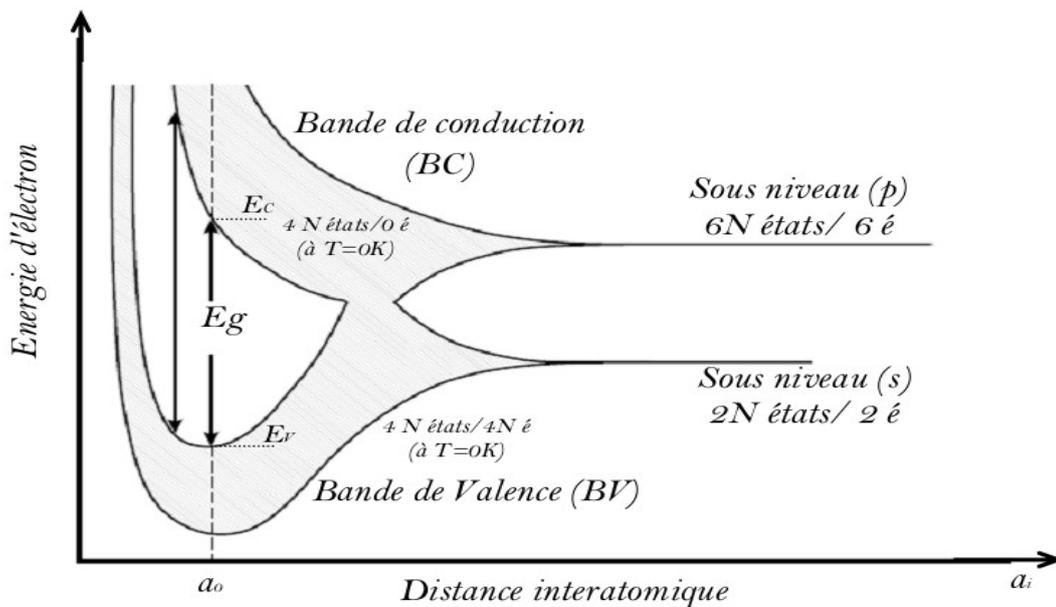


Figure II-12 Schéma représentatif d'une structure de bande dans le cas du silicium: Si [11]

### II-9 Les cellules solaires en couche mince de silicium cristallin :

Les cellules en couches minces de silicium cristallin sont des cellules solaires de même nature que celles présentées précédemment, mais d'une épaisseur bien moindre : typiquement 10 à 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur au lieu de 200  $\mu\text{m}$  environ.

Une plaquette de silicium aussi mince doit être attachée à un substrat plus rigide afin d'être manipulée pendant ses étapes de fabrication car elle est flexible et très fragile. Le substrat peut être fait de silicium ou bien d'un autre matériau.

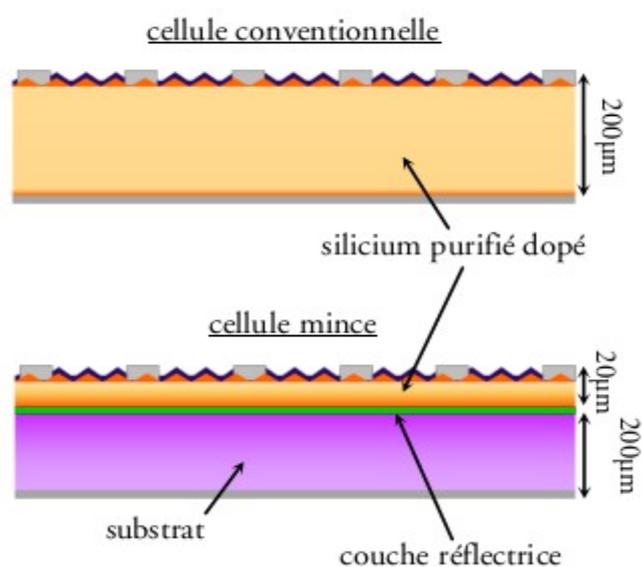


Figure II-13 Schéma représentatif d'une cellule solaire à base de silicium cristallin [12].

### II-10 Méthodes générales pour déposer une couche mince :

Nous citons, ci-dessous, les principales méthodes les plus connues utilisées pour élaborer des couches minces suivant les deux techniques PVD et CVD. Les méthodes de dépôt physiques sont en général utilisées en recherche, alors que les méthodes chimiques sont également utilisées industriellement à cause de leur meilleur rendement et la qualité des films obtenus. Les différentes méthodes utilisées pour déposer des couches minces sont présentées par le schéma de la figure II-14 [13]

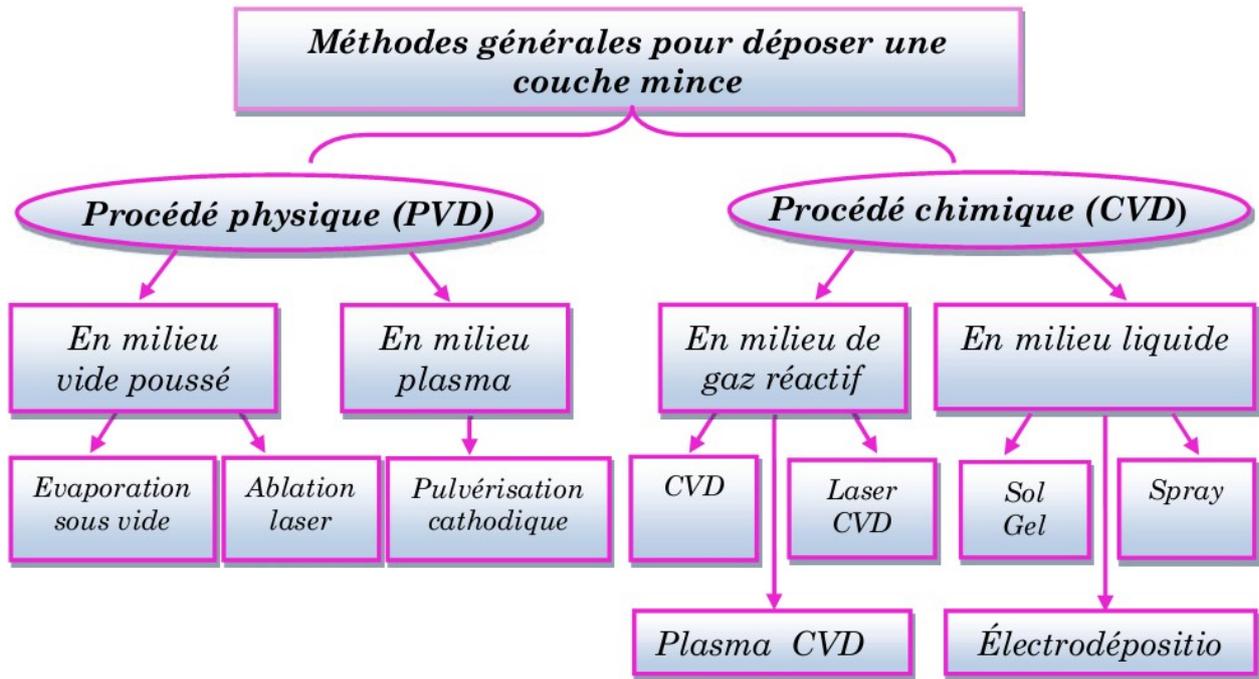


Figure II-14 Schéma représentatif des différents procédés de dépôt des couches minces

[13]

Le Tableau II-2 présente les avantages et les inconvénients des principales techniques de dépôt de couches minces, ainsi que leur domaine d'application.

