



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

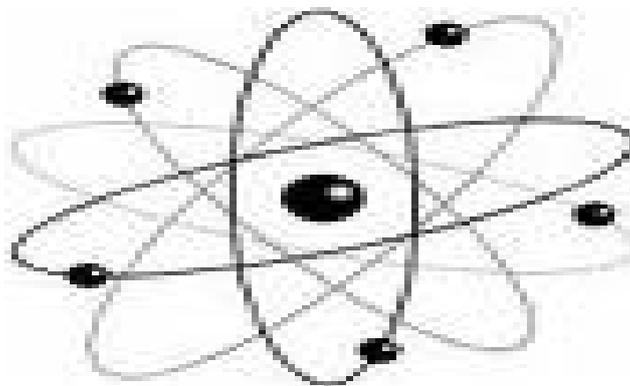


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique photovoltaïque



*Mémoire de fin d'étude en Master*

*Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs  
sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en  
Silicium*

Présenté par:

Afaf Djeghbala

Devant le Jury Composé par :

*Am. Meftah*

*Professeur*

*Université Med Khider- Biskra*

*Président*

*Af. Meftah*

*Professeur*

*Université Med Khider- Biskra*

*Rapporteur*

*T. Tibermacin*

*M.C. «B»*

*Université Med Khider - Biskra*

*Examineur*

Année Universitaire  
2012-2013

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي جَعَلَ الْمَوْتَ  
وَالْحَيَاةَ وَالَّذِي  
يُعِيدُ النَّاسَ  
وَالَّذِي يُدَبِّرُ  
الْأَمْرَ وَاللَّهُ  
بِشَيْءٍ عَظِيمٍ

## *Dédicaces*

*À mes triée chers parents*

*À mon professeur Af. Mestah*

*À mes frères et sœurs*

*À toute ma famille*

*À Toute mes Camarades*

*À mes amis au travail*

*À tous ces que je connaisse et qui me sont chers*

*Je dédie ce travail.*

## *Remerciements*

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

*Je tiens également à remercier Pr. Am Meftah et  
Mr. J. Tibermacin, les membres du jury.*

*Je tiens à exprimer mon encadreur*

*Mme Meftah Afak*

*Professeur à l' université*

*de Biskra, pour*

*sa patience et ces précieux conseils.*

*Mes remerciements à mes parents pour leur  
soutien.*

*Je tiens à remercier tous mes amis qui*

*m' ont aidé de loin ou de près dans*

*la réalisation de ce travail*

*et en particulier Houda .*

# Résumé

Le but de ce mémoire est l'étude de l'effet des épaisseurs et du dopage de l'émetteur et du collecteur sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire p-n en silicium cristallin. Cette étude a été effectuée au sein du laboratoire LMSM à l'université de Biskra.

Les caractéristiques électriques sont la caractéristique courant-tension en présence de l'éclairement solaire AM1.5 et la réponse spectrale, ainsi que les paramètres de sortie de la cellule ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF,  $\eta$ ). La simulation est faite par le logiciel AMPS-1D.

Les résultats obtenus montrent que la diminution de l'épaisseur de l'émetteur, l'augmentation de l'épaisseur du collecteur et l'augmentation du dopage de l'émetteur entraîne une amélioration dans le rendement de la cellule. Cependant, le dopage du collecteur n'a pas d'effet significatif. En plus, l'ajout de régions fortement dopées au dessous des contacts ; p++ coté émetteur et n++ coté collecteur a amélioré le rendement de conversion à 14% devant 11-12% de la cellule solaire simple p-n.

# TABLE DES MATIERES

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	II
Résumé .....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Introduction générale.....	2

## Chapitre I : Notions générales sur la conversion photovoltaïque

<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>05</b>
<b>I.2 Le rayonnement solaire.....</b>	<b>05</b>
I.2.1 Energie solaire.....	05
I.2.2 Constante solaire .....	06
➤ Masse d'air .....	06
<b>I.3 la conversion photovoltaïque.....</b>	<b>08</b>
I.3.1 L'absorption de la lumière.....	10
I.3.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques - génération optique.....	12
I.3.3 Recombinaison.....	14
➤ Les recombinaisons en volume.....	14
➤ Les recombinaisons en surface .....	16
I.3.4 La collecte des charges - Jonction pn.....	17
<b>I.4 Choix du matériau semi-conducteur.....</b>	<b>19</b>
<b>I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....</b>	<b>21</b>
I.5.1 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	21
I.5.2 Caractéristiques électriques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	22

## Chapitre II : Cellule photovoltaïque en silicium cristallin

<b>II.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>27</b>
<b>II.2</b>	<b>Propriétés Photovoltaïque de silicium.....</b>	<b>27</b>
<b>II.3</b>	<b>Les étapes pour obtenir un silicium de qualité électronique.....</b>	<b>30</b>
	II.3.1 Réduction de la silice.....	30
	II.3.2 Purification du silicium.....	30
<b>II.3</b>	<b>Silicium cristallin.....</b>	<b>32</b>
	➤ Le silicium monocristallin.....	32
	➤ Le silicium polycristallin.....	32
<b>II.5</b>	<b>Structure de cellules photovoltaïques industrielles.....</b>	<b>34</b>
	A. Décapage.....	35
	B. Texturation.....	36
	C. Dopage.....	36
	D. Bords de plaque.....	36
	E. Couche antireflet.....	36
	F. Champ face arrière.....	36
	G. Métallisation.....	37

## Chapitre III : Etude par simulation numérique d'une cellule solaire p-n en Si cristallin par AMPS

<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>41</b>
<b>III.2</b>	<b>Le logiciel AMPS .....</b>	<b>41</b>
	III.2.1 Utilisation d'AMPS .....	41
	III.2.2 Les caractéristiques d'AMPS .....	42
	A. Conditions environnementales.....	43
	B. Propriétés du matériau de chaque couche.....	44
	C. Les paramètres de modélisation.....	45

<b>III.3</b>	<b>Résultats et Discussion.....</b>	<b>47</b>
III.3.1	Effet de l'épaisseur de l'émetteur .....	49
III.3.2	Effet de l'épaisseur du collecteur.....	51
III.3.3	Effet du dopage de l'émetteur.....	53
III.3.4	Effet de dopage du collecteur .....	55
<b>III.4</b>	<b>Optimisation de la cellule.....</b>	<b>57</b>
III.4.1	Effet de l'épaisseur de la région fortement dopée n <sup>++</sup> .....	57
<b>III.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>60</b>
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>62</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>64</b>
	<b>Résumé.....</b>	<b>X</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1-</b>	Définition de masse d'air .....	06
<b>Figure I.2-</b>	Schéma indiquant le nombre de masse d'air $AM_y$ en fonction de la position géographique .....	07
<b>Figure I.3-</b>	Spectres: extraterrestre (AM0), terrestre AM1 et AM1,5.....	08
<b>Figure I.4-</b>	Schéma de principe de la conversion photoélectrique .....	09
<b>Figure I.5-</b>	Réflexion, transmission et absorption .....	10
<b>Figure I.6-</b>	Schémas représentant les différents mécanismes de recombinaison au sein du silicium a) Recombinaison RSH ; b) Recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron(1) ou à un trou(2) ; c) Recombinaison radiative.....	16
<b>Figure I.7-</b>	Jonction pn à l'équilibre.....	17
<b>Figure I.8-</b>	a) cristal de silicium (Intrinsèque). b) Silicium dopé type n (Avec l'arsenic).c) Silicium dopé type p (Avec le gallium) .....	19
<b>Figure I.9-</b>	Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque .....	22
<b>Figure I.10-</b>	Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque .....	24
<b>Figure I.11-</b>	Réponses spectrales des différents types de cellules solaires.....	25
<b>Figure II.1-</b>	Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003.....	27
<b>Figure II.2-</b>	Structure de bande du silicium .....	28
<b>Figure II.3-</b>	Méthode de Czochralski .....	31
<b>Figure II.4-</b>	Lingots de silicium monocristallin.....	32
<b>Figure II.5-</b>	Cellules solaires :(a) au silicium monocristallin et (b) au silicium polycristallin.....	33
<b>Figure II.6-</b>	Développement de la taille des cellules solaires.....	33
<b>Figure II.7-</b>	Structure d'une cellule photovoltaïque industriellement silicium.....	34
<b>Figure II.8-</b>	Les étapes de fabrication (A, B, C, D, E, F, G) d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium .....	35
<b>Figure II.9-</b>	Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin .....	38
<b>Figure II.10-</b>	Caractéristique $I(V)$ mesurée pour une cellule PV en silicium polycristallin.....	39

<b>Figure III.1-</b>	L'icône de logiciel AMPS sur PC.....	42
<b>Figure III.2-</b>	Page d'accueil de l'interface utilisateur .....	43
<b>Figure III.3-</b>	L'interface des conditions environnementales.....	44
<b>Figure III.4-</b>	Boîte de dialogue pour la saisie des paramètres du matériau.....	45
<b>Figure III.5-</b>	L'interface de l'exécution.....	45
<b>Figure III.6-</b>	Boîte de dialogue pour progression s'affiche.....	46
<b>Figure III.7-</b>	Interface des résultats .....	46
<b>Figure III. 8-</b>	Schéma de la cellule solaire étudiée.....	47
<b>Figure III. 9-</b>	Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur $W_p$ de l'émetteur.....	49
<b>Figure III. 10-</b>	Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur $W_p$ de l'émetteur.....	50
<b>Figure III. 11-</b>	Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur $W_n$ du collecteur.....	51
<b>Figure III. 12-</b>	Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur $W_n$ du collecteur.....	52
<b>Figure III. 13-</b>	Caractéristique J-V avec l'effet du dopage $N_a$ de l'émetteur.....	53
<b>Figure III. 14-</b>	Réponse spectrale avec l'effet du dopage $N_a$ de l'émetteur.....	54
<b>Figure III. 15-</b>	Caractéristique J-V avec l'effet du dopage $N_d$ du collecteur.....	55
<b>Figure III. 16-</b>	Réponse spectrale avec l'effet du dopage $N_d$ du collecteur.....	56
<b>Figure III. 17-</b>	Schéma de la cellule solaire étudiée.....	57
<b>Figure III.18 -</b>	Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur $W_{n++}$ de la région fortement dopée.....	58
<b>Figure III. 19-</b>	Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur $W_{n++}$ de la région fortement dopée.....	59

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1 -</b>	Absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques (À la longueur d'onde $\lambda = 0.59 \mu\text{m}$ ).....	11
<b>Tableau I.2 -</b>	Propriétés physiques de quelques matériaux semi-conducteurs (Température ambiante) .....	20
<b>Tableau II.1-</b>	Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques.....	28
<b>Tableau II.2-</b>	Quelques propriétés du silicium.....	30
<b>Tableau II.3-</b>	Description et rôle des étapes de fabrication d'une cellule Photovoltaïque Industrielle.....	37
<b>Tableau II.4-</b>	Paramètres de sortie mesurés pour un nombre de cellule solaire en silicium.....	39
<b>Tableau III.1-</b>	Paramètres du silicium.....	48
<b>Tableau III.2-</b>	Paramètres de la cellule p-n.....	49
<b>Tableau III.3-</b>	Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur $W_p$ de l'émetteur.....	50
<b>Tableau III.4-</b>	Paramètres de la cellule p-n.....	51
<b>Tableau III.5-</b>	Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur $W_n$ du collecteur.....	52
<b>Tableau III.6-</b>	Paramètres de la cellule p-n.....	53
<b>Tableau III.7-</b>	Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet du dopage $N_a$ de l'émetteur.....	54
<b>Tableau III.8-</b>	Paramètres de la cellule p-n.....	55
<b>Tableau III.9-</b>	Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de dopage $N_d$ du collecteur.....	56
<b>Tableau III.10-</b>	Paramètres de la cellule p-n.....	58
<b>Tableau III.11-</b>	Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur $W_{n++}$ de la région fortement dopée.....	59

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

Le développement des énergies renouvelables représente un des défis majeurs de nos sociétés pour les générations futures. En effet, la consommation mondiale d'électricité n'a cessé d'augmenter ces dernières décennies [1].

La production mondiale d'énergie actuelle est constituée à 80% d'énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) et fissiles (nucléaire) [1].

Dans le cas des énergies d'origine fossile se pose tout d'abord le problème de l'approvisionnement prévu dans les quelques dizaines d'années à venir en cas de maintien, voire d'intensification, du rythme de la consommation. S'ajoute à cela la question du rejet massif de CO<sub>2</sub> lié à la combustion de ces matières premières, qui devient de plus en plus inquiétante puisque ce gaz à effet de serre contribue au réchauffement climatique [1].

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau [2]. L'énergie photovoltaïque, à savoir la conversion directe de l'éclairement solaire en électricité, possède un potentiel énorme. En effet, l'énergie du rayonnement solaire sur terre est colossale (de l'ordre de 1000 W.m<sup>-2</sup>) [1].

Le principe d'une cellule photovoltaïque repose sur la conversion d'une énergie lumineuse en énergie électrique utilisable et est basée sur trois mécanismes :

- ❖ L'absorption des photons par le matériau constituant la cellule.
- ❖ La conversion en énergie électrique, c'est-à-dire la création de paires électron/trou dans le matériau.
- ❖ La collecte des porteurs générés dans un circuit électrique extérieur [1].

Le matériau le plus utilisé et industrialisé depuis 50 ans pour la fabrication de cellules photovoltaïques est le silicium cristallin (80% de la production mondiale). Ce dernier présente en effet de nombreux avantages (abondance sur terre, bas prix, non toxicité, dopage facile...).

Les cellules produites industriellement atteignent des rendements de conversion de 15% en moyenne (modules à 11-12%). Au laboratoire, les meilleurs rendements atteints sont de l'ordre de 24% avec du silicium monocristallin [2].

Cependant, leurs performances restent inférieures aux cellules en silicium cristallin et la fiabilité des panneaux mérite encore d'être améliorée [1].

L'objectif de ce travail est l'étude par simulation numérique de l'effet du dopage et des épaisseurs sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire (p/n) en silicium cristallin. Nous avons utilisé le logiciel de simulation AMPS pour simuler les caractéristique courant-tension (J-V) et la réponse spectrale (SR) dans les conditions standards d'une cellule solaire (p/n).

Cette étude comporte trois chapitres :

- ❖ Dans le premier chapitre, nous présentons les notions fondamentales sur le rayonnement solaire et le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que les paramètres de sortie caractérisant une cellule solaire.
- ❖ Dans le deuxième chapitre nous présentons le silicium cristallin comme matériau de base dans la technologie photovoltaïque et les étapes de fabrication d'une cellule solaire conventionnelle en silicium cristallin.
- ❖ Dans le troisième chapitre nous présenterons le logiciel de simulation AMPS et comment l'utiliser pour calculer par simulation numérique les caractéristiques électriques courant-tension et la réponse spectrale de la cellule solaire p-n en Si cristallin. Les résultats de simulation obtenus seront également présentés dans le même chapitre.