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

Procédé	Méthode	Avantages	Inconvénients	Application
Chimique	CSD	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Contrôle de la stœchiométrie</li> <li>– Mise en œuvre simple</li> <li>– Faible coût</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Nécessite plusieurs itérations</li> <li>– Pas d'applications industrielles</li> </ul>	Recherche
	CVD	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dépôt sur des surfaces irrégulières</li> <li>– Maîtrise de la stœchiométrie</li> <li>– Bonne reproductibilité</li> <li>– Compatible CMOS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Très coûteuse</li> <li>– Température de dépôt élevée</li> <li>– Précurseur difficile à maîtriser</li> </ul>	Industrie
Physique	PLD	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bon transfert de la stœchiométrie</li> <li>– Mise en œuvre simple</li> <li>– Cristallisation des dépôts in-situ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Problème d'uniformité en épaisseur</li> <li>– Peu d'applications industrielles</li> <li>– Vitesse de dépôt faible</li> </ul>	Recherche
	PVD	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Compatible CMOS</li> <li>– Bonne reproductibilité</li> <li>– Uniformité en épaisseur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Contrôle de stœchiométrie si optimisation</li> </ul>	Industrie

**Tableau 0-2 Comparaison des différentes méthodes de dépôt.**

### Référence :

- [1] Association européenne des industries du photovoltaïque, Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018, disponible sur <http://www.epia.org/home/>, rapport publié en 2014.
- [2] Beaudhuin, M., Etude expérimentale et numérique de la précipitation d'impuretés et de la formation des grains dans le silicium photovoltaïque, Thèse Institut Polytechnique de Grenoble (2009).
- [3] Green, M. A., Emery, K., Hischiwada, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., Solar Cell Efficiency Tables (Version 42), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21, 827-837 (2013).
- [4] MELOUKI Mohamed. Mémoire Magister « Réalisation et caractérisation des couches minces SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> pour cellules solaires de type Gratzel ». Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF -2012.
- [5] Chopra, K. L., Paulson, P. D., Dutta, V., Thin-film solar cells: an overview, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 12, 69-92 (2004).
- [6] Site Internet « <http://www.energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies>. »
- [7] G. Maïlys, 2012, INSA de Lyon. Thèse « Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres ».
- [8] BENCHERRAT Abdennebi Mémoire de master « Étude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellule solaire à faible budget thermique ». Université Abou-Bekr BELKAÏD –Tlemcen-2012.
- [9] Z.Benmohamed. Thèse de doctorat « Caractérisation et analyse des cellules solaire à base de silicium multicristallin ». Université mentouri Constantine-2009.
- [10] Jean-François LELIEVRE, INSA de Lyon, 2007 Elaboration de SiN<sub>x</sub>:H par PECVD « optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques ».
- [11] AH. SOUCI Cours DE Physique des Semi-conducteurs : 2013-2014 .Université de Béjaia, Algérie.

## Chapitre II : Le silicium en couche mince

---

[12] N. Hajzoubir Cours de physique des Semi-conducteurs chapitre II « Propriétés électriques des semi-conducteurs ».Université Ibn Khaldountiar

[13] A.Chovet et P.Masson: «physique des semi-conducteurs», Ecole Polytechnique Université de Marseille, 2004/2005.

## CHAPITRE III :

Etude par simulation numérique d'une cellule solaire  
à base de silicium par PC1D

### **III.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous étudions la cellule photovoltaïque simulée par le programme PC1D, Ce logiciel peut simuler toute structure optique en fonction des matériaux fichiers de données disponibles. Les paramètres de simulations donnent des résultats très proches à ceux obtenus expérimentalement. Par ailleurs, il fait gagner du temps et de l'argent.

### **III.2 Description du Logiciel PC1D :**

PC1D est un logiciel de simulation populaire pour la modélisation des cellules solaires à couches minces. C'est un outil très souple et général pour la simulation de dispositifs semi-conducteurs unidimensionnels comprenant des diodes, des photodiodes, et les cellules photovoltaïque. Les couches de ces structures peuvent être monocristallines, poly-cristallines, amorphes ou des combinaisons

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D pour Personnel Computer One Dimensionnel à une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université " New South Wales de Sydney " en Australie. Son utilisation est très pratique car il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque. Le programme est écrit en langage Pascal, Il donne des solutions des équations non linéaires dépendant du temps pour le transport des électrons et des trous dans les dispositifs semi-conducteurs particulièrement les cellules solaires [1]. Dans ce qui suit on va décrire les différents éléments constituant ce logiciel.

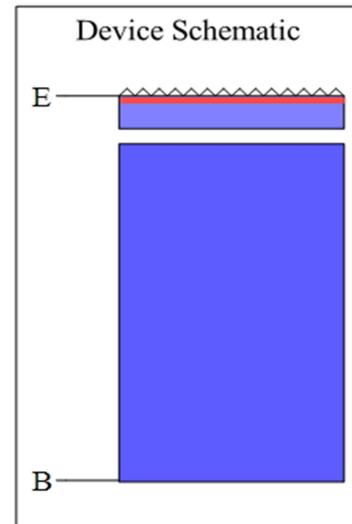
#### **III.2.1 Aperçu du logiciel :**

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la figure. III.1. elle se divise en quatre parties dont les trois premières sont utilisées pour la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation. Le programme ainsi utilisé contient des fichiers bibliothèques avec les paramètres des semi-conducteurs cristallins utilisés dans la technologie photovoltaïque notamment le GaAs, a-Si, AlGaAs, Si, InP et Ge. Les fichiers du spectre solaire sont aussi disponible dans ce logiciel, essentiellement ceux associés aux spectres AM0 et AM1.5. Certains paramètres variables des matériaux sont saisis par la suite à partir des fichiers externes. [1]

File: C:\Users\kinto\Desktop\PC1D3\ALI CHERIF MOHAMED 2489.prm  
(Double-click to add a description)

**DEVICE**  
 Device area: 1 cm<sup>2</sup>  
 Front surface texture depth: 3 μm  
*No surface charge*  
 Front surface optically coated  
*No Exterior Rear Reflectance*  
*No internal optical reflectance*  
 Emitter contact enabled  
 Base contact enabled  
*No internal shunt elements*

**REGION 1**  
 Thickness: 25 μm  
 Material from si.mat  
 Carrier mobilities from internal model  
 Dielectric constant: 11.9  
 Band gap: 1.124 eV  
 Intrinsic conc. at 300 K: 1×10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup>  
 Refractive index from si.inr  
 Absorption coeff. from si300.abs  
 Free carrier absorption enabled  
 P-type background doping: 1×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>  
 1st front diff.: N-type, 1×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> peak  
*No 2nd front diffusion*  
*No rear diffusion*  
 Bulk recombination: τ<sub>n</sub> = τ<sub>p</sub> = 0.9 μs  
 Front-surface recom.: S model, S<sub>n</sub> = S<sub>p</sub> = 5×10<sup>5</sup> cm/s  
*No Rear-surface recombination*



**Figure III-1 Fenêtre du logiciel PC1D utilise en simulation numérique.**

### III.2.2 Les paramètres du dispositif (Device) :

La surface du dispositif est très importante car elle influe beaucoup plus le courant photo-généré. Dans notre simulation, nous avons choisi une surface de 1cm<sup>2</sup> [2].

Les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur de 3μm et d'angle facial de 54,74°. Pour diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident la texturisation de surface est très importante. On peut texturer seulement la face avant, si l'autre face est considérée à l'obscurité.

Les couches antireflets sont généralement de la silice (SiO<sub>2</sub>), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donnée dans le logiciel sous forme de fichiers.

Dans notre simulation, nous avons négligée la réflectance optique interne, nous considérons que les surfaces des cellules sont spéculaires et non diffuses. Par défaut, l'émetteur et la base sont connectés au circuit tandis que le collecteur est déconnecté. [3]

### III.2.3 Les paramètres des régions

L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre  $0.1\mu\text{m}$  et  $1\mu\text{m}$

Concernant le matériau utilisé, tous les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (\*.mat), ils sont fournis par la suite par le logiciel dans une disquette.

Les paramètres stockés dans un fichier sont donnés comme suit :

- La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et al 1981.
- La constante diélectrique.
- L'énergie de gap (eV).
- La concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ ).
- L'indice de réfraction.
- Coefficient d'absorption : le modèle utilisé est celui de Rajkanan et al 1979.
- Absorption des porteurs libres : l'équation décrivant l'absorption des porteurs libres

-Type et concentration de dopage étudiés sont de type n ou p, la concentration maximale est de  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ . Ce logiciel présente quatre profils de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.

- Les recombinaisons en volume utilise un modèle basé sur la statistique de Read Shockley-Hall qui décrit les recombinaisons par pièges situées dans la bande de valence.
- Les recombinaisons face avant et arrière. [2]

### III.3 Le fonctionnement du logiciel PC1D

Après l'introduction de toutes les données nécessaires du matériau étudié ainsi que la configuration de la cellule solaire utilisée, le simulateur commence à s'exécuter et permet de donner les résultats nécessaires.

Pour le bon fonctionnement du logiciel PC1D, il faut respecter plusieurs critères tels que :

- 1- Le choix des gammes de valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie.
- 2- Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles bien déterminés.

- 3- Pour une convergence rapide, il est indispensable de minimiser au maximum la taille des éléments finis et choisir un nombre adéquat des itérations.
- 4- Le bon choix des paramètres numériques.
- 5- Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

Ces critères sont nécessaires dans chaque simulation mais ils ne sont pas suffisants. Plusieurs fichiers externes sont aussi obligatoires pour exécuter le programme. Nous citons à titre d'exemple la sélection des fichiers caractérisant chaque matériau tels que celui du coefficient d'absorption (\*.abs) et celui de l'indice de réfraction (\*.inr).

Le choix des fichiers d'excitation (\*.exc) sont aussi nécessaires avant l'exécution. Ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (dark-iv-exc), ou bien sous illumination dans ce dernier cas on trouve deux fichiers (one-sun.exc, scan-qe.exc).

La sélection du fichier (one-sun.sxc) permet le calcul des caractéristiques (I-V, P-V). On obtient également le rendement  $\eta$  et le facteur de forme FF. Le fichier (scanqe. exc) permet le calcul de la réponse spectrale.

Ils existent plusieurs spectres solaires standards, chacun d'eux spécifie l'endroit de l'étude, par exemple, dans les études spatiales ont choisi le spectre AM0, l'air masse AM1.5 pour les applications terrestres. En effet le logiciel PC1D utilise trois spectres différents (am0.spc, am1.5g.spc, am1.5.spc). [3]

#### **III.4 La Structure à simuler :**

Nous avons simulé des cellules à homo-jonctions du type  $n^+ p p^+$  de surface  $1\text{cm}^2$  avec une texturation à la surface avant pour optimiser le captage du rayonnement. Le calcul des performances de la cellule s'effectue sous illumination standard AM1.5 ( $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ ).

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord défini une cellule solaire de référence avec un ensemble des paramètres fixes puis nous avons fait varier les paramètres un par un (les autres restant fixes) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire.

Dans La Figure. III.2 On représente la structure et les paramètres de la cellule de référence pendant la simulation :

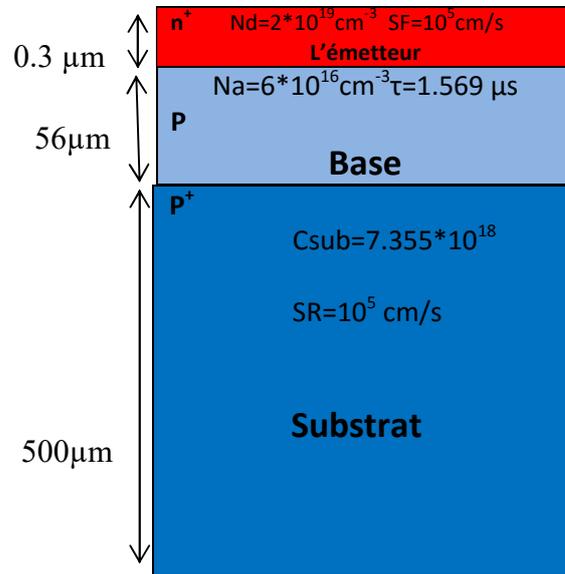


Figure III-2 Structure et paramètres de la cellule de référence simulée

III.4.1 Paramètres de la structure simulée : Le tableau suivant regroupe les paramètres de la cellule de référence

<b>Couche anti reflet</b>	
$n_{\text{car}}$	2.01
$d_{\text{car}}$ (nm)	75
<b>Texturisation</b>	
Angle ( $^\circ$ )	54.74
Depth ( $\mu\text{m}$ )	3
<b>Emetteur</b>	
$X_j$ ( $\mu\text{m}$ )	0.3
$N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \cdot 10^{19}$
Profil de diffusion :	Erfc
<b>Base</b>	
$N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$6 \cdot 10^{16}$
$\tau$ ( $\mu\text{s}$ )	1.569
$X_e$ ( $\mu\text{m}$ )	56
<b>Substrat</b>	
$X_{BSF}$ ( $\mu\text{m}$ )	500
$C_{BSF}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$7.355 \cdot 10^{18}$
<b>Passivation</b>	
$S_F$ (cm/s)	$10^5$
$S_B$ (cm/s)	$10^5$

Tableau III-1 Paramètre de la cellule de référence.

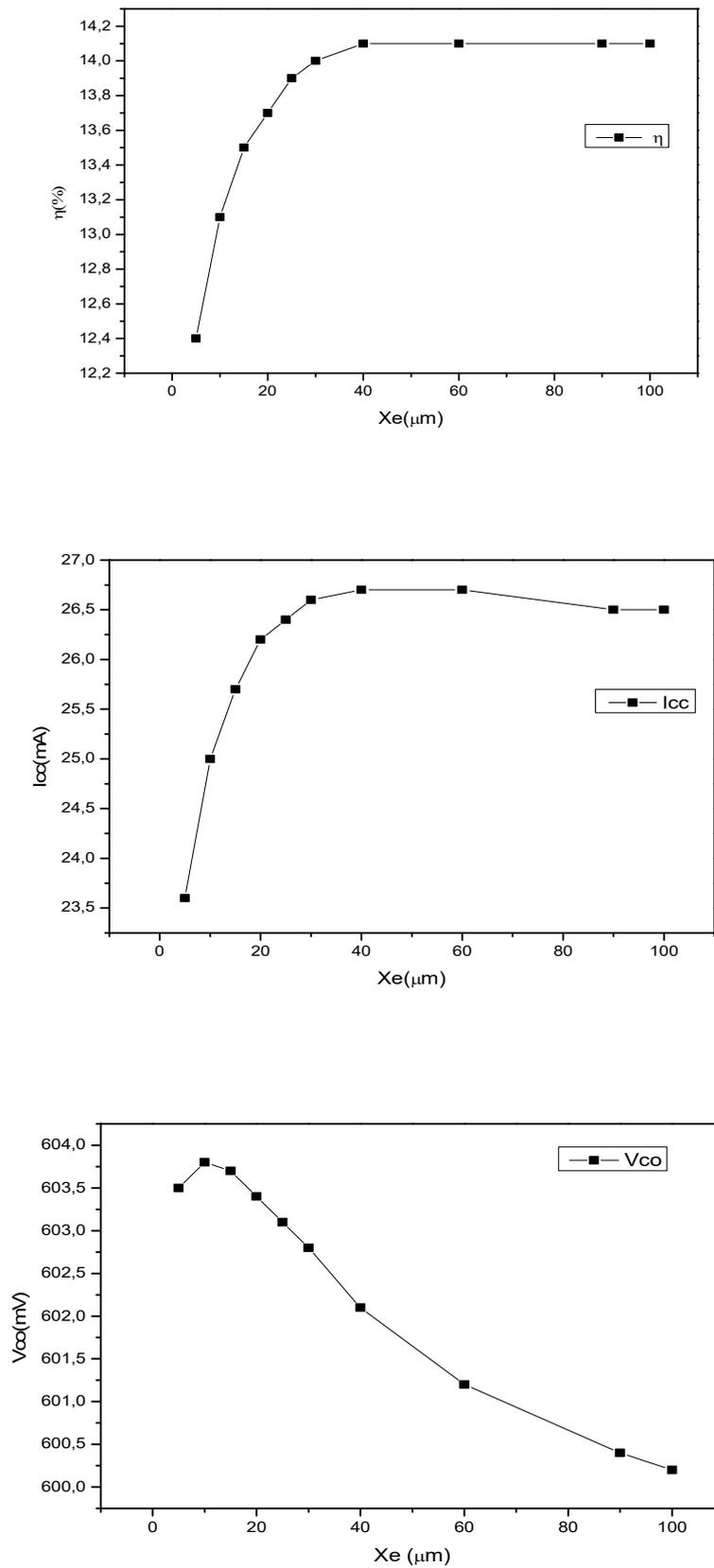
Après avoir étudié les paramètres de la cellule de référence, nous développons un intervalle limité de chaque paramètre afin d'obtenir des valeurs optimales de la cellule, comme indiqué dans le tableau III.2.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
L'épaisseur de la cellule	5 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
L'épaisseur de l'émetteur	0.1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
Dopage de l'émetteur	10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>	2*10 <sup>21</sup> cm <sup>-3</sup>
Dopage de la base	10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup>	5*10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>
Durée de vie	0.1 $\mu\text{s}$	100 $\mu\text{s}$
L'épaisseur de substrat	200 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$
Dopage de substrat	10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	5*10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>
La vitesse de recombinaison face avant	10 cm/s	10 <sup>7</sup> cm/s
La vitesse de recombinaison face arrière	10 cm/s	10 <sup>7</sup> cm/s

**Tableau III-2 Paramètres variables pendant la simulation**

### III.5 Influence de l'épaisseur (Xe) de base sur le rendement, la tension Vco et le courant Icc :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur (Xe) de la cellule solaire sur le rendement, Nous avons fixé tous les autres paramètres indiqués dans le tableau III-2 et changer l'épaisseur de base de la cellule. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.3



**Figure III.3** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur ( $X_e$ ).

L'effet du rendement des cellules solaires utilisées en fonction de l'épaisseur est présenté sur la figure III-3, On constate une augmentation considérable du rendement entre  $5\mu\text{m}$  et  $40\mu\text{m}$  jusqu'à une valeur limite au-delà de laquelle le rendement demeure constant en fonction de l'épaisseur de la couche. Par conséquent la réponse spectrale diminue sensiblement avec l'augmentation de l'épaisseur, ce phénomène peut être attribué à l'absorption de la lumière dans cette couche ce qui réduit et laisse fixer la valeur du rendement. La figure III-3 présente l'effet du rendement en fonction du courant de court-circuit, Nous constatons clairement aussi une augmentation du courant dans les cellules solaires d'épaisseurs comprise entre  $5\mu\text{m}$  et  $40\mu\text{m}$  ensuite le courant de court-circuit reste constant.