# **Chapitre I**

## **Notions générales sur la conversion photovoltaïque**

## **I.1 Introduction**

La consommation d'énergie est nécessaire au développement social et économique. Entre savoir créer de l'énergie et savoir l'économiser, il y a un compromis entre la production et la consommation et par suite il faut entrer dans une logique forte d'économies d'énergie et augmenter nettement la part des énergies renouvelables [03].

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale [04].

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire [03].

Ce chapitre recouvre les caractéristiques du rayonnement solaire et le principe de la conversion photovoltaïque.

## **I.2 Le rayonnement solaire**

### **I.2.1 Energie solaire**

Le Soleil est une étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie : 152,1 millions de km). Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. N'oublie pas qu'elle voyage à la vitesse de 300 000 km/s, c'est-à-dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde [5]. La source d'énergie provient d'une réaction nucléaire transformant l'hydrogène en hélium [2]. Le soleil c'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable: 3,82.10<sup>26</sup> Watts [5]. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma [5].

Chaque cm<sup>2</sup> de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes (5.10<sup>-9</sup>) de cette puissance. Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne) [5]. Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion [5].

Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de 15°C à 16°C. Cela correspond à 0,14 W/cm<sup>2</sup> [5]. Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle.

Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection [5].

### I.2.2 Constante solaire

La constante solaire est définie comme étant l'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface de 1m<sup>2</sup> placée perpendiculairement à la direction du rayonnement. Elle est indépendante des conditions météorologiques, mais dépend de la distance terre-soleil [6].

Cette constante avec une valeur approximativement de 1,4KW/m<sup>2</sup> au-dessus de la couche atmosphérique est réduite sur terre à 1KW/m<sup>2</sup> par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique [7].

#### ➤ Masse d'air

La masse d'air est une grandeur physique sans unité qui correspond à l'épaisseur optique de l'atmosphère traversée par un rayonnement d'une longueur donnée. La masse d'air peut s'interpréter comme le « pouvoir absorbant » de l'ensemble des composants de l'atmosphère pour une longueur d'onde particulière [8].

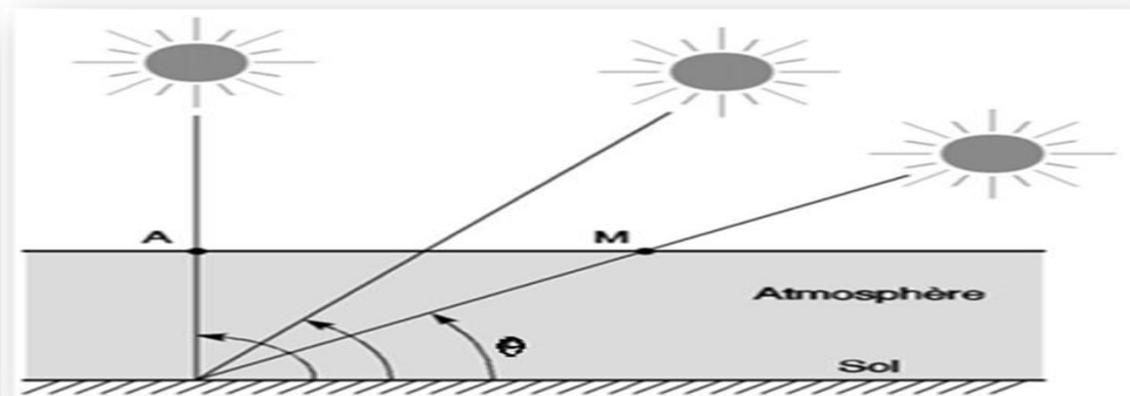


Figure I.1- Définition de masse d'air [9].

On appelle masse d'air ou Air Masse en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la vertical du lieu. La longueur du trajet d'un rayon solaire incliné par rapport à l'horizontale d'un angle  $\theta$  est donné par la formule [9]:

$$OM = \frac{OA}{\sin \theta} \quad (\text{I. 1})$$

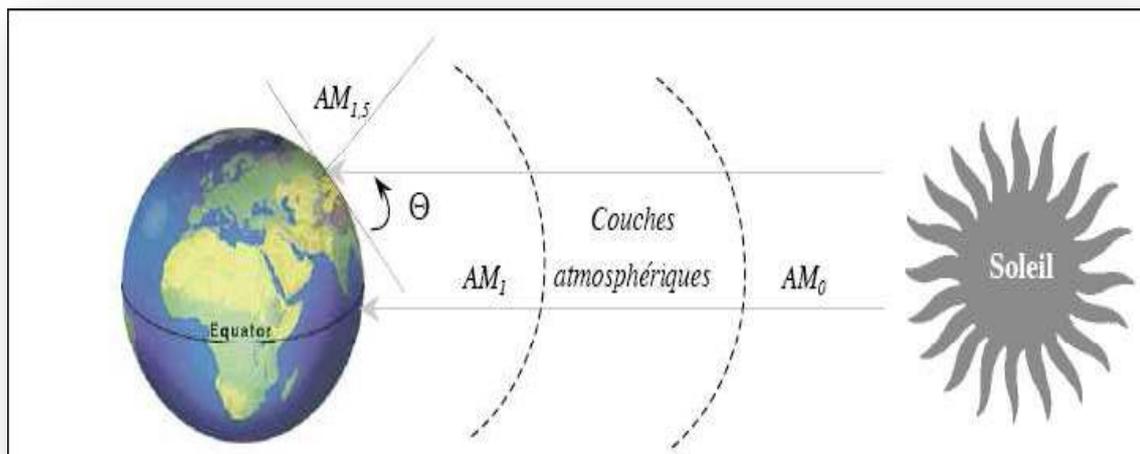
Donc l'Air Masse :

$$\frac{OM}{OA} = y = \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{I. 2})$$

Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons lumineux, on introduit la notion du nombre de masse d'air AM  $y$ ,  $y$  étant défini par [10]:

$$y \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{I. 3})$$

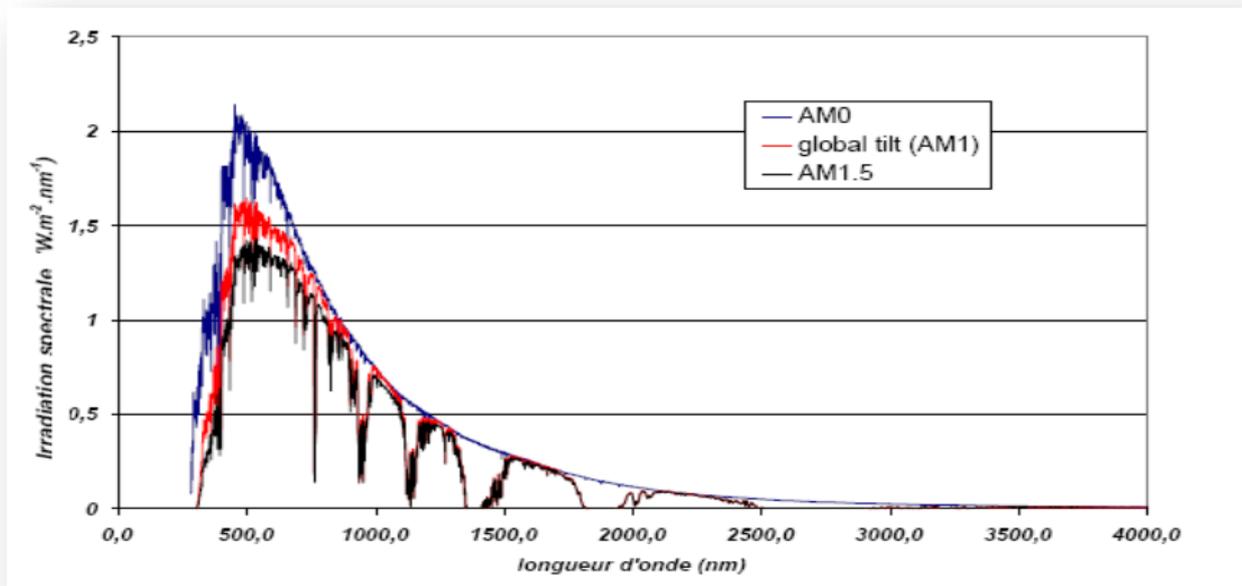
$\theta$  représentant l'élévation du soleil sur l'horizon (voir figure I-2).



**Figure I.2-** Schéma indiquant le nombre de masse d'air  $AM$   $y$  en fonction de la position géographique [10].

On définit ainsi les conditions AM1 quand le soleil est au zénith et AM2 quand le soleil est à  $30^\circ$  au-dessus de l'horizon. La condition hors atmosphère est représentée par la notation AM 0 [10]. La condition AM1, 5 est satisfaite lorsque le soleil est à  $45^\circ$  au-dessus de l'horizon.

Elle est caractérisée par la distribution spectrale représentée sur la figure I-3 avec un flux solaire de  $1000 \text{ W.m}^{-2}$ . La norme internationale choisie correspond à un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  pour une traversée d'atmosphère AM1, 5 [10].



**Figure I.3-** Spectres: extraterrestre (AM0), terrestre AM1 et AM1, 5 [5].

### **I.3 La conversion photovoltaïque**

Le terme photovoltaïque vient des grecs *photo*, « photos » qui désigne la lumière et de « *voltaïque* », mot dérivé du physicien italien « *VOLTA* » connu pour ses travaux sur l'électricité [11]. L'abréviation commune pour le photovoltaïque est PV [2].

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- ✚ 1838 : Le physicien français EDMOND BEQUEREL découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide : c'est l'effet photovoltaïque.
- ✚ 1875 : WERNER VON SIEMENS expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- ✚ 1954 : Trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale cherche des solutions pour alimenter ses satellites.
- ✚ 1958 : une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ✚ 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïque.
- ✚ 1985 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie [9].

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable [9].

Les trois grandes familles de matériaux sont les métaux, les isolants et les semi-conducteurs. Leur interaction avec un rayonnement est différente pour chacun. Quand un photon interagit avec un électron, il lui transfère intégralement son énergie seulement s'il existe un niveau énergétique final de l'électron qui soit autorisé et libre.

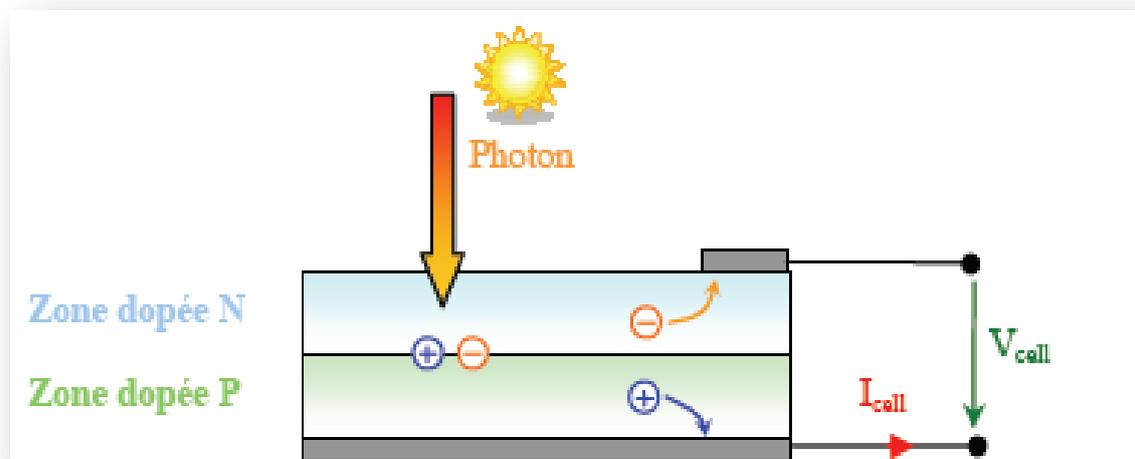
Dans un métal, tous les niveaux au-dessus du niveau de Fermi sont libres mais l'électron excité revient directement dans son état initial en transformant l'énergie en chaleur. Il n'est pas possible de convertir l'énergie reçue autrement qu'en chaleur.

Dans un isolant, un photon interagit avec un électron seulement s'il peut lui donner une énergie supérieure au gap  $E_g$  du matériau, pour atteindre les premiers états libres situés au moins 5 eV plus haut (soit une longueur d'onde inférieure à 250 nm). Le rayonnement solaire ne peut donc pas être absorbé par un isolant.

Enfin, pour un semi-conducteur, la bande interdite  $E_g$  étant de 0.5 à 2 eV, un photon d'énergie adéquate pourra promouvoir un électron de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC) [12].

Elle met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- ✚ L'absorption de la lumière dans le matériau.
- ✚ Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- ✚ La collecte des charges [13].



**Figure I.4** - Schéma de principe de la conversion photoélectrique [11].

### I.3.1 L'absorption de la lumière

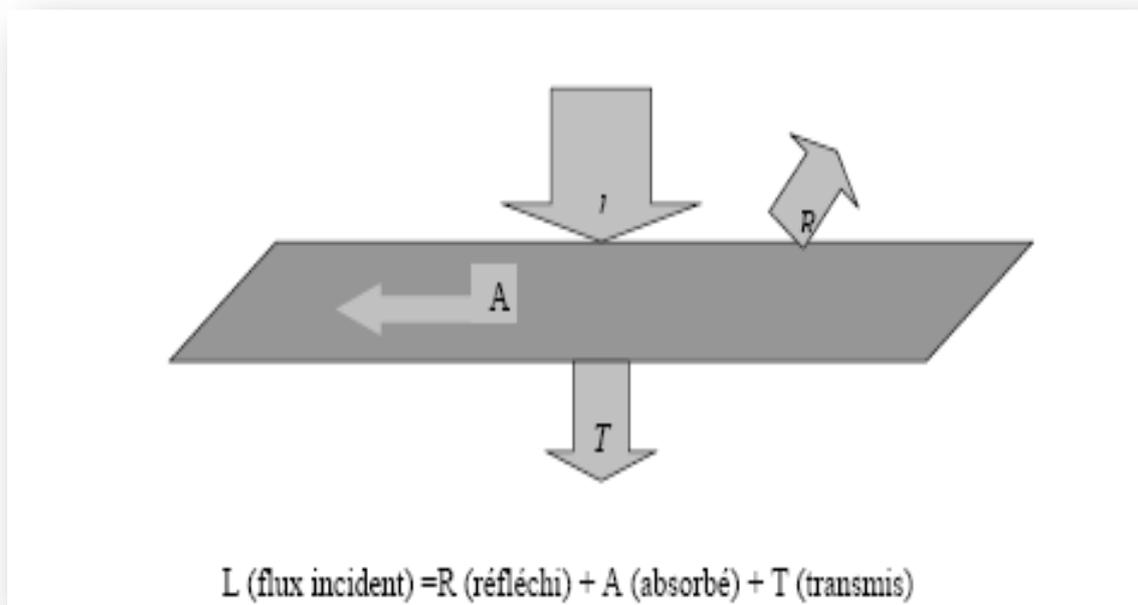
La lumière se compose de photons, (grains de lumière), chacun, porteur d'une énergie dépendante sa longueur d'onde (ou couleur du rayon).

Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer a travers les objets transparents pour notre œil et laissent passer la lumière visible [13].

Les théories ondulatoires (équations de Maxwell) ou corpusculaires de la lumière nous permettent d'aborder les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux. Conformément à la théorie corpusculaire, les quanta d'énergie associés au rayonnement lumineux s'appellent photons [2].

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques (figure I.5):

- ✚ La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- ✚ La transmission : la lumière traverse l'objet.
- ✚ L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme [03].



**Figure I.5 - Réflexion, transmission et absorption [13].**

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie du photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation :

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda} \quad (\text{I. 4})$$

$\nu$  : Fréquence de la radiation.

$\lambda$  : Longueur d'onde de la radiation.

$c$  : Vitesse de la lumière.

$E_p$  : Énergie du photon en eV.

$h$  : Constante de Planck [2].

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle décroissante, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière. Si  $E_{inc}$  est l'énergie incidente, l'énergie restante à la profondeur  $d$  s'écrit :

$$E = E_{inc}e^{-\alpha d} \quad (\text{I. 5})$$

Donc l'énergie absorbée dans l'épaisseur  $d$  est égale à :

$$E_{abs} = E_{inc} - E_{inc}e^{-\alpha d} = E_{inc}(1 - e^{-\alpha d}) \quad (\text{I. 6})$$

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente :

Matériau	$\alpha$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
Silicium cristallin	$4.5 \times 10^3$
Silicium amorphe	$2.5 \times 10^4$
Arséniure de Gallium	$5.4 \times 10^4$

**Tableau 1.1** -Absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques  
(À la longueur d'onde  $\lambda = 0.59 \mu\text{m}$ )[2].

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence sur la bande de conduction, des paires électrons-trous peuvent se créer. Ce phénomène appelé mode d'absorption intrinsèque [2].

### I.3.2 Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques – génération optique

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité [12]. Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi-conductrice, tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) est un ensemble d'électrons gravitant autour [13].

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leurs énergies aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leurs permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leurs noyau, ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur.

En régime permanent, l'électron libre laisse un trou qui se traduit par une charge positive, si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite, on génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique [13].

Si une intensité  $I_i(\lambda)$  incidente sur une surface de coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  et de coefficient de réflexion  $R(\lambda)$  est absorbée et devient à une profondeur  $x$  selon la loi de Bouguer-Lambert [15] :

$$I(\lambda, x) = I_i(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)x} = I(\lambda, 0)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (I. 7)$$

On encore, le flux incident de photons de longueur d'onde  $\lambda$ .  $\phi_i(\lambda)$  devient à la profondeur  $x$  le flux  $\phi(\lambda, x)$  selon [15]:

$$\phi(\lambda, x) = \phi_i(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)x} = \phi(\lambda, 0)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (I. 8)$$

On : définit le taux d'absorption volumique des photons  $A(\lambda, x)$  (photons/cm<sup>2</sup>/s) par [15]:

$$A(\lambda, x) = \frac{\partial \Phi(\lambda, x)}{\partial x} = \alpha(\lambda) \Phi(\lambda, x) \quad (\text{I. 9})$$

Pour qu'il y ait génération optique des paires électrons-trous, il faut que les photons soient d'énergie  $\geq E_g$  [15].

De plus comme les principales radiations exploitables du spectre solaire sont situées dans le visible et le proche infrarouge entre 0.4µm et 1.6µm , on comprend facilement que les seules transitions possibles auront des énergies comprise entre 0.7ev et 3ev, ce qui conduit à privilégier les matériaux semi-conducteurs dont le gap se situe dans cette gamme d'énergie.

Un rapport entre le nombre de paires électrons-trous générées et le nombre de photons absorbés. C'est le rendement quantique  $\gamma(\lambda, x)$ , soit en  $x$   $G(\lambda, x)$  le taux de génération volumique de paires pour une onde monochromatique, On a [15] :

$$\frac{G(\lambda, x)}{A(\lambda, x)} = \gamma(\lambda, x) \quad (\text{I. 10})$$

Les photons absorbés pourront générer ainsi des paire électron-trou ( $e^-e^+$ ) provoquant l'effet photovoltaïque dans des conditions appropriées. La génération optique des paires  $e^-e^+$  est le phénomène le plus important sur lequel repose le fonctionnement des photopiles , et le taux de génération volumique  $G(\lambda, x)$ , étant proportionnel à  $\alpha(\lambda)$ , ce dernier sera très important en conversion photovoltaïque [15].

Dans un métal, les électrons peuvent absorber l'énergie des photons et passer à un niveau d'énergie supérieur, puis par thermalisation retourner très rapidement (après quelques picoseconde) à l'état initial, on ne peut utiliser les métaux pour la conversion puisque l'énergie est perdue en énergie thermique lorsqu'elle est absorbée ; sinon elle est réfléchié [15].

Dans un isolant, il ne peut y avoir de circulation de courant, il reste forcément comme déjà indiqué les semi-conducteurs dont le gap idéal se situe autour de 1.35 ev (la largeur de bande interdite dans les semi-conducteurs est  $0.6 \text{ ev} < E_g < 2 \text{ ev}$ ), de plus la durée de vie des porteurs ainsi générés est bien supérieur a celle des électrons dans un métal [15].

Ceci laisse beaucoup plus de temps pour séparer les électrons des trous, combattre les recombinaisons électrons-trous et générer un courant électrique, tout ceci sous l'influence d'un champ électrique. Ce champ sera disponible grâce à une jonction p-n ou une hétérojonction métal [15].

### I.3.3 Recombinaison

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8}$ s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons (mécanisme) [16].

Lors d'une génération des paires électrons-trous, il faut aussi considérer le processus inverse ou recombinaison des paires électrons-trous, permettant de définir les taux de recombinaison  $R_n$  pour les électrons,  $R_p$  pour les trous par [15]:

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n, p}{\tau_{n,p}} \quad (\text{I. 11})$$

Avec :  $\Delta n, p = n, p - n_e, p_e$  : La densité des porteurs générés.

$n_e, p_e$  : La densité des porteurs à l'équilibre.

$\tau_{n,p}$  : La durée de vie de ces porteurs.

La recombinaison des électrons et des trous est un processus par lequel les deux porteurs s'annihilent. Les électrons arrivant à la bande de conduction retournent à la bande de valence selon différents mécanismes, soit en une seule étape ou par des étapes multiples [17].

Les trois mécanismes de recombinaison sont semblables par le fait qu'ils contribuent tous pour annihiler les porteurs en excès et ils sont [17]:

#### ➤ Les recombinaisons en volume

Nous avons trois types des recombinaisons en volume sont les suivants:

##### ❖ Recombinaison en volume de type radiatif

Le processus de recombinaison radiative ou inter-bandes est défini comme l'inverse du processus d'absorption. L'excès d'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme d'un rayonnement optique. Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe comme le GaAs et faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Si. De ce fait, ce mécanisme n'influe pas considérablement sur la durée de vie des porteurs minoritaires. Le taux de recombinaison est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous [16]:

$$R = B(pn - n_i^2) \quad (\text{I. 12})$$

Avec :  $B$  est le coefficient de recombinaison radiative, sa valeur est égale à  $9.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$ .

❖ Recombinaison en volume de type Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est donné par la relation [16]:

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (\text{I. 13})$$

Avec:

$C_n$  et  $C_p$  sont des coefficients d'Auger. Leurs valeurs sont respectivement :

$$C_n = 2.2 \cdot 10^{-31} \text{cm}^6, C_p = 9.9 \cdot 10^{-32} \text{cm}^6/\text{s}.$$

❖ Recombinaison en volume de type piège

Les deux mécanismes précédents ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par des processus de recombinaison plus efficaces faisant intervenir les niveaux profonds.

Pour le silicium, il y a des niveaux profonds proches du milieu de la bande interdite associés à quelques impuretés courantes. L'électron a tendance à revenir à son état initial dans la bande de valence, en passant par ces niveaux (s'ils existent) [16].

a) Recombinaison en volume de type RSH

Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de Read-Shokley-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation [16]:

$$R_{\text{RSH}} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left( p + n_{ie} e^{\frac{-E_T}{KT}} \right) + \tau_p \left( n + n_{ie} e^{\frac{-E_T}{KT}} \right)} \quad (\text{I. 14})$$

Ou :

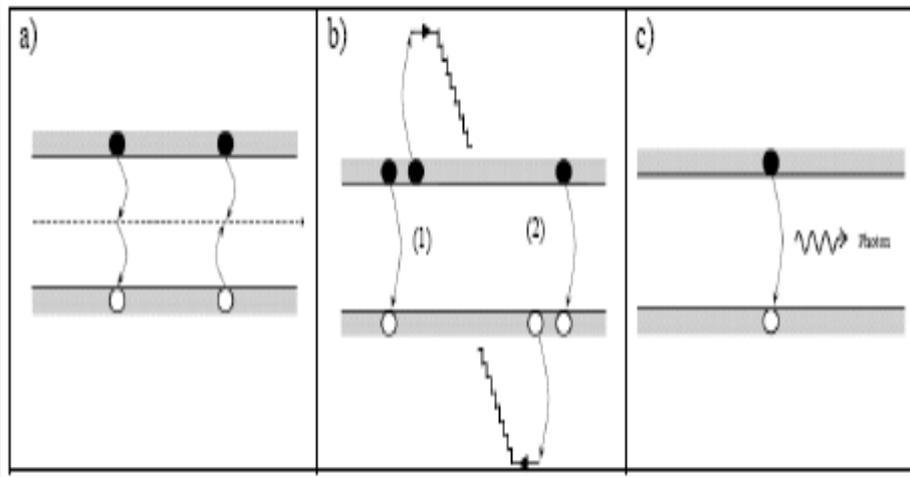
$E_T$  : Représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite.

$\tau_n$  et  $\tau_p$  ont une valeur égale à  $10^3 \mu\text{s}$ .

$n_{ie}$  : Est la concentration intrinsèque effective donnée par la relation suivante :

$$n_{ie}^2 = pn \exp\left(\frac{\Delta E_{g_n} + \Delta E_{g_p}}{KT}\right) \quad (\text{I. 15})$$

Elle est due au rétrécissement de la bande interdite pour un semi-conducteur fortement dopé et  $\Delta E_{gn}$ ,  $\Delta E_{gp}$  présentent le rétrécissement de la bande interdite [16].



**Figure I.6** - Schémas représentant les différents mécanismes de recombinaison au sein du silicium a) Recombinaison RSH ; b) Recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron(1) ou à un trou(2) ; c) Recombinaison radiative [18].

➤ **Les recombinaisons en surface**

La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses, en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et autres défauts caractéristiques à température constante (T=300°K). Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérentes aux densités de dopages selon la relation suivante [16]:

$$S = S_0 \left( \frac{N}{N_{set}} \right)^\alpha \quad (I.16)$$

$S_0, N_{set}$  et  $\alpha$  dépendent du traitement de la surface et de la passivation. Pour une oxydation thermique d'une couche de silicium de type n,  $\alpha$  est de 1 et  $N_{set}$  est de  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ .

La passivation est l'ajout d'une couche d'oxyde (par exemple le  $\text{SiO}_2$  pour le silicium) en surface pour limiter les recombinaisons en surface et combler les liaisons cassées (en surface) lors de la découpe du semi-conducteur [16].

### I.3.4 La collecte des charges - Jonction pn

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteurs. Les résultats obtenus trouveront leurs applications dans de nombreux composants plus complexes [18].

Cette structure simple est constituée d'une base en c-Si de type p dopée  $n^+$  localement pour former l'émetteur. La différence de concentration d'électrons entre la zone dopée  $n^+$  et celle de type p entraîne une tension de diffusion  $V_D$  à la jonction des deux zones de conductivité opposée. La tension de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une zone appelée ZCE (Zone Charge d'Espace) [2].

A l'équilibre, cette zone désertée de porteurs libres est présente essentiellement dans la région la moins dopée. Sa largeur varie en moyenne entre 0.1 et 1 micron en fonction du profil et du niveau de dopage [2].

On distingue alors, dans la jonction p/n, deux zones [2]:

- ✚ Les zones neutres (émetteur et base) où il ne règne aucun champ électrique.
- ✚ La zone charge d'espace.

A la jonction, le champ électrique intrinsèque permet l'accélération des porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires. Ainsi, les électrons de la base de type p sont accélérés vers la zone d'émetteur dopée  $n^+$  [2].

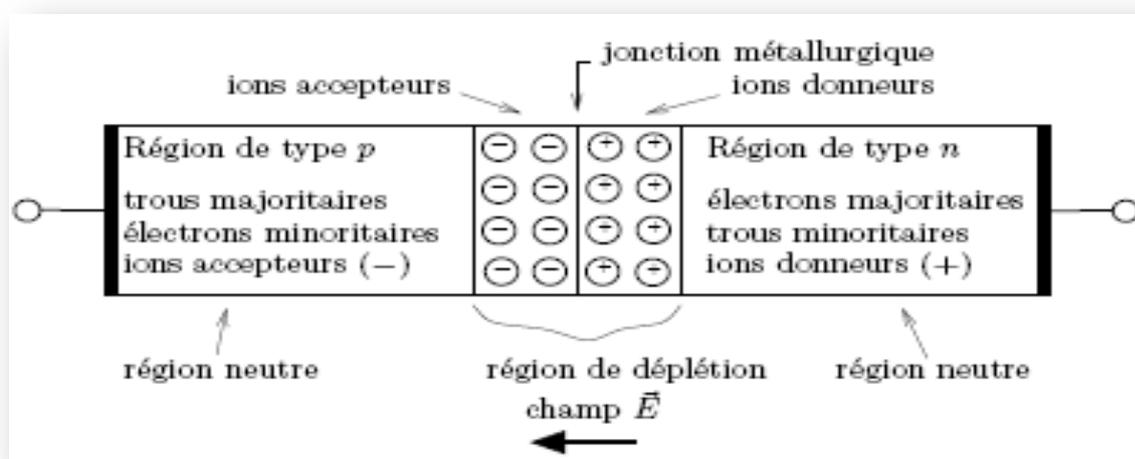


Figure I.7 - Jonction pn à l'équilibre [19].