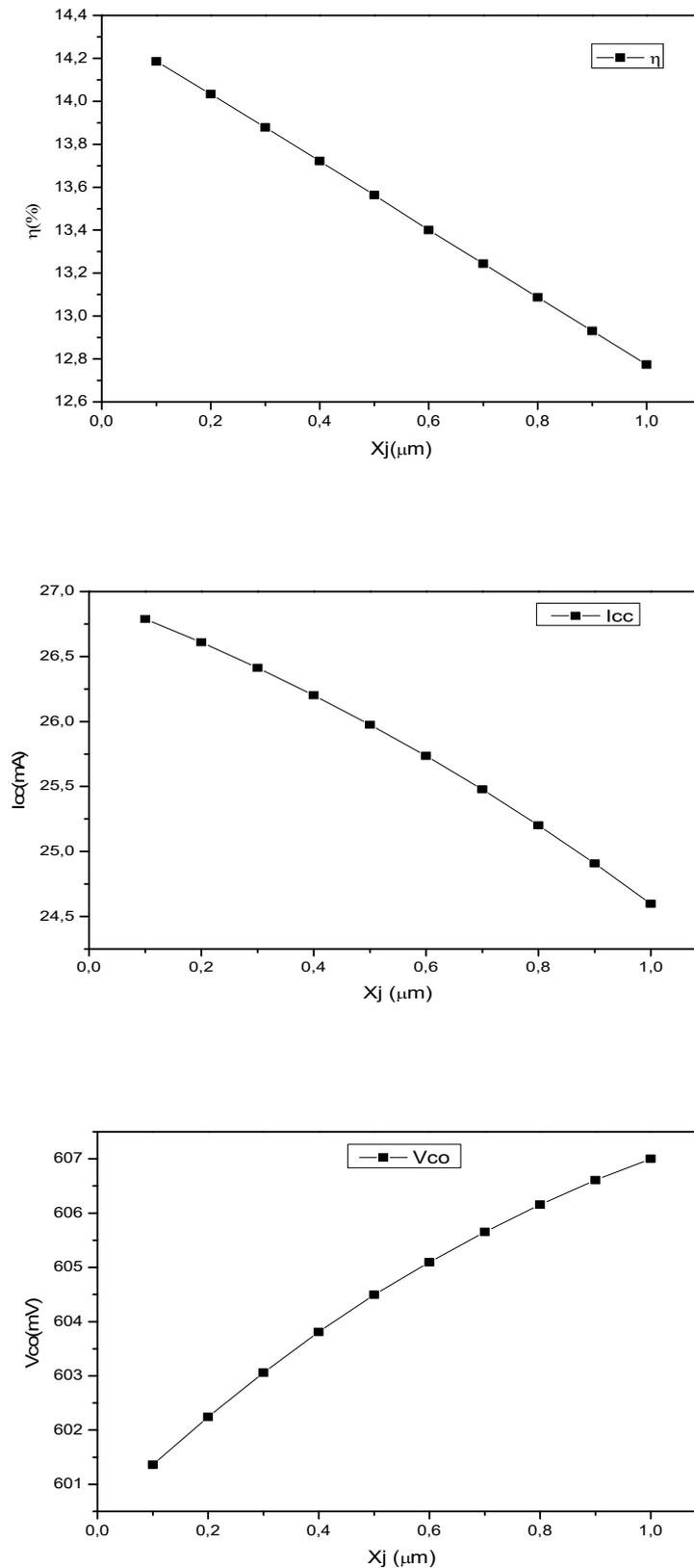
## **II-6 Influence de l'émetteur sur le rendement des cellules solaires utilisées :**

Afin d'étudier l'effet de l'épaisseur de l'émetteur et du dopage de celui-ci sur le rendement de nos cellules solaires, Nous avons fixé tous les paramètres regroupés dans le tableau III-2 et varié seulement l'épaisseur de l'émetteur ainsi que le dopage de celui-ci. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III-4,

### **II-6.1 Effet de l'épaisseur :**

Nous constatons une dégradation totale des performances de nos cellules utilisées dans ce travail ce qui s'explique par l'absorption des photons et à l'augmentation de la recombinaison au niveau de la zone de charge d'espace.

On remarque que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur cause une diminution dans le rendement qui est lié beaucoup plus à la diminution du photo-courant. Cependant, la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  augmente.



**Figure III-4** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur ( $X_j$ ) de l'émetteur.

II-6.2 Effet du dopage (Nd) de l'émetteur :

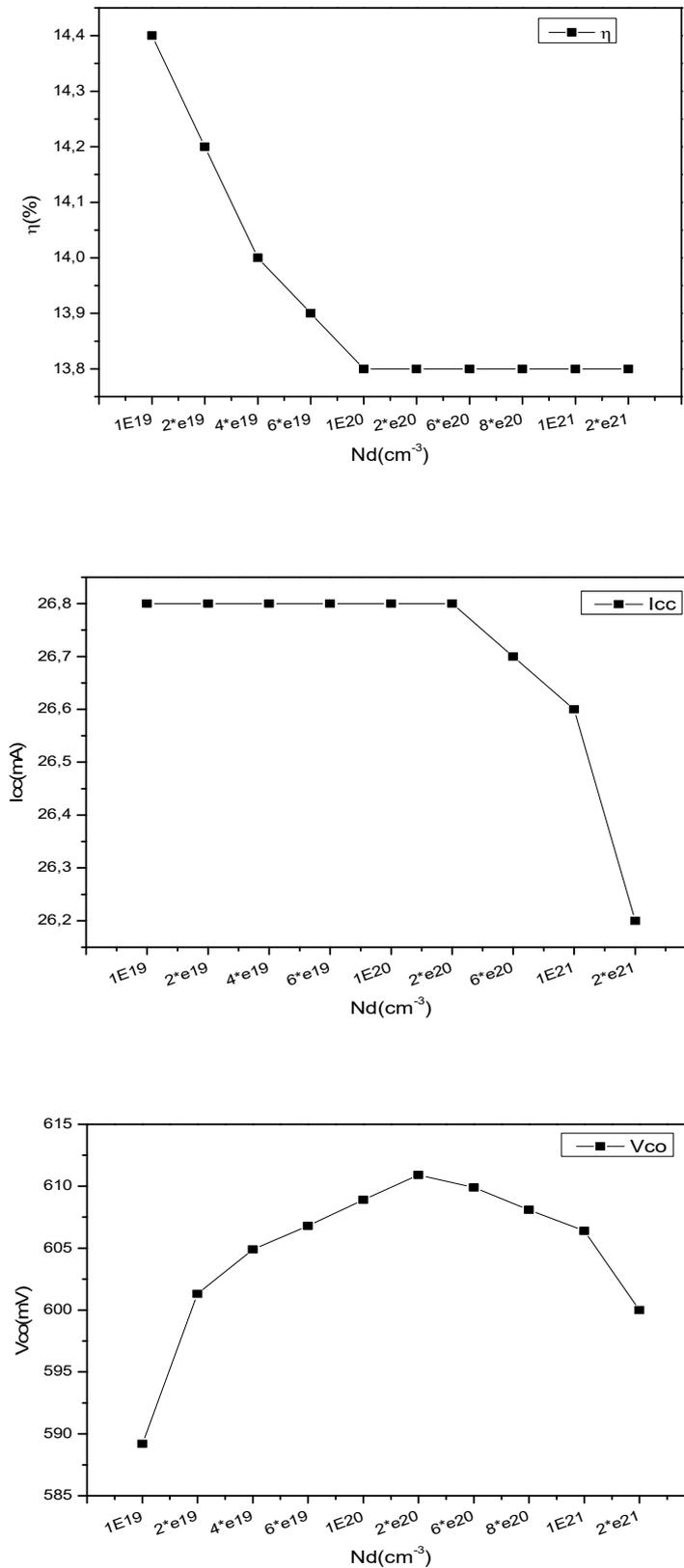


Figure III-5 Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage (Nd) de l'émetteur.

Nous constatons que le courant du court-circuit est insensible au dopage de l'émetteur, alors que  $V_{oc}$  augmentent, ce qui conduit à un faible rendement de la cellule. La réponse spectrale, comme  $J_{cc}$ , est insensible au dopage de l'émetteur.

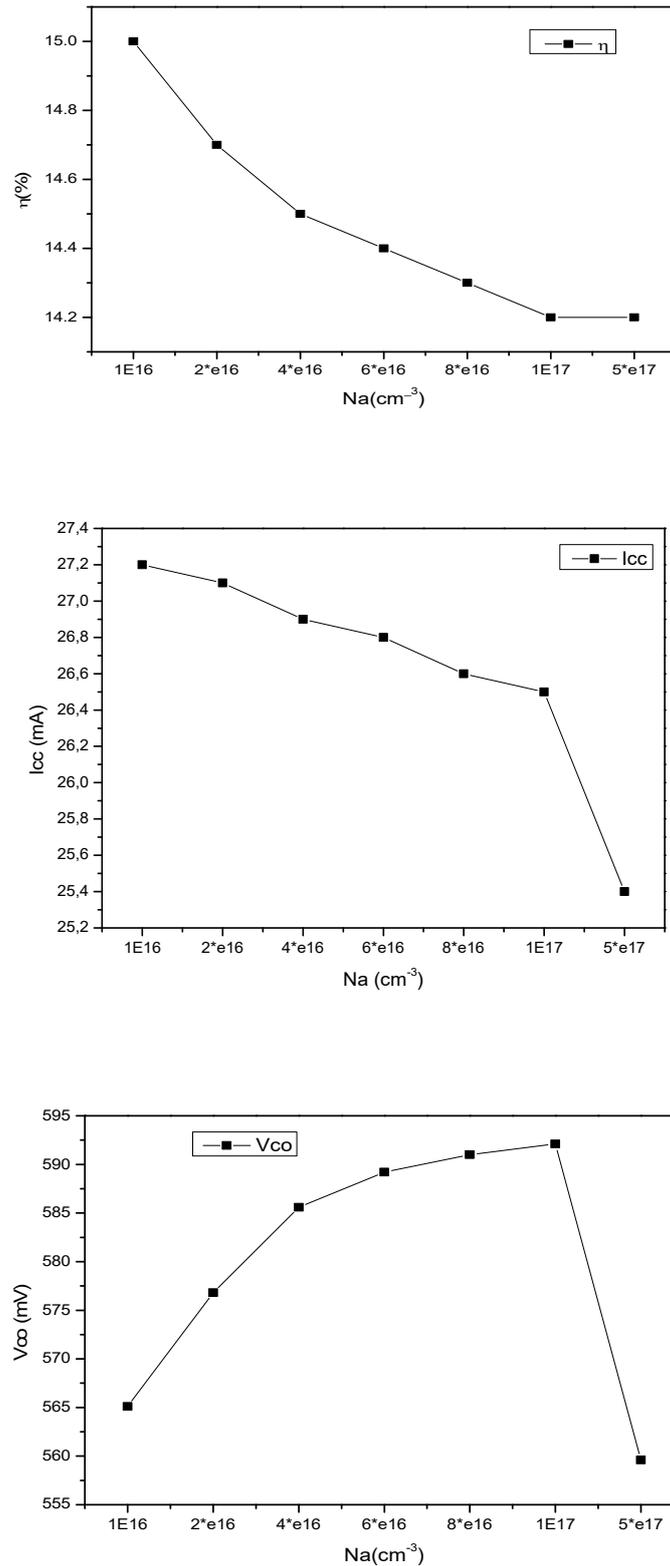
### **III-7 Influence de la base « collecteur » sur le rendement des cellules solaires utilisées :**

Pour étudier l'influence de dopage de la base de la cellule solaire sur le rendement, Nous avons fixé tous les paramètres regroupés dans le tableau III-2 et nous avons changé le dopage de la base. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III-6,

#### **III-7.1 Effet du dopage de la base des cellules solaires :**

On remarque la figure III-6 que le rendement commence à diminuer dès que la concentration de la base augmente, ce qui est dû au fort dopage qui conduit à une recombinaison. Pour le courant de court-circuit l'allure de la courbe est la même que celle de la tension  $V_{oc}$ . Dans ce cas, l'effet du dopage est conséquent sur les paramètres de sortie de la cellule.

Dans l'intervalle de dopage de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , On constate une augmentation de la tension et lorsque la concentration de la base dépasse  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  la tension diminue en fonction du dopage à cause de l'excès de recombinaison.



**Figure III-6** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage (Na) de la base.

On remarque que le rendement commence à diminuer dès que la concentration de la base augmente, ce qui est dû au fort dopage qui conduit à une recombinaison. Pour le courant de court-circuit l'allure de la courbe est la même que celle de la tension  $V_{oc}$ . Dans ce cas, l'effet du dopage du collecteur est conséquent sur les paramètres de sortie de la cellule.

Dans l'intervalle de dopage de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , On constate une augmentation de la tension et lorsque la concentration de la base dépasse  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  la tension diminue en fonction du dopage à cause de l'excès de recombinaison.

### **III-7.2 Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires :**

D'après les résultats obtenus, on constate que les paramètres de la cellule (rendement, courant court-circuit et la tension de court-circuit) dépendent fortement de la durée de vie ( $\tau$ ). Sur la figure III-7, nous constatons dans l'intervalle allant de  $0,1 \mu\text{s}$  à  $0,9 \mu\text{s}$  que le rendement de nos cellules augmente car il n'y a pas de recombinaison des porteurs de charges, ensuite le rendement diminue, il y a présence de recombinaison des porteurs de charges en volume.