### ❖ Dopage des semi-conducteurs

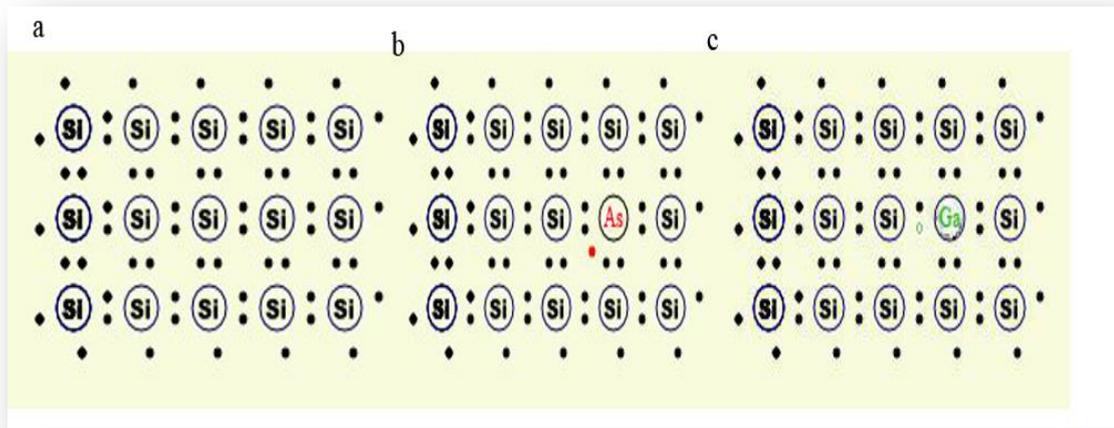
Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement [16]. Le dopage des semi-conducteurs pur va permettre d'amener des charges excédentaires qui amélioreront la conductivité du matériau [13]. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques [16].

Considérons par exemple un semi-conducteur de la colonne (IV) comme le silicium, dans lequel on introduit un atome d'arsenic remplace un atome de silicium et établit des liaisons avec ses quatre voisins. L'atome d'arsenic est alors environné de 9 électrons dont 8 saturent les orbitales liantes du cristal. Le 9<sup>ème</sup> électron occupe alors une orbitale beaucoup plus délocalisée dans le champ de l'ion positif  $As^+$ . L'énergie de liaison  $E_D = E_c - E_d$  de cet électron est de l'ordre de quelques meV dans les semi-conducteurs à gap direct et quelques dizaines de meV dans les semi-conducteurs à gap indirect.

A la température ambiante cet électron est donc libéré dans le réseau par agitation thermique et occupe un état de la bande de conduction. Parallèlement l'arsenic a une charge positive excédentaire et devient un ion  $As^+$ . On dit que l'arsenic dans le silicium est un donneur en raison du fait qu'il donne un électron de conduction au réseau [2].

Remplaçons un atome de silicium par un atome de la colonne (III), tel que le gallium. Dans la coordination tétraédrique, il apparaît maintenant un déficit d'électron. L'électron manquant est alors facilement remplacé par un électron provenant d'une liaison voisine. Le passage d'un électron depuis une liaison intrinsèque du cristal vers l'atome de gallium entraîne d'une part la création d'un trou dans la bande de valence et d'autre part l'apparition d'une charge négative excédentaire au voisinage de l'atome de gallium. L'atome de gallium, qui est appelé accepteur, devient alors un ion négatif  $Ga^-$ . Par analogie avec l'électron sur le donneur, on peut considérer que le trou qui apparaît dans la bande de valence était piégé sur l'accepteur.

L'énergie qu'il faut pour transférer un électron de la bande de valence sur l'accepteur est alors appelée énergie de liaison  $E_A = E_a - E_v$  du trou sur l'accepteur. Cette énergie de liaison est de l'ordre de quelques dizaines de meV [2].



**Figure I.8** -a) cristal de silicium (Intrinsèque).

b) Silicium dopé type n (Avec l'arsenic).

c) Silicium dopé type p (Avec le gallium) [2].

A l'interface où les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium du type p au type n apparaît la zone charge d'espace qui provient de la tendance des électrons excédentaires, et la tendance des trous à vouloir passer du côté n par réciprocity. Cet échange de porteurs dans la zone de charge spatiale crée un champ électrique qui va contrebalancer l'échange de charge et rétablir l'équilibre thermique [2].

#### **I.4 Choix du matériau semi-conducteur**

Parmi les paramètres qui limitent le rendement de conversion d'une pile solaire, la largeur de bande interdite  $E_g$  apparaît comme l'un des plus importants. C'est en effet l'énergie nécessaire à la création d'une paire électron-trou. En outre, elle fixe la valeur maximale de la tension de circuit ouvert [2]. On emploie d'ailleurs le terme de facteur de tension  $F$  pour exprimer le rapport entre ces deux paramètres [2]:

$$F = q \frac{V_{co}}{E_g} \quad (\text{I. 17})$$

La photo tension théorique maximale est la tension de diffusion qui dépend de la concentration en impuretés. Celle-ci ne peut atteindre une valeur proche de la tension correspondant à la largeur de bande interdite, que pour des matériaux très dopés où le niveau de Fermi est voisin du bord de bande. Mais alors la longueur de diffusion des porteurs excédentaires diminue et les porteurs de charge se recombinent avant d'atteindre la jonction. Le courant de court-circuit décroît [2].

On parvient à des rendements de conversion théoriques compris entre 10 et 30%, avec certains semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le germanium (Ge), le phosphore d'indium, le sulfure de cadmium, l'arséniure de gallium (AsGa) [2].

Le tableau ci-après indique les propriétés électriques et cristallines de quelques matériaux [2].

	AsGa	AlAs	Si	Ge
<b>Poids atomique ou moléculaire</b>	144.64	101.9	28.09	72.60
<b>Densité g.cm<sup>-3</sup></b>	5.32	3.79	2.33	5.32
<b>Paramètre cristallin</b>	5.653	5.661	5.43	5.658
<b>Concentration intrinsèque de porteurs At.cm<sup>-3</sup></b>	1.8 10 <sup>6</sup>	–	1.5 10 <sup>10</sup>	2.4 10 <sup>13</sup>
<b>Mobilité maximale des électrons cm<sup>2</sup>.v<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup></b>	8800	180	1500	4000
<b>Mobilité maximale des trous cm<sup>2</sup>.v<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup></b>	450	–	600	2000
<b>Energie de la bande interdite eV D : transition directe I : transition indirecte</b>	1.41 D 1.86 I	3.01 D 2.17 I	1.11 I	0.67 I
<b>Point de fusion °C</b>	1238	1740	1417	937
<b>Conductivité thermique W.cm<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup></b>	0.45	0.08	1.5	0.6
<b>Coefficient de dilatation thermique 10<sup>-6</sup>. °C<sup>-1</sup></b>	6	5.2	2.5	5.5
<b>Constante diélectrique</b>	13.1	8.5	11.8	16.3

**Tableau I.2 - Propriétés physiques de quelques matériaux semi-conducteurs (Température ambiante) [2].**

Nous voyons que le désaccord entre les paramètres cristallins se chiffre à 0.088%, quand on compare le germanium à l'arséniure de gallium. Les coefficients de dilatation ont des valeurs voisines. Une hétéro structure réalisée avec ces deux matériaux semble donc théoriquement envisageable [2].

La densité de l'arséniure de gallium est 2 à 3 fois supérieure à celle du silicium. En ce qui concerne les applications spatiales, où la masse est un facteur important, un optimum devra donc être trouvé entre le rendement de conversion de la photopile et sa géométrie [2].

En pratique le choix du matériau résulte de nombreux critères, tels que son procédé de fabrication, sa pureté, l'état des matières premières...les piles solaires commercialisées sont réalisées sur silicium.

Dans le domaine des applications spatiales, les travaux de recherche sur l'arséniure de gallium s'intensifient, et les premières piles solaires paraissent en production de série. Les autres matériaux :InP, CdTe, CdS, ne donnent encore que des photopiles de laboratoire [2].

## **I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

### **I.5.1 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

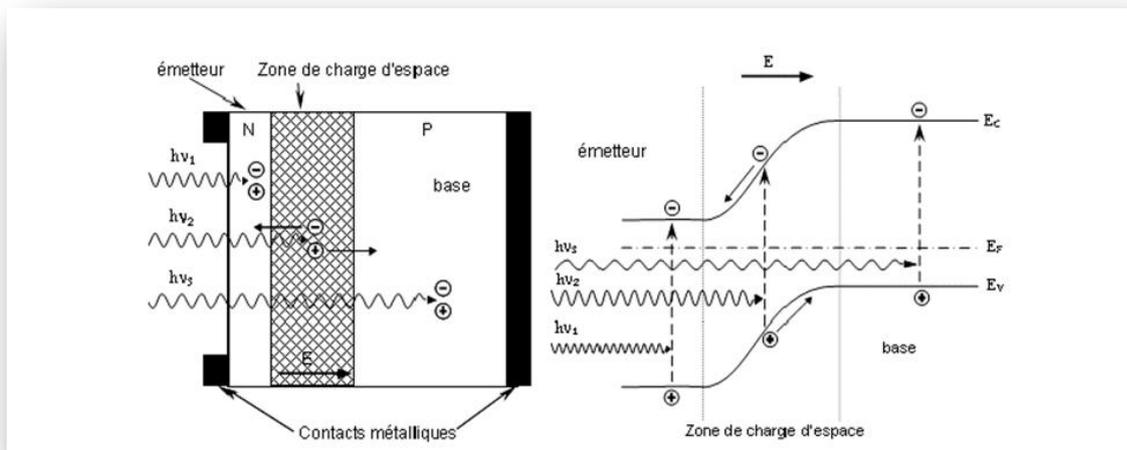
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées [20].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I-9 :



**Figure I.9** - Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque [20].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photos porteuses auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura une photo courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [20].

### I.5.2 Caractéristiques électriques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit [20] :

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

Avec :  $I_{ph}$  : densité de courant photogénèse.

$I_{obsc}$  : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (I. 18) peut être écrite sous la forme suivante [20] :

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

Avec : **I<sub>s</sub>** : 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'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant.

La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la figure 1.10 [20].

A partir de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment [20] :

**I<sub>cc</sub>** : Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  d'une cellule photovoltaïque obtenu pour une tension  $V=0$ , caractérise la quantité des paires électrons trous créés  $G$  qui traverse la jonction sans être recombinées et ce entre les longueurs de diffusion des électrons et trous ( $L_n$  et  $L_p$ ) [21]:

$$I_{cc} = q G(L_n + L_p) \quad (\text{I. 20})$$

**V<sub>co</sub>** : La tension de circuit ouvert, Sous obscurité ( $I=0$ ), la cellule fournit un courant égal au courant de court-circuit  $I_{cc}$  pour une tension, appelée tension en circuit ouvert  $V_{co}$ [21]:

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{I. 21})$$

**I<sub>m</sub>** : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [20].

**V<sub>m</sub>** : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [20].

**FF** : Le facteur de forme met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule photovoltaïque mais aussi et surtout son vieillissement. Il est défini par le rapport de la puissance maximale  $P_M$  et de la valeur du produit  $I_{cc} \cdot V_{co}$ [21]:

$$FF = \frac{P_M}{V_{oc} I_{cc}} = \frac{V_M I_M}{V_{oc} I_{cc}} \quad (\text{I. 22})$$

$\eta$  : Le rendement de conversion (efficiency) exprime en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{inc}$  [7] :

$$\eta = \frac{P_M}{P_{inc}} = \frac{FF V_{oc} I_{cc}}{P_{inc}} \quad (I. 23)$$

**EQE** : Le rendement quantique, note EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents.

Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante [7] :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)\lambda} = 1,24 \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)\lambda} \quad (I. 24)$$

Ou :  $J_{cc}$  : est la densité de courant de Court-circuit ( $A.cm^{-2}$ ).

$\varphi$  : est l'éclairement reçu par l'échantillon ( $w.cm^{-2}$ ).

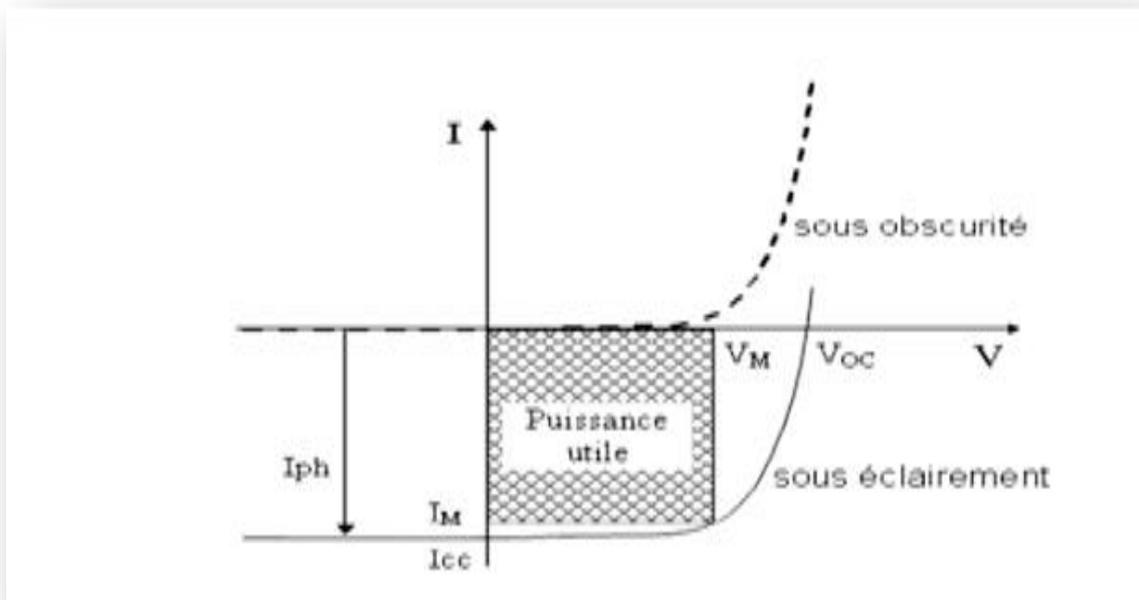
$\lambda$  : est la longueur d'onde monochromatique (nm).

$h$  : est la constante de Planck (J.s).

$c$  : est la vitesse de la lumière ( $J.ms^{-1}$ ).

$e$  : la charge électronique.

$E_{ph}$  : l'énergie du photon.