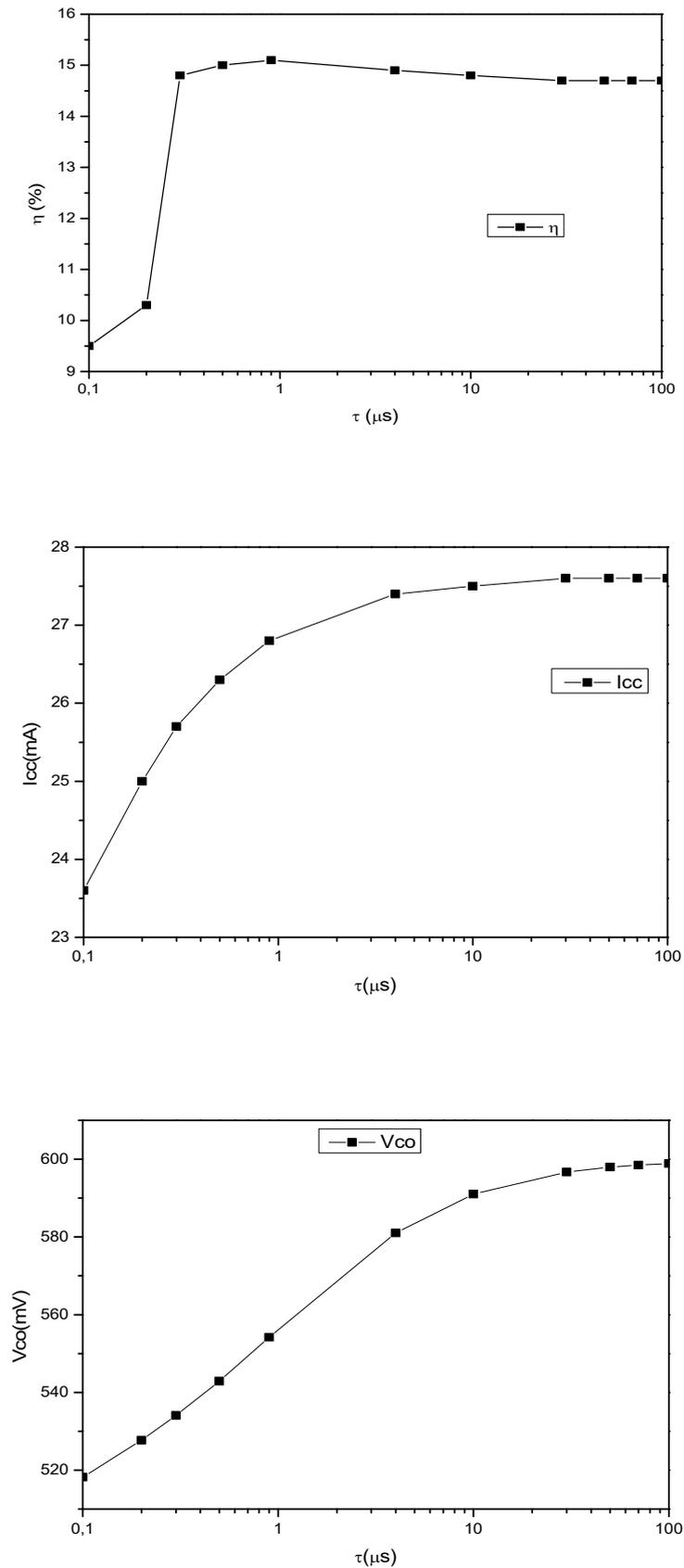


Figure III-7 Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la durée de vie ( $\tau$ ).

D'après les résultats obtenus, on constate que les paramètres de la cellule (rendement, courant court-circuit et la tension de court-circuit) dépendent fortement de la durée de vie ( $\tau$ ). Sur la figure III-7, nous constatons dans l'intervalle allant de  $0,1\mu\text{s}$  à  $0,9\mu\text{s}$  que le rendement de nos cellules augmente car il n'y a pas de recombinaison des porteurs de charges, ensuite le rendement diminue, il y a présence de recombinaison des porteurs de charges en volume.

### **III-8 Influence du substrat utilisé :**

Le substrat est un support sur le quel une couche de silicium est déposée. Dans notre étude, il joue le rôle d'un BSF qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison et d'améliorer par conséquent les caractéristiques électriques de la cellule.

III-8.1 Effet de dopage du substrat :

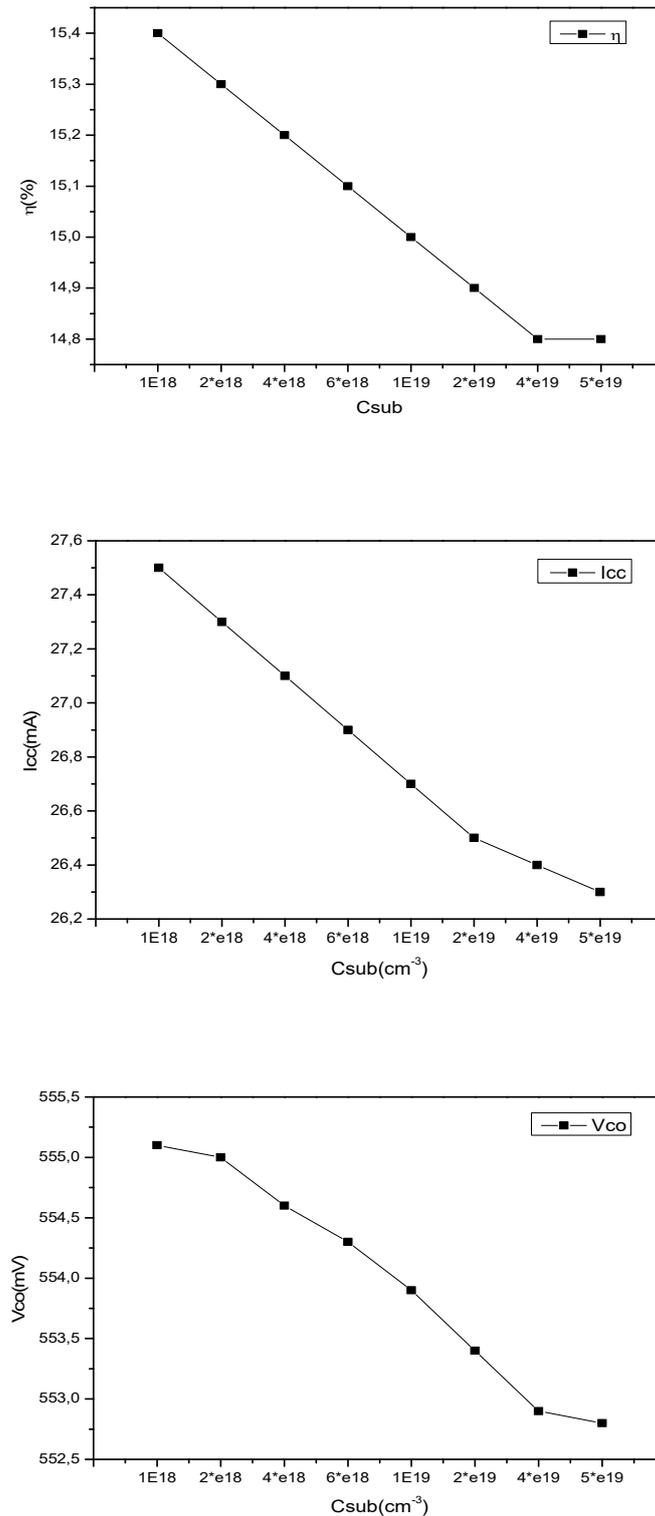
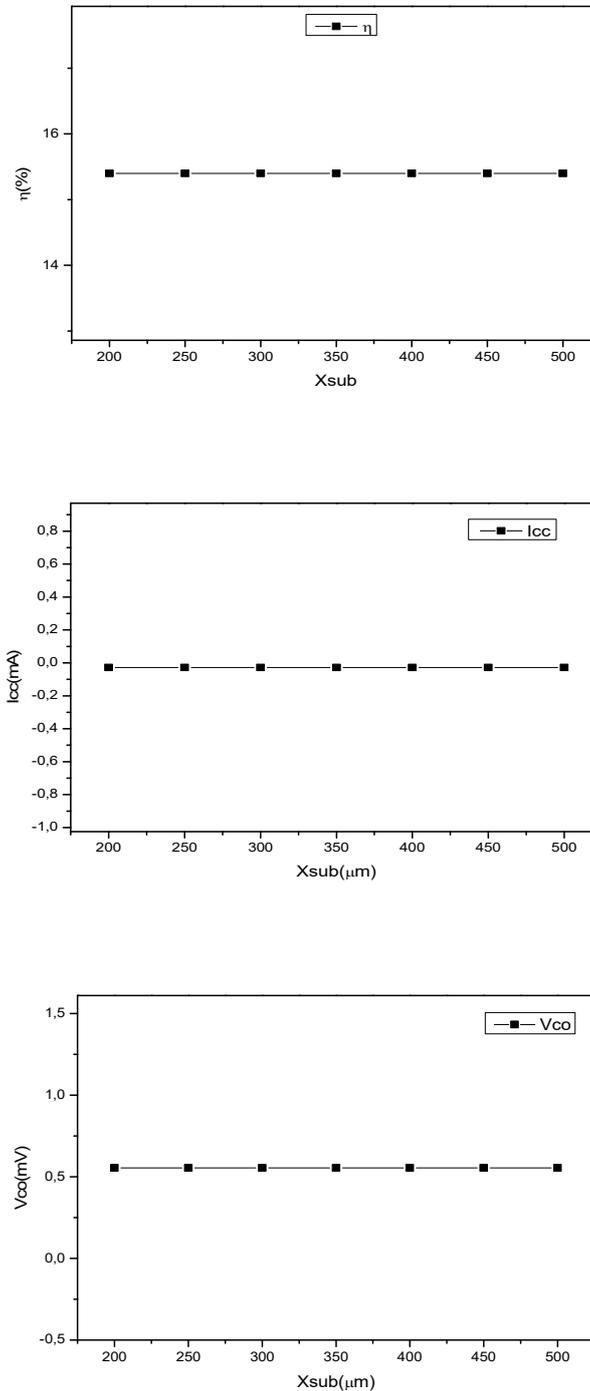


Figure III-8 Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage ( $C_{sub}$ ) de substrat.

Nous avons dans cette partie varier le taux de dopage de nos substrats .La figure III-8 présente les résultats obtenus pour les différents paramètres de sorties de nos cellules notamment : le rendement, le courant court-circuit et la tension en circuit ouvert , nous remarquons pour les substrats dopés entre  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  à  $4.10^{19} \text{ cm}^{-3}$  une dégradation totale du rendement qui est due à la recombinaison des porteurs de charges ensuite on constate une constante de la valeur du rendement.