**Figure I.10** - Caractéristiques  $I=f(V)$  sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque [20].

**SR** : La réponse spectrale est, de manière analogue, le rapport de l'intensité  $I(\lambda)$  générée par la cellule sur la puissance incidente  $P_{inc}(\lambda)$ , pour chaque longueur d'onde [22]:

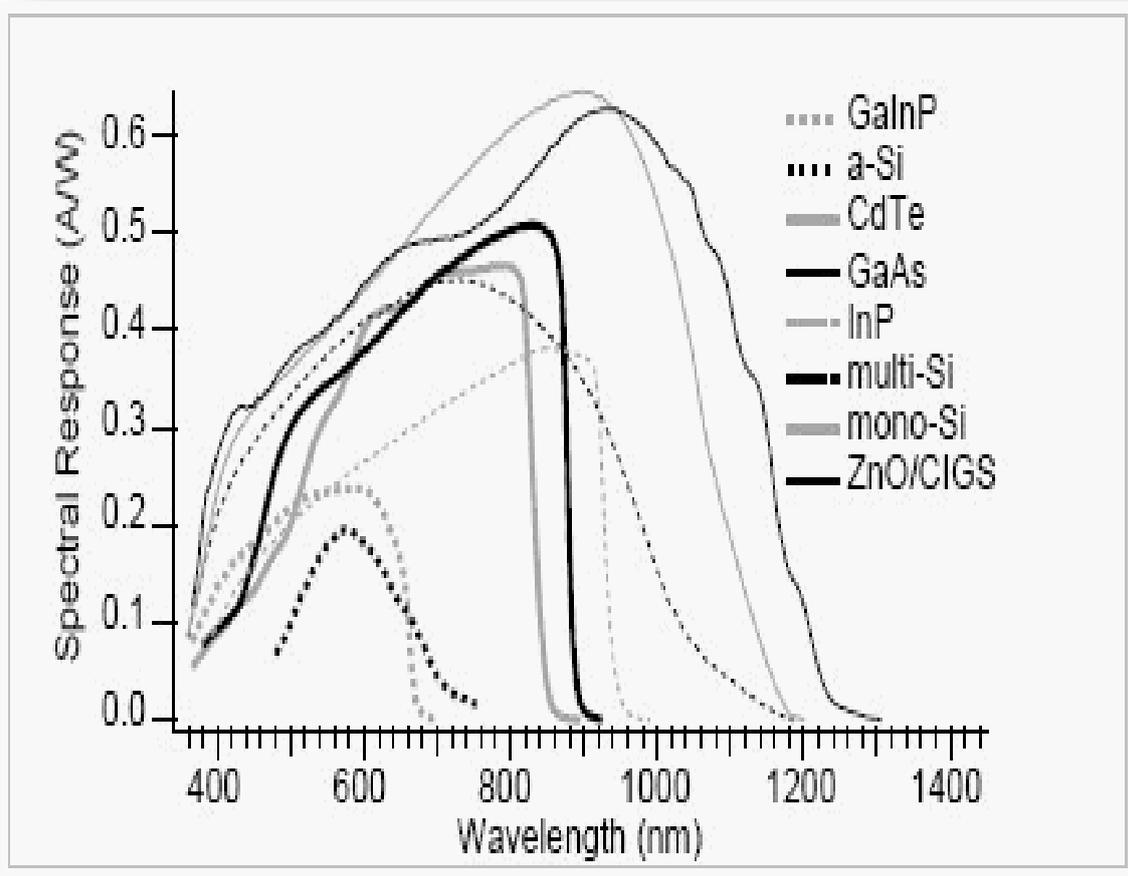
$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot S} \quad (I.25)$$

Où :  $\phi(\lambda)$ : est le flux lumineux incident ( $W \cdot m^{-2}$ ).

$S$ : est la surface de la cellule ( $m^2$ ).

C'est en général cette grandeur qui est mesurée et qui permet de calculer le rendement quantique, en prenant en compte l'énergie des photons [22] :

$$SR = \frac{e\lambda}{hc} EQE \quad (I.26)$$



**Figure I.11** - Réponses spectrales des différents types de cellules solaires [23].

## **Chapitre II**

# **Cellule photovoltaïque en silicium cristallin**

## II.1 Introduction

Les photopiles ou cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à base de matériaux semi-conducteurs [17], Aujourd'hui, plus de 99 % des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le silicium cristallin (monocristallin, multi cristallin), et le silicium amorphe [4].

Dans ce chapitre nous allons présenter le silicium cristallin comme matériau de base dans la technologie photovoltaïque et la fabrication des cellules solaires en silicium.

## II.2 Propriétés Photovoltaïque de silicium

Le silicium fait partie de la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, il dispose de 4 électrons de valence [24]. Malgré que le silicium n'est pas le matériel idéal pour la conversion PV, mais il est le plus utilisé à ce jour pour la réalisation des cellules solaires (plus de 90%) [17]. Ce semi-conducteur présente en effet différents avantages :

- ❖ Il est abondant à la surface du globe terrestre ;
- ❖ Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs. III .V ;
- ❖ Il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- ❖ Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore) [17].

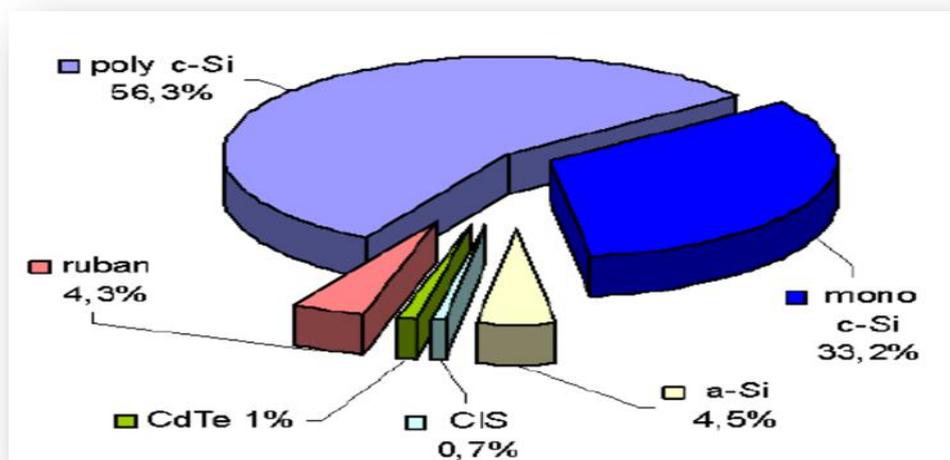


Figure II.1 –Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003[20].

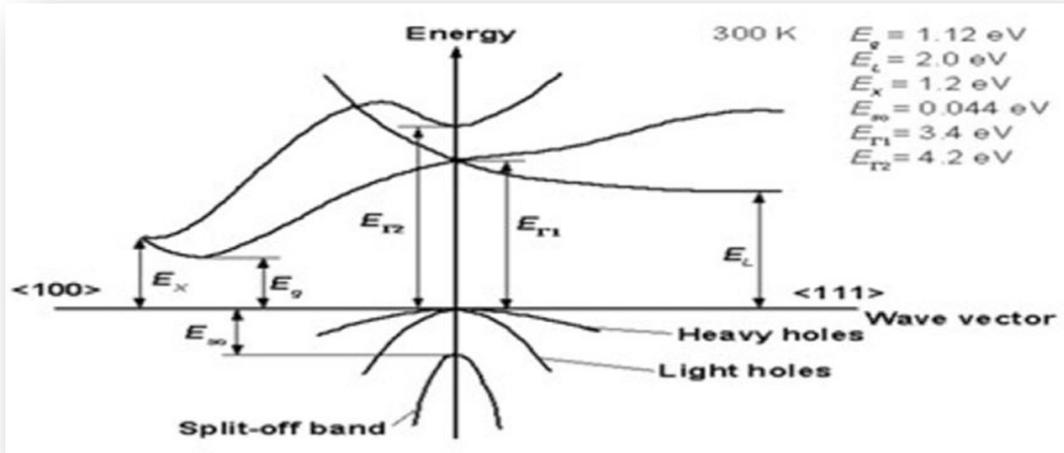


Figure II.2 –Structure de band du Silicium [16].

Son seul véritable inconvénient est son gap indirect qui entraîne une faible absorption du rayonnement par rapport à un matériau à gap direct. Pour absorber 90% du spectre solaire, il faut utiliser une épaisseur de 100  $\mu$  m alors que seulement 1  $\mu$ m de GaAs suffit [17].

Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin (mc-Si) et celles à partir de silicium polycristallin (pc-Si). Le silicium polycristallin est le plus utilisé (47% contre 35 % pour le monocristallin) [2].

Le tableau suivant reprend les principaux avantages et inconvénient des différents types de cellules PV [25].

Types de cellules PV		AVANTAGES	INCONVENIENT
Cellules cristallines	Cellules monocristallines	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bon rendement, de 14 à 16%.</li> <li>• bon ratio (d'environ 150 WC/m<sup>2</sup>) ce qui permet un gain de place si nécessaire (surface de 1,75 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance).</li> <li>• durée de vie importante (+/- 30 ans).</li> <li>• nombre de fabricants élevé.</li> <li>• stabilité de production.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coût de production élevé.</li> <li>• rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• Méthode de production laborieuse.</li> </ul>
	Cellules polycristallines	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bon rendement, de 11 à 13%.</li> <li>• bon ratio (environ 120 WC/m<sup>2</sup>) mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin (surface de 2 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance).</li> <li>• durée de vie importante (+/- 30 ans).</li> <li>• meilleur marché que le monocristallin.</li> <li>• cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module.</li> <li>• stabilité de production.</li> <li>• adapté à la production à grande échelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rendement faible sous un faible éclairement.</li> </ul>

<b>Couches minces</b>	<b>Silicium amorphe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert).</li> <li>•un peu moins chère que les autres technologies.</li> <li>•intégration sur supports souples ou rigides.</li> <li>•Moins sensible aux températures élevées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•rendement faible en plein soleil, de 5% à 7%.</li> <li>•nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio WC/m<sup>2</sup> faible, environ 60 WC/m<sup>2</sup>) - (surface de 3,75 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance).</li> <li>•performances qui diminuent avec le temps, d'environ 7%.</li> <li>•Durée de vite courte (+/10ans)</li> </ul>
	<b>CIS / CIGS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince (rendement de 13%, avec des perspectives de 20% en laboratoire).</li> <li>•permet de s'affranchir du silicium.</li> <li>•les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité.</li> <li>•la cellule peut être construite sur un substrat flexible.</li> <li>•coût moindre que pour le silicium amorphe.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ratio WC/m<sup>2</sup> moyen (surface de 2,75 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance).</li> <li>•moins performant que le silicium traditionnel.</li> </ul>
	<b>Tellure de cadmium</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•très bonne capacité d'absorption de lumière rendement plus élevé, comparativement aux modules traditionnels, notamment aux hautes températures.</li> <li>•stockage efficace du cadmium au sein d'un composé stable pendant des dizaines d'années.</li> <li>•durée d'amortissement rapide (coûts de production faibles).</li> <li>•faible empreinte de carbone parmi les technologies courantes sur base d'un cycle de vie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•utilisation d'un composé toxique (cadmium). Bien qu'enfermé entre des plaques de verres, la fabrication et le recyclage peuvent s'avérer potentiellement polluants.</li> <li>•surface nécessaire pour obtenir 1 MWC de puissance d'environ 2,75 ha.</li> </ul>

**Tableau II.1**-Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques [25].

De par ses multiples applications, le silicium est un des matériaux aux propriétés les mieux connues. Même le comportement de la plupart des impuretés dans le silicium a fait l'objet de très nombreuses publications [24].

L'indice de réfraction relativement élevé limite les applications optiques du silicium. Les propriétés d'absorption/transmission dans le spectre de longueur d'onde 0,4 à 1,5 $\mu$ m sont importantes dans le rendement des cellules photovoltaïques et dispositifs photoconducteurs. Dans les applications photovoltaïques des couches anti reflets appliquées au silicium sont couramment utilisés [2].

Le silicium est fragile même lorsqu'il est allié avec de petites quantités d'impuretés. Façonner le silicium pour les applications photovoltaïques nécessite du sciage et du meulage. Les applications microélectroniques nécessitent du polissage. Ces opérations mécaniques sont très similaires à celles appliquées aux verres. Le tableau II.2 présente quelques propriétés de silicium [2].

Propriétés	Valeur
Masse volumique $\rho$ (à 300K) g/cm <sup>3</sup>	2.329
Masse volumique $\rho$ (1687 K) g/cm <sup>3</sup>	2.51
Gain en densité Transition liquide-solide %	+ 9.1
Conductivité thermique k (300K) cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	1.5
Tf-Température de fusion K	1687
Gap (300 K) eV	1.126

Tableau II.2-Quelques propriétés du silicium [24].

### II.3 Les étapes pour obtenir un silicium de qualité électronique

Le silicium existe essentiellement sous forme oxydée (silice, sable) et nécessite d'une part d'être réduit et d'autre part, d'être purifié afin d'obtenir un matériau de qualité électronique [16].

#### II.3.1 Réduction de la silice

On réalise une électrolyse dans un four à arc pour atteindre une température assez élevée pour faire fondre la silice. La silice est mélangée à du carbone.

Réaction principale :



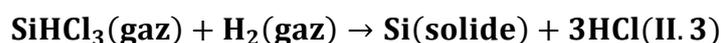
Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique [16].

#### II.3.2 Purification du silicium

On va effectuer une purification chimique, une des méthodes consiste à faire une distillation à partir de SiHCl<sub>3</sub> (trichlorosilane) liquide à température ambiante :



Le rendement de la réaction est égal à 90%, on a effectué une première purification car des précipités chlorés ne se mélangent pas au trichlorosilane. Puis SiHCl<sub>3</sub> (qui a une température d'ébullition faible: 31.8°C) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium [16] :



Après la distillation, la teneur en impuretés actives est inférieure à 1ppm, le silicium est alors de qualité électronique. Le silicium pur obtenu (donc intrinsèque) doit maintenant subir un double traitement à la fois d'enrichissement en matériau dopant afin d'en faire du silicium extrinsèque de type p ou n comportant une proportion d'une impureté connue et d'obtenir de plus un monocristal convenablement orienté. En effet, le silicium précédemment obtenu était polycristallin, il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Cette opération est réalisée dans un four à tirage selon la procédure de Czochralski [16].

### ✚ Procédure de Czochralski(CZ) :

Dans le cas des oxydes utilisés notamment dans le cadre des applications laser, la méthode Czochralski est l'une des seules permettant d'obtenir de gros monocristaux de qualité optique suffisante. Le matériau à élaborer est d'abord porté à la fusion dans un creuset. Un germe monocristallin est approché du centre de la surface du bain, avec laquelle il est mis en contact. Le liquide remonte par capillarité le long du germe, créant une interface triple liquide-solide-gaz. Le germe est ensuite lentement tiré vers le haut, à des vitesses de l'ordre du millimètre par heure, pour former un monocristal. L'ensemble de la croissance est effectuée en maintenant le cristal en rotation, de manière à homogénéiser le bain et à contrôler la forme de l'interface solide/liquide[16].

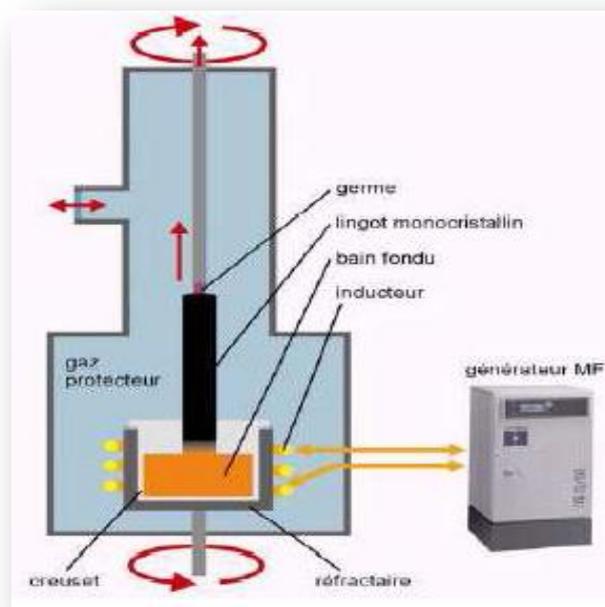


Figure II.3 –Méthode de Czochralski [16].

La figure II.4 présente 2 cristaux obtenus par la méthode Czochralski le premier à un diamètre de 150mm, le second à un diamètre de 200mm [16].



**Figure II.4** –Lingots de silicium monocristallin [16].

Cependant, les simples cristaux de silicium développés par la méthode de Czochralski contiennent des impuretés puisque le creuset qui contient la fonte se dissout. Pour certains dispositifs électroniques, en particulier ceux exigés pour des applications de puissance élevée, le silicium développé par la méthode de Czochralski n'est pas assez pur. Pour ces applications, le silicium de la zone flottante (FZ-Si) peut être employé à la place [16].

#### II.4 Silicium cristallin

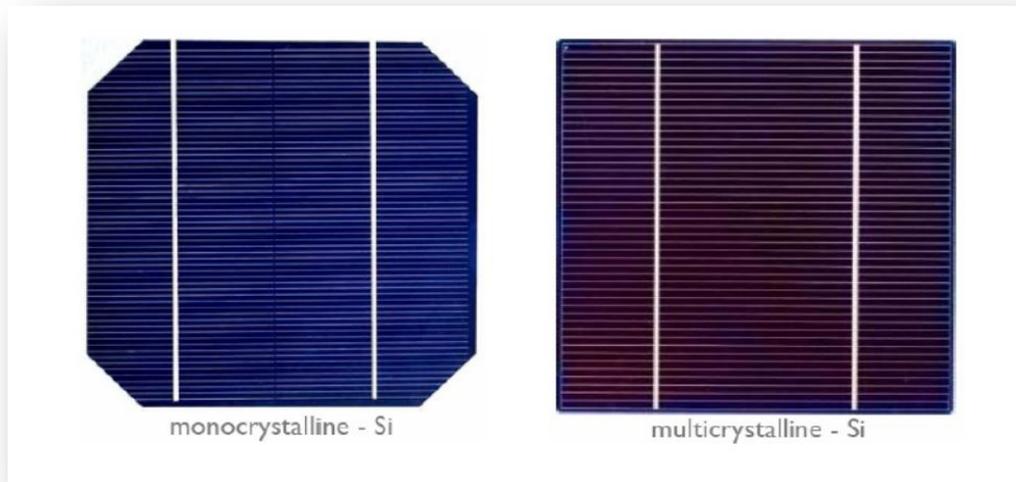
##### ➤ *Le silicium monocristallin :*

C'est un matériau de très haute pureté, qui est obtenu par (CZ) ou (FZ), le produit fini se présente sous la forme de lingots qu'il faut ensuite découper en plaquettes de 300 $\mu$ m. C'est un matériau qui présente d'excellentes qualités électroniques et permet la fabrication de cellules à haut rendement (~18%), mais il est très coûteux [9].

##### ➤ *Le silicium polycristallin :*

Il apparaît comme la juxtaposition de petits cristaux monocristallins d'orientations différentes et de dimensions du millimètre ou centimètre. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage de monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite

scier en plaquettes (wafers). Il occupe 55,9% du marché et tend à progresser. Les cellules solaires à base de silicium multi cristallin sont moins onéreuses mais relativement moins performantes. La fabrication du silicium polycristallin est moins couteuse d'un point de vue énergétique mais aussi financier : les cellules poly cristallines supportent mieux la présence d'impuretés que les cellules monocristallines [9].



**Figure II.5-** Cellules solaires:(a) au silicium monocristallin et (b) au silicium multicristallin [11].

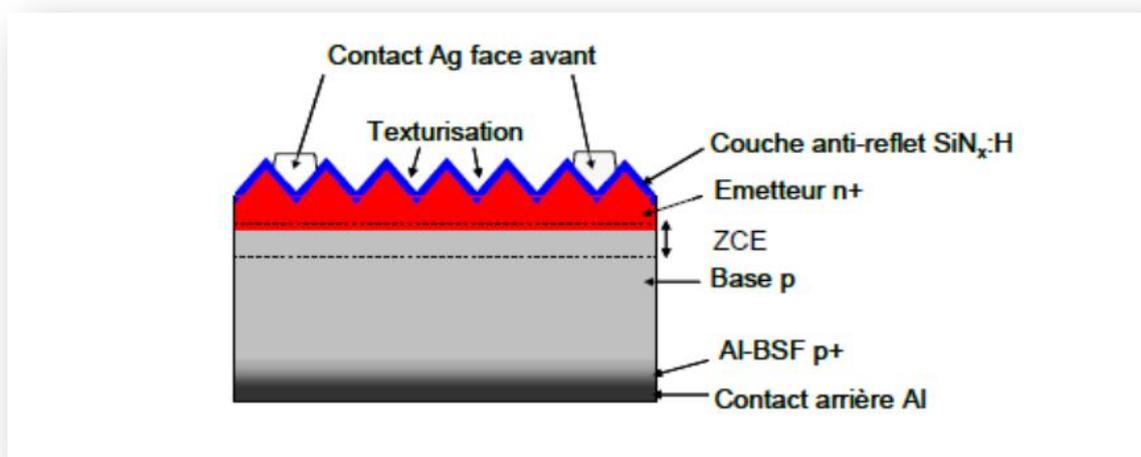
Actuellement, les wafers ont une taille de 125 x 125 mm pour une épaisseur de 330  $\mu\text{m}$ . Aujourd'hui, en plus d'obtenir des wafers plus fins, l'objectif est de réduire les pertes liées au sciage afin d'économiser le silicium. Les industriels du photovoltaïque développent des wafers de nouvelle génération de 210 x 210 mm<sup>2</sup> et plus large encore, tout en réduisant leur épaisseur pour arriver à un objectif de 100  $\mu\text{m}$ . L'augmentation de la taille de ces cellules implique donc une augmentation de la puissance produite et donc du courant. Les cellules les plus performantes peuvent déjà fournir des courants de plus de 10 A sous une tension de 0.6V [2].



**Figure II.6-** Développement de la taille des cellules solaires [2].

## II.5 Structure de cellules photovoltaïques industrielles

Le rendement des cellules PV industrielles est compris entre 15 et 17% pour les cellules conventionnelles en silicium monocristallin et 14% environ pour les cellules en silicium multicristallin [26]. La différence de rendement entre les cellules PV industrielles et la cellule élaborée au laboratoire, peut être expliquée par l'existence de deux facteurs : le rendement et le prix. En effet, certains matériaux et techniques (lithographie, silicium FZ, double couche antireflet, émetteur sélectif) utilisés pour la cellule photovoltaïque record ne peuvent pas être adaptés pour l'industrie, vu le défi économique. La plupart des cellules photovoltaïques en silicium massif industrialisées ont la structure présentée sur la figure II.7. Afin de réduire le coût la structure de ces cellules est simplifiée. Par exemple, la texturation de la face avant est réalisée sous forme de pyramides aléatoires ou texturation acide, ensuite une simple couche anti réfléchissante en SiN est déposée. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Al déposée par sérigraphie [26].



**Figure II.7** – Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium [1].

La particularité des cellules au silicium réside dans le fait que le substrat et l'élément actif sont un seul et même matériau, ceci grâce au coût raisonnable du silicium par rapport aux autres matériaux semi-conducteurs. Une fois les plaques découpées viennent la fabrication des cellules, qui va permettre d'exploiter les propriétés de semi-conducteur du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique [27].

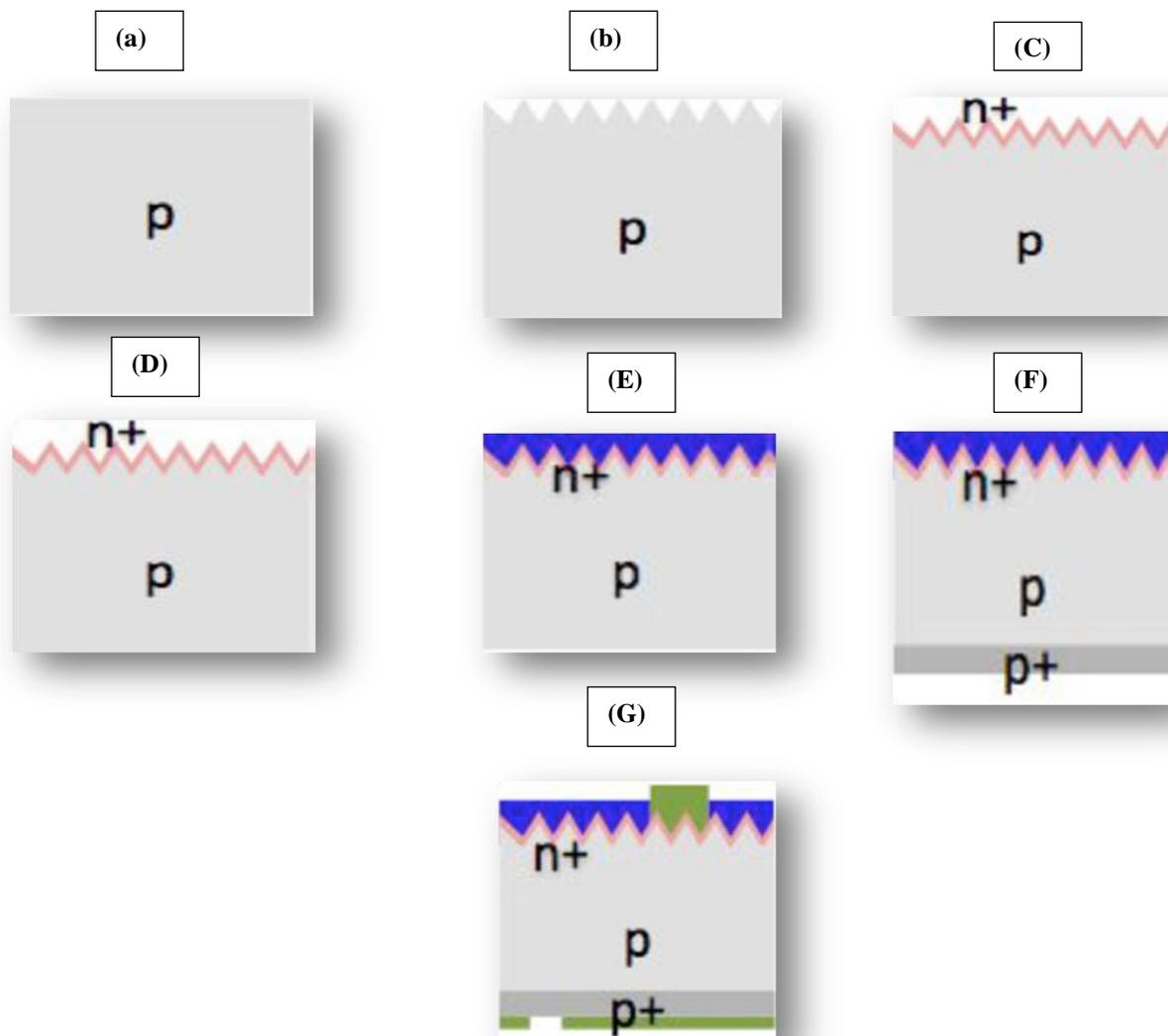
Le silicium monocristallin constituant le substrat de type P a une résistivité comprise entre 0.3  $\Omega\text{cm}$  et 10  $\Omega\text{cm}$ . Son épaisseur totale varie entre 180  $\mu\text{m}$  en application spatiales, et plus de 300  $\mu\text{m}$  lors des utilisations dans les systèmes terrestres. Selon la performance électrique recherché, la profondeur de jonction se répartit entre 0.15 et 0.5  $\mu\text{m}$ . On réalise la zone  $\text{N}^+$  par diffusion. La concentration en impuretés pouvant dépasser  $10^{20}\text{cm}^{-3}$ .

Le rendement de conversion de cette structure atteint 10 à 14% sous un spectre AM0, le courant de court circuit étant proche de  $35 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , et la tension de circuit ouvert entre 0.55 et 0.6V[2]. L'enchaînement des étapes ci-dessous représente un procédé industriel standard auquel il faudra ajouter les sous-étapes de transport, nettoyage et mesure [27] :

### A. Décapage :

Les plaques dopées p à partir de bore lors de la cristallisation sont décapées dans un bain chimique afin d'éliminer les défauts superficiels créés par le sciage.

Le bain acide est à base d'acide fluorhydrique HF, d'acide acétique  $\text{CH}_3\text{COOH}$  et d'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ .



**Figure II.8** – Les étapes de fabrication (A, B, C, D, E, F, G) d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium [27].

**B. Texturation :**

La texturation de la surface en petites pyramides ou entonnoirs permet d'améliorer la collecte des photons dans toutes les directions en réduisant la réflexion. On parle aussi de confinement optique.

La gravure sélective est par un bain alcalin de soude NaOH ou de potasse KOH avec des additifs organiques du type alcool isopropylique IPA.

**C. Dopage :**

La zone dopée n est formée par diffusion de phosphore: couche n+ en surface et à la jonction.

La diffusion thermique de phosphore P est à partir de trichlorure de phosphore  $\text{POCl}_3$  dans un four à passage,  $800^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$ , suivi d'un recuit.

Le retrait de la couche résiduelle de silicate de phosphore se fait dans un bain d'acide fluorhydrique HF.

**D. Bords de plaque :**

La couche n<sup>+</sup> est retirée des bords de plaque (sur la tranche) pour séparer, l'émetteur de la face arrière.

La gravure par plasma s'effectue par un mélange gazeux tétrafluoro-méthane  $\text{CF}_4$  et oxygène  $\text{O}_2$  soumis à un champ de radiofréquences.

**E. Couche antireflet :**

Une couche antireflet à base d'oxydes ou de nitre de silicium ou d'oxydes métalliques est déposée en face avant.

Elle sert aussi à passiver la surface en limitant les recombinaisons entre charges afin de conserver la conductivité du matériau.

Le dépôt chimique est en phase gazeuse via un plasma (PECVD) d'une couche de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  à partir de silane  $\text{SiH}_4$  et d'ammoniac  $\text{NH}_3$ .

**F. Champ face arrière :**

La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium. Cette couche joue aussi un rôle de conducteur ohmique avec l'électrode arrière.

La diffusion thermique de l'aluminium Al est à  $850^\circ\text{C}$  à partir d'une pâte d'aluminium déposée sur toute la face arrière.

**G. Métallisation :**

Les contacts électriques sont des métaux déposés en face avant (électrode  $-$ ) et en face arrière (électrode  $+$ ).

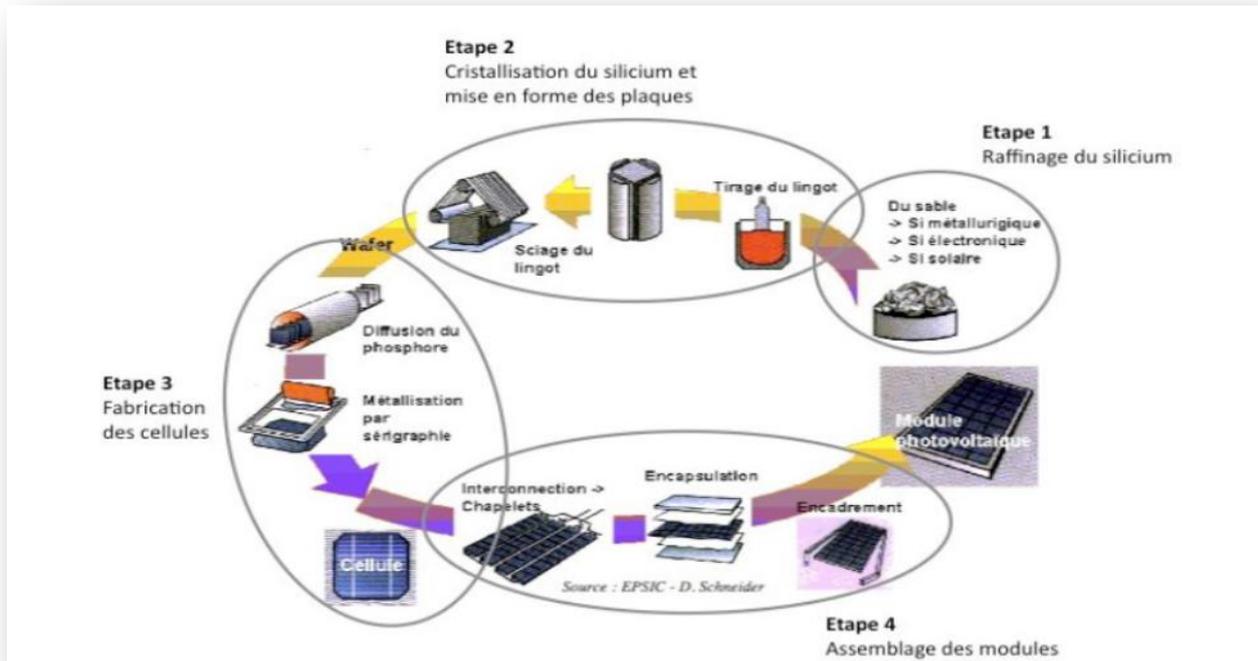
La sérigraphie d'argent en face avant et d'aluminium en face arrière par frittage de pâtes métalliques [27].

Le tableau II.3 suivant montre les étapes, La technologie utilisée, ainsi que le rôle de chaque étape :

Etape	Techniques d'élaboration	Rôle
<b>Texturisation</b>	Gravure chimique dans un bain acide (Si multi-cristallin) ou basique (Si monocristallin)	Diminution de la réflectivité
<b>Formation de la jonction p-n</b>	Diffusion de phosphore $\text{POCl}_3$ (~ 30 min à 850 °C)	Création d'un émetteur $n^+$ de résistance de couche $50 \Omega/\square < R_{sh} < 60 \Omega/\square$
<b>Ouverture de la jonction</b>	Gravure plasma latérale, gravure chimique ou découpe laser	Elimination des courts circuits entre l'émetteur $n^+$ et la base p
<b>Dépôt de la couche anti-reflet</b>	Dépôt PECVD de $\text{SiN}$ ou $\text{SiN}_x\text{:H}$	Diminution de la réflectivité et amélioration de la passivation en surface et en volume
<b>Métallisation</b>	Face avant : sérigraphie d'une grille Ag	Assurer une bonne conduction du courant
	Face arrière : sérigraphie pleine plaque Al	
<b>Recuit des contacts</b>	Four à passage (30s à 800°C)	Face avant : gravure de la couche anti-reflet et formation du contact des sur l'émetteur
		Face arrière : formation d'une couche $p^+$ (BSF)

**Tableau II.3-**Description et rôle des étapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque Industrielle [1].

Les cellules photovoltaïques ainsi finies sont assemblées entres elles (en série et/ou en parallèle) et encapsulées pour devenir un module solaire photovoltaïque pouvant fonctionner pendant plus de 20 ans [2].



**Figure II.9** – Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin [27].

On y retrouve les étapes suivantes [27]:

**Etape 1 :** Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz.

**Etape 2 :** Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques. (Les techniques précédentes de fabrication des wafers présentent l'inconvénient d'un assez faible rendement en matériau silicium, en particulier à cause de l'étape de sciage. Pour surmonter cet inconvénient, Il existe actuellement d'autres techniques de fabrication avancées du silicium cristallin sous forme de ruban ou de couches minces).

**Etape 3 :** Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.

**Etape 4 :** Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.

**Etape 5 :** Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques [27].

Nous présentons dans la figure II.10 un exemple de la caractéristique I-V mesurée d'une cellule solaire en silicium polycristallin. Notons que cette caractéristique varie selon les paramètres technologiques des cellules. Cette cellule a un rendement de conversion de 19.8%. La densité de courant délivrée par la cellule, ici notée J, est exprimée en ampère par unité de surface (cm<sup>2</sup>). La tension présente aux bornes de la cellule est exprimée en volt et ne dépend pas de la surface de la cellule. Le courant de court-circuit de la cellule est de 38.1mA/cm<sup>2</sup> (noté dans les notices constructeurs I<sub>cc</sub> ou alors I<sub>sc</sub> pour la terminologie anglaise signifiant Short-Circuit current) et la tension de circuit ouvert s'élève à 654mV (V<sub>oc</sub>, pour Open Circuit Voltage)[2].

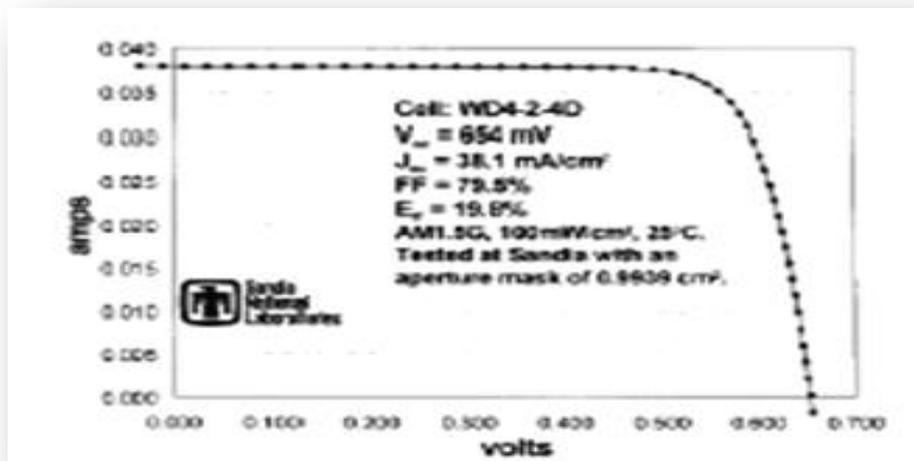


Figure II.10 : Caractéristique I(V) mesurée pour une cellule PV en silicium polycristallin [2].

Un autre exemple des paramètres électriques mesurés d'un nombre de cellules solaires en silicium est présenté dans le tableau :

cellule	1	2	3	4	5	6
plaquette de silicium	FZ ,300µm	FZ ,300µm	FZ ,300µm	FZ ,300µm	FZ ,300µm	mc,200µm
Résistivité (Ω cm)	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,2
passivation avant	SiN	SiN	SiN	SiN/ SiO2	SiN/ SiO2	SiN
Passivation arrière	SiN	SiN	recuit SiO2	recuit SiO2	SiN/ SiO2	SiN
V <sub>oc</sub> (mv)	667,3	668	661	673	665	665,4
J <sub>sc</sub> (mA cm <sup>-2</sup> )	33,1	33,6	33,5	33,6	32,0	31,0
FF(%)	80,7	77,8	80,0	81,0	76,3	78,9
η(%)	17,8	17,5	17,7	18,3	16,2	16,1

Tableau II. 4: Paramètres de sortie mesurés pour un nombre de cellule solaire en silicium [2].

## **Chapitre III**

**Etude par simulation numérique  
d'une cellule solaire p-n en Si  
cristallin par AMPS**

### III.1 Introduction

Ce chapitre comporte deux parties : Dans la première nous définissons le logiciel **AMPS-1D** utilisé dans ce mémoire pour calculer numériquement les caractéristiques électriques d'une cellule solaire p-n en silicium cristallin.

La deuxième partie constitue l'objectif de notre travail qui est l'étude de 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 (J-V) et la caractéristique réponse spectrale-longueur d'ondes (SR- $\lambda$ ). A partir de la caractéristique (J-V), les paramètres de sortie de la cellule sont calculés. Ces paramètres sont : la densité de courant de court-circuit ( $J_{CC}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) de la cellule.

### III.2 Le logiciel AMPS

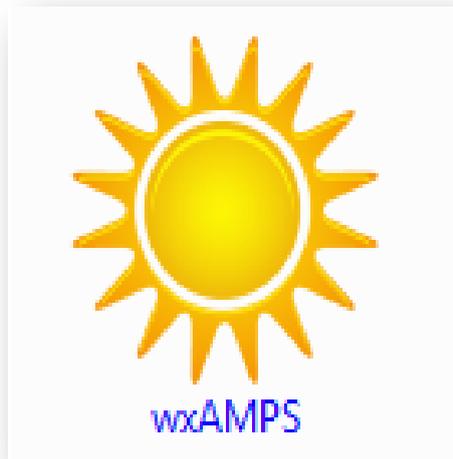
AMPS est une abréviation de la phrase anglaise : **A**nalysis of **M**icroelectronic and **P**hotonic **S**tructures qui signifie l'analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques. Le logiciel a été développé en 1997 par Fonash et al.

Le code original était en FORTRAN et utilisé une interface spécifique à la plateforme basée sur Microsoft Foundation Classes. Ensuite il a été réécrit dans le langage C<sup>++</sup>. La dernière version sous Windows 95/98/NT a été développé et c'est cette version qui va être utilisée dans ce travail [28].

#### III.2.1 Utilisation d'AMPS

AMPS 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, polycristallines, amorphes ou des combinaisons [28].



**Figure III.1-** L'icône de logiciel AMPS sur PC [29].

### III.2.2 Les caractéristiques d'AMPS

Il permet de définir les propriétés du matériau (par exemple : la largeur de sa bande interdite (gap d'énergie), l'affinité, le dopage, les mobilités, ... etc.), et la conception du dispositif ; structure contrôlant l'ensemble de la physique du dispositif et sa réponse à la lumière, à la tension appliquée et à la température.

L'utilisation d'AMPS permet d'obtenir la réponse du dispositif à une situation donnée, par exemple à la polarisation par la lumière, par la tension électrique ou le changement de la température. Et l'exploration des changements que subissent les paramètres internes du dispositif tels que le diagramme de bande, la composante du courant, le taux de recombinaison et le champ électrique en fonction de la position, de l'intensité lumineuse, de la tension électrique et de la température [28].

Les caractéristiques électriques qu'il peut générer sont :

- Les caractéristiques ( $J$ - $V$ ) sous illumination et sans éclairage.
- Le rendement quantique (quantum efficiency) ( $QE$ ) pour des cellules solaires et des photodiodes sous tension de polarisation et lumière.

L'interface d'AMPS (Figure III.2) est constituée de trois boîtes de dialogue. Chacune donne les paramètres nécessaires avant le lancement de la simulation par AMPS. Les trois boîtes de dialogues donnent [28] :

- Les conditions environnementales.
- Les propriétés du matériau de chaque couche.
- Les paramètres de modélisation: le type du modèle, l'espacement de la grille pour les calculs numériques, les tensions de polarisation pour lesquelles la sortie ( $J-V$ ) et ( $QE$ ) doit être générée [28].

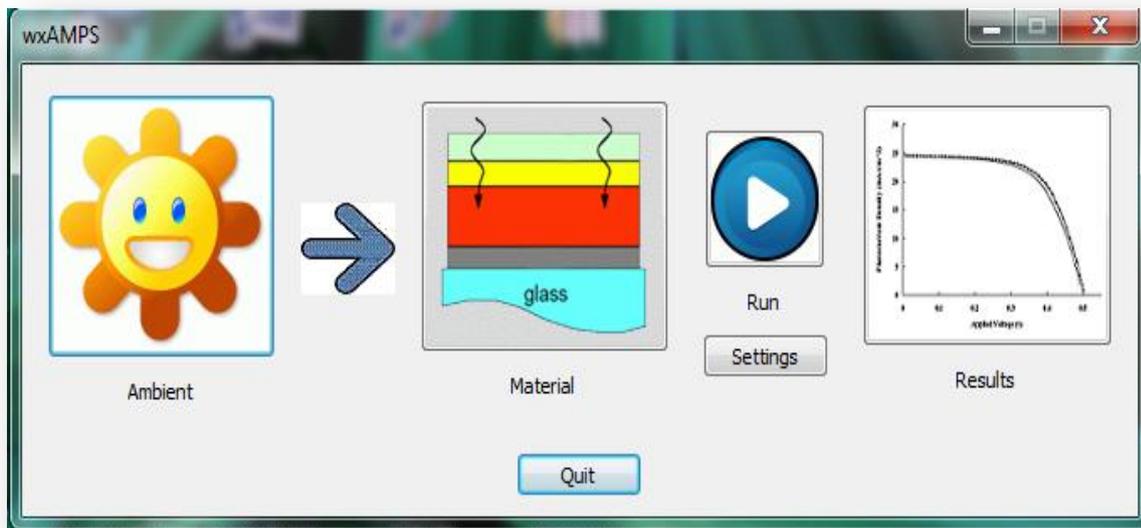


Figure III.2- Page d'accueil de l'interface utilisateur [29].

### A. Conditions environnementales

Nous contrôlons la température à 300 °K (température ambiante). Si on augmente ou on diminue la température nous entrons le facteur de température dans la simulation.

Si on simule en présence de la lumière on coche dans la case correspondante.

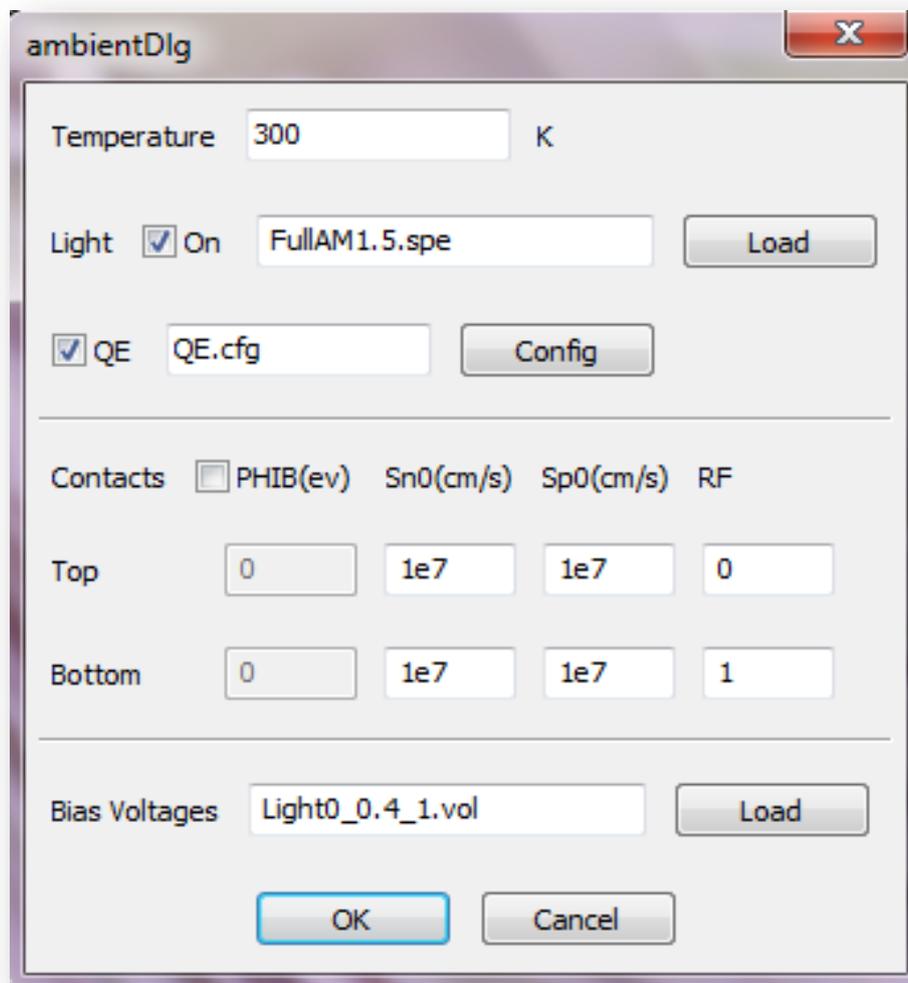
Si on définit l'éclairage au spectre FullAM1.5.spe n ; ici l'angle 41.8° correspond à la position du soleil au moment du levé ou du couché du soleil.

Si on coche dans la case de  $QE$ , le calcul comprendra aussi le calcul du rendement quantique  $QE(\lambda)$  :

On définit la polarisation appliquée par la case « **Bias voltages** », en cliquant sur « **load** » on choisit la tension voulue, par exemple le choix (Light0\_0.4\_1.vol) (figure III.3) signifie une gamme de tension de 0 volt à 1 volt avec un pas de 0.4 volt.

Enfin, nous appuyons sur le bouton « **ok** ».

La figure III-3 présente l'interface des conditions environnementales :



**Figure III.3-** L'interface des conditions environnementales [29].

### B. Propriétés du matériau de chaque couche

La figure III.4 présente l'interface de la saisie des paramètres du matériau de chaque couche. Ces paramètres sont les épaisseurs des couches, les paramètres électriques (permittivité, gap d'énergie, affinité électronique, les densités effectives, les mobilités électriques et le dopage), les paramètres des défauts (sections efficaces de captures, densités, niveau d'énergie), les paramètres optiques (absorption optique), et paramètres avancés (paramètres de convergence numérique).

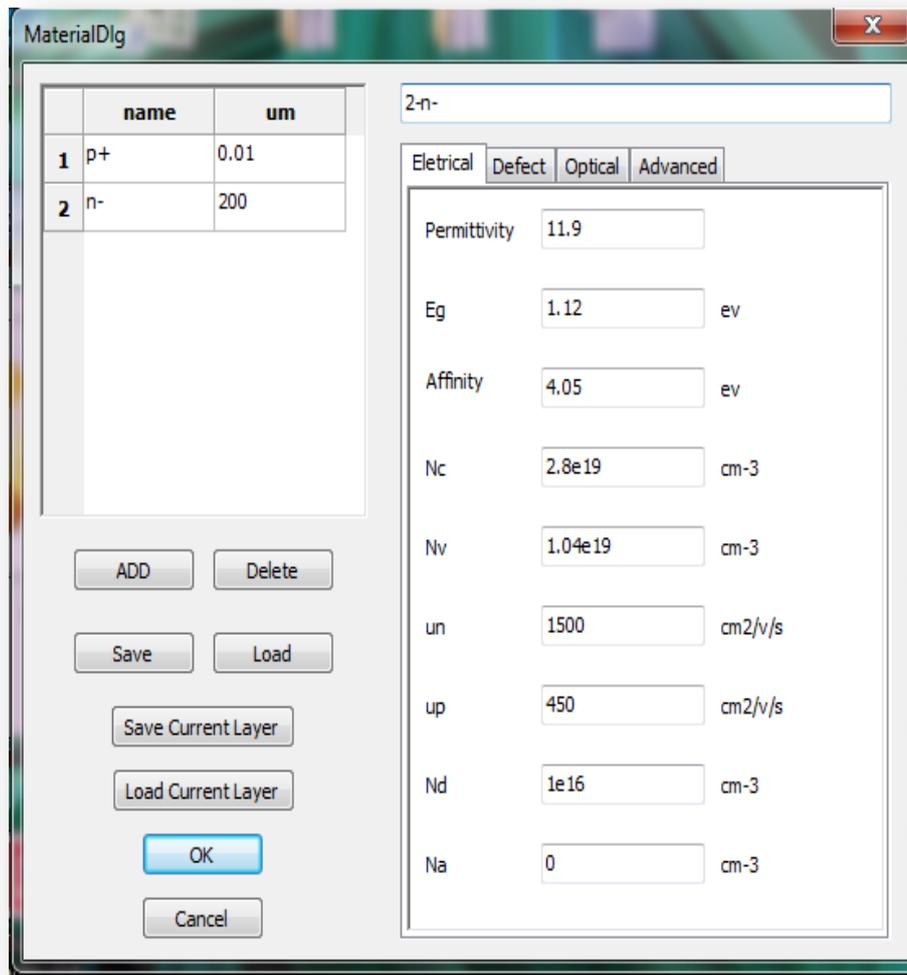


Figure III.4- Boîte de dialogue pour la saisie des paramètres du matériau [29].

**C. Les paramètres de modélisation**

Pour la simulation, nous cochons la case « oui » et ainsi le logiciel commence l'exécution (figure III-5).

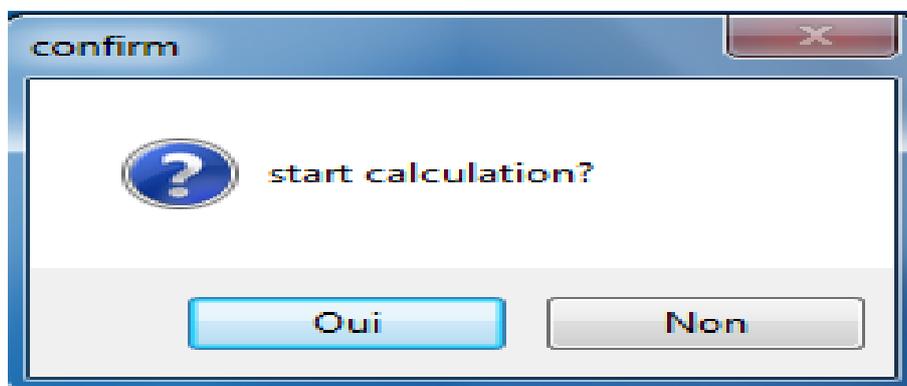


Figure III.5- L'interface de l'exécution [29].

Pendant le processus de simulation, une boîte de dialogue de progression s'affiche, qui permet aux utilisateurs de savoir que le calcul s'effectue normalement.

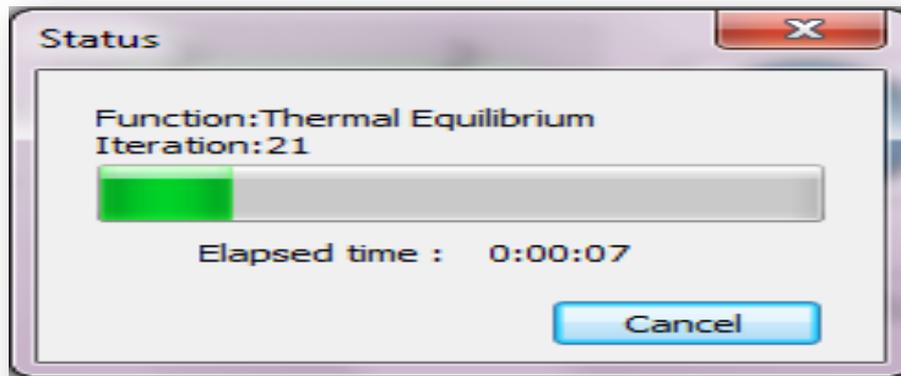


Figure III.6- Boîte de dialogue pour progression s'affiche [29].

Une fois le calcul est terminé, les résultats sont stockée et présentés par des courbes comme il est illustré sur la figure III.7.

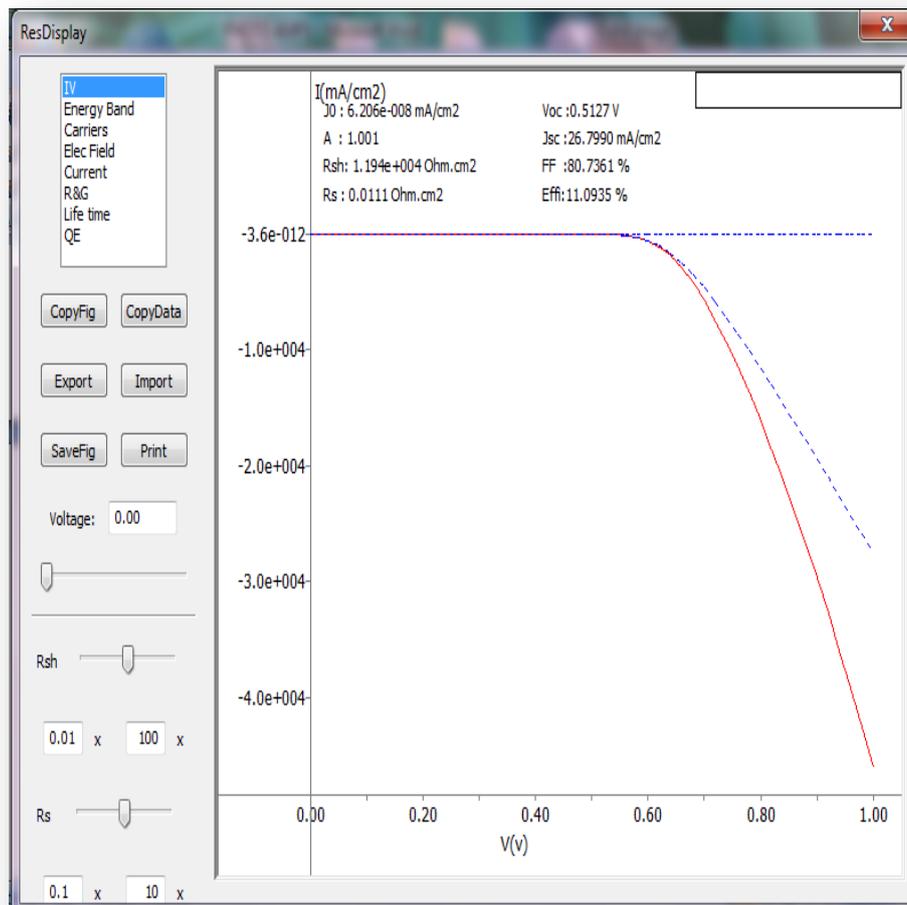


Figure III.7- Interface des résultats [29].

Les résultats sont les caractéristiques ( $J$ - $V$ ) à l'obscurité et sous éclairage, les valeurs de la densité de courant de saturation ( $J_0$ ), du facteur d'idéalité ( $A$ ), de la résistance parallèle (shunt)  $R_{sh}$ , de la résistance série  $R_s$ , de la densité de courant de court circuit ( $J_{CC}$ ), de la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ), du facteur de remplissage ( $FF$ ), du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ), du rendement quantique externe ( $QE(\lambda)$ ) ainsi que les grandeur internes comme le diagramme du gap d'énergie, les densités des porteurs libres ou piégés, le champ et potentiel électrique, le taux de recombinaison, les composantes du courant des électrons et des trous, les durées de vie..etc.

Les résultats des simulations peuvent être exportés vers des fichiers data, qui sont facilement lu par des logiciels graphiques comme EXCEL et ORIGIN.

### III.3 Résultats et Discussion

Dans cette section, nous présenterons les résultats de la simulation numérique de la caractéristique J-V et de la réponse spectrale par le logiciel AMPS de la cellule étudiée qui est une jonction p-n en silicium cristallin (Voir figure III. 8).

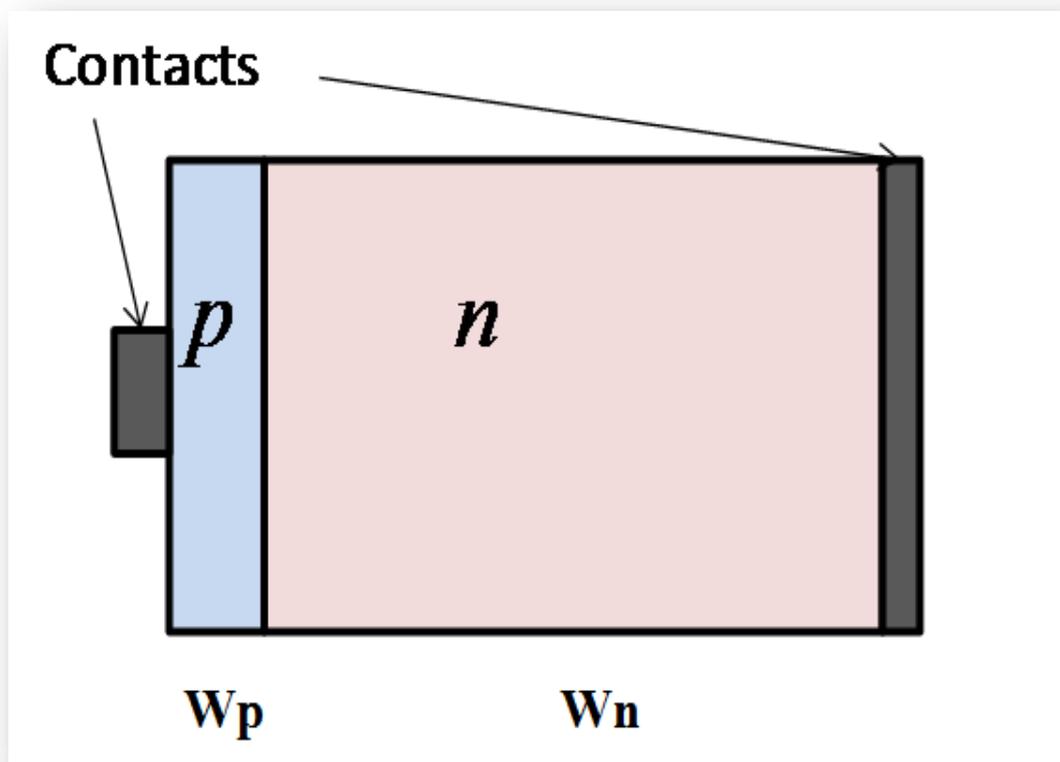


Figure III. 8- Schéma de la cellule solaire étudiée.

Les paramètres du silicium définis dans l'interface du logiciel AMPS sont présentés dans le tableau III. 1.