### III-8.2 Effet de l'épaisseur du substrat :

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III-9, les performances de nos cellules ne sont pas trop affectées par les variations de l'épaisseur des substrats.



**Figure III-9** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur ( $X_{sub}$ ) de substrat.

### **III-9 Influence de la couche de passivation :**

Pour étudier l'influence de la couche de passivation (SF) et (SR) de la cellule solaire sur les performances de nos cellules solaires. Nous avons fixés tous les paramètres cités précédemment dans le tableau II et nous avons varié la vitesse de recombinaison de la face avant (SF) de nos cellules et de la vitesse de recombinaison face arrière (SR). D'après les résultats obtenus, présentés sur la figure III-10, nous pouvons conclure que la vitesse de recombinaison face avant (SF) de la cellule est un facteur dominant car il influence beaucoup plus les paramètres de sortie de nos cellules.

III-9.1 Effet de la variation (SF) :

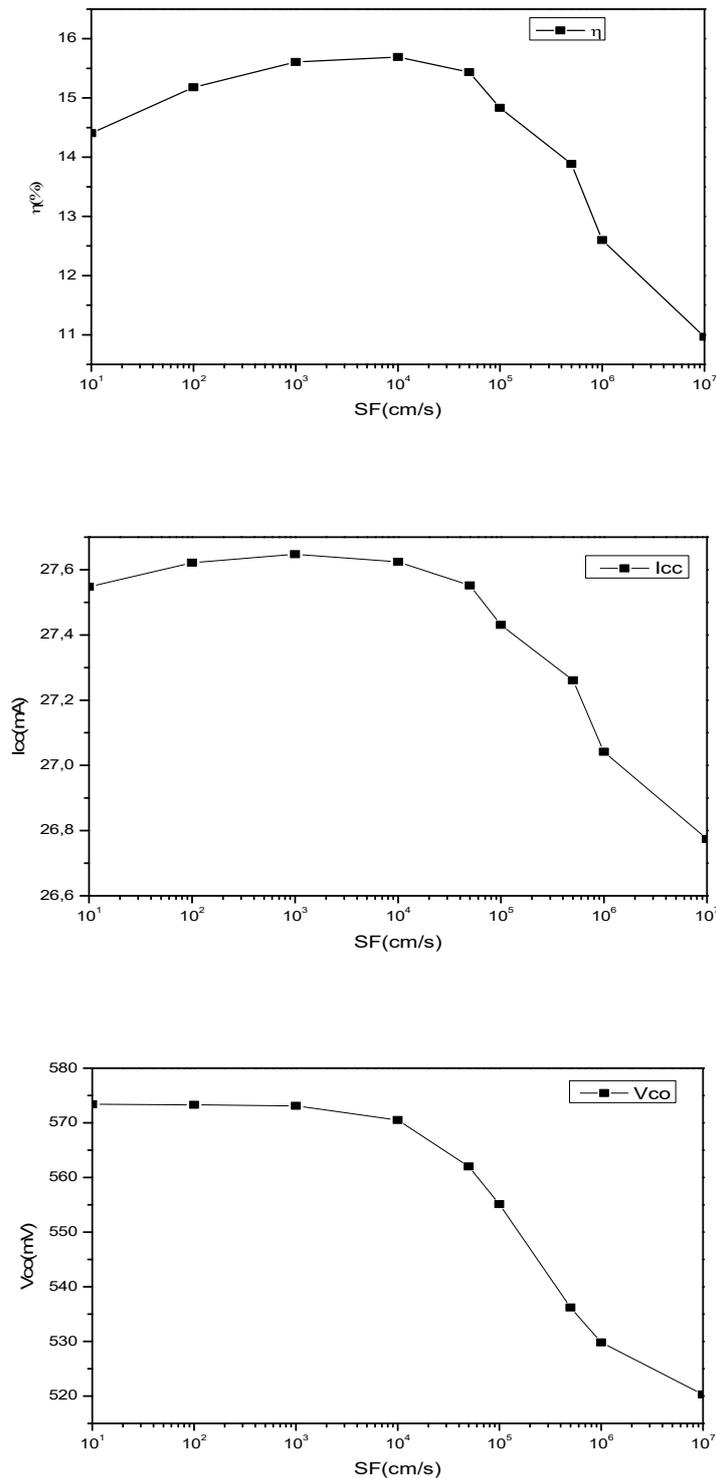


Figure III-10 Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face avant (SF).

III-9.2 Effet de la variation (SR) :

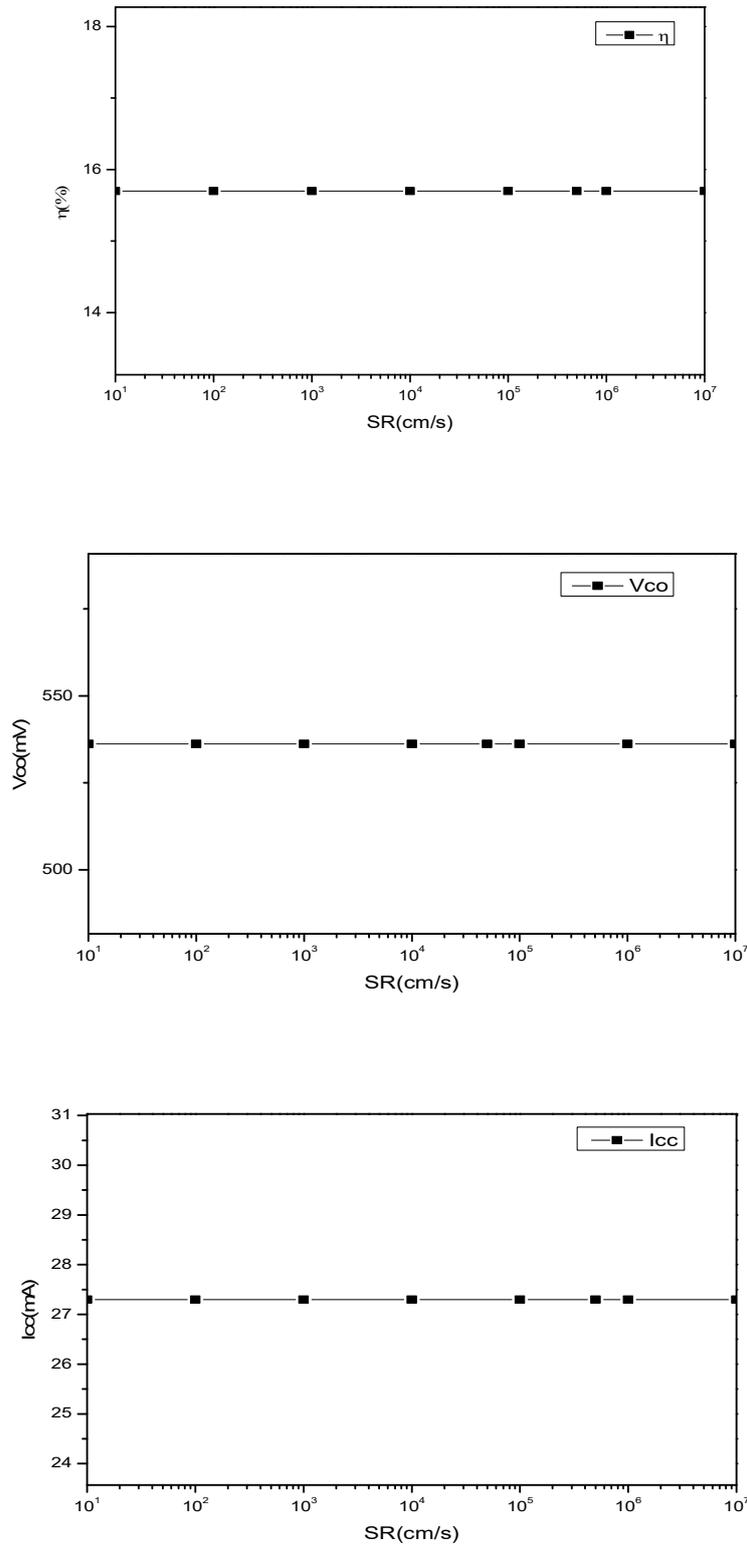


Figure III-11 Variation du rendement, de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison face arrière (SF).

Nous présentons sur la figure III-11 l'effet de la variation sur les performances de nos cellules solaires, nous constatons clairement une constance des valeurs du rendement, de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit.

### III-10 Caractéristique I(V) de la cellule solaire étudiée :

La cellule solaire simulée est à base de silicium monocristallin en couche mince, de  $25\mu\text{m}$  d'épaisseur et de taux de dopage de  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  avec une face avant déposée sur un substrat d'épaisseur  $250\mu\text{m}$  de taux de dopage de  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ . Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III-12 :

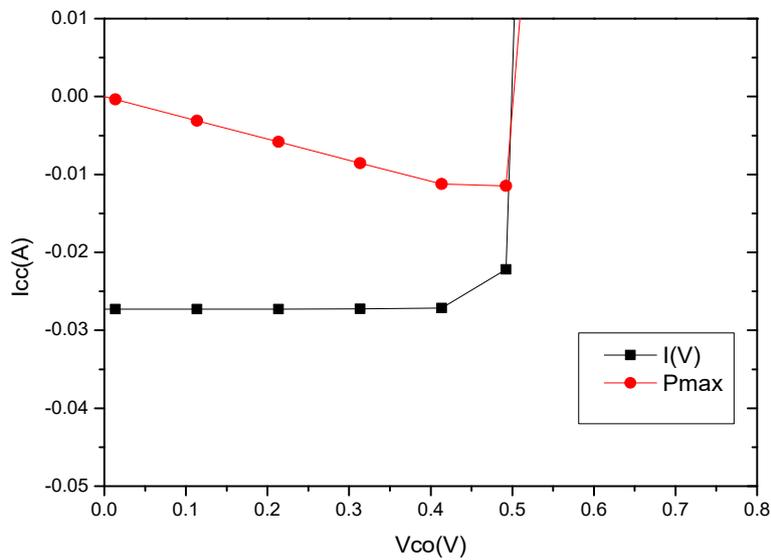


Figure III-12 Caractéristique I(V) de la cellule solaire.

Nous constatons une amélioration, pour le rendement de la cellule et de sa réponse spectrale pour les longueurs d'ondes longues.

### III-11 Conclusion :

Les résultats que nous avons obtenus montrent bien l'effet de l'épaisseur et du dopage de l'émetteur et de du collecteur sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée.

En résumé :

- La diminution de l'épaisseur de l'émetteur améliore le rendement de conversion de la cellule et la réponse spectrale pour les longueurs d'onde courtes.
- L'augmentation de l'épaisseur du collecteur améliore aussi le rendement de la cellule et la réponse spectrale pour les longueurs d'onde longues.
- L'augmentation du dopage de l'émetteur entraîne une augmentation dans la tension de circuit ouvert et le facteur de forme alors que le photo-courant est pratiquement constant.
- L'augmentation du dopage du collecteur n'a pas d'effet significatif. Dans le tableau suivant nous résumons tous les paramètres étudiés par la simulation et qui donnent un bon rendement :

Couche antireflet	Valeur optimale
$n_{car}$	2.01
$d_{car}(nm)$	75
épaisseur	
Angle (°)	54.74
Depth (µm)	3
Emetteur	
$X_i$ (µm)	0.1
$N_D$ (cm <sup>-3</sup> )	1*10 <sup>19</sup>
Profil de diffusion :	<u>Erfc</u>
Base	
$N_A$ (cm <sup>-3</sup> )	1*10 <sup>16</sup>
$\tau$ (µs)	0.9
$X_e$ (µm)	25
Substrat	
$X_{Sub}$ (µm)	250
$C_{Sub}$ (cm <sup>-3</sup> )	1*10 <sup>18</sup>
Passivation	
$S_F$ (cm/s)	5*10 <sup>5</sup>
$S_B$ (cm/s)	5*10 <sup>5</sup>

**Tableau III-3 Bilan les paramètres optimisés d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin en couche mince déposée sur un substrat de silicium monocristallin**

Les meilleures performances sont :

$$P_{max}=15.7mW \quad V_{co}=536.2 \text{ mV} \quad I_{cc}=27.3mA \quad \eta=15.7\%$$

**Référence :**

[1] : « ZIANI Nora ».Mémoire de Magister Thème : Effet de l'épaisseur de la couche antireflet à base d'un TCO sur les cellules solaires a hétérojonction à base de silicium. Université de mouloud Mammeri TIZI-OUZOU-2013.

[2] : «MEKELLECHE SIDI MOHAMMED ». Mémoire de Master Thème : Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux Destinés à la Production d'Energie Photovoltaïque. Université Abou Beker Belkaid-2015.

[3] : « BEDDA NAIMA ». Mémoire de Magister .Thème : Etude des propriétés physiques des semi-conducteur Si GaAs et GaAlAs simulation des cellules solaires a base de Si et GaAs .Université El-HadjiLakhder –Batna-2011.

### Conclusion générale :

L'objectif de notre travail est l'étude numérique par simulation d'une cellule solaire à base de silicium, nous avons pu mettre en évidence l'effet des épaisseurs et du dopage de l'émetteur et du collecteur sur les caractéristiques électrique de la cellule solaire. Ces caractéristiques sont la caractéristique courant-tension (I-V). A partir de la caractéristique (I-V), les paramètres de sortie de la cellule sont calculés. Ces paramètres sont : la densité de courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) de la cellule.

Nous avons entamé ce mémoire par un état de l'art sur le flux solaire et les propriétés générales des semi-conducteurs, leurs propriétés et applications était présentés en détails suivi d'un exposé sur les différents développements dans le domaine du photovoltaïque. Cette présentation a porté sur les cellules solaires suivant les différentes générations, commençant par les cellules solaires à base de Silicium poly cristallin jusqu'à l'utilisation des cellules solaires organiques, avec également une présentation de l'origine de ces cellules basées sur les semi-conducteurs avec un bref descriptif de ces matériaux.

Nous avons également procédé à une analyse des propriétés du silicium et les différentes méthodes de dépôts de ce matériau

L'étude numérique par simulation de la cellule solaire à vase de silicium était l'objet du troisième chapitre où nous avons pu montrer que l'optimisation des paramètres de conceptions de nos cellules a permis d'obtenir de bons résultats. Les caractérisation de leur réponse  $I=f(V)$  et de leur efficacité ont été étudié .Nous avons pu ainsi augmenter le courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement des cellules étudiées. En conséquence, des résultats préliminaires encourageants sur ces cellules ont été trouvés pour les conditions suivantes :

$$P_{max}=15.7mW \quad V_{co}=536.2 mV \quad I_{cc}=27.3mA \quad \eta=15.7\%$$

Les résultats que nous avons obtenus montrent bien l'effet de l'épaisseur et du dopage de l'émetteur et de du collecteur sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée.

Enfin, les différents enseignements tirés de cette étude montrent clairement que des progrès décisifs dans la conversion photovoltaïque devraient pouvoir être accomplis grâce à une démarche concertée associant la chimie de synthèse, la science des matériaux et la technologie des composants pour faire concrétiser tous ces résultats.

## Résumé :

L'objectif de notre travail est l'étude numérique par simulation d'une cellule solaire à base de silicium par PC1D, nous avons pu mettre en évidence l'effet des épaisseurs et du dopage de l'émetteur et du collecteur sur les caractéristiques électrique de la cellule solaire. Ces caractéristiques sont la caractéristique courant-tension (I-V). A partir de la caractéristique (I-V), les paramètres de sortie de la cellule sont calculés. Ces paramètres sont : la densité de courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) de la cellule. L'étude numérique par simulation de la cellule solaire à base de silicium montre que l'optimisation des paramètres de conception de nos cellules a permis d'obtenir de bons résultats.

الهدف من هذا العمل هو دراسة رقمية لخلية شمسية باستخدام رقائق السليكون باستعمال برنامج PC1D  
لقد تمكنا من إظهار آثار سمك الطبقة مستوى المنشطات على الوجه الأمامي و الخلفي للخلية على مميزات الخلية الضوئية  
وتغير منحى الشدة التيار بدلالة فرق الكمون من هذا منحى نستنتج كل من شدة التيار القصير المفتوح ( $I_{CC}$ ) و فرق الكمون  
في دارة مفتوحة ( $V_{CO}$ ) و مردودية الطاقة للخلية الضوئية ( $\eta$ ) .  
هذه الدراسة الرقمية للخلية الضوئية المدروسة تبين أن النتائج الجيدة الناتجة عن هذه الخلية كانت بسبب إمكاننا التحكم في  
مختلف النقاط المميز للخلية الضوئية.

**Mots Clés:** PC1D, Silicium, caractéristique I-V, courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ), tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ), le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ )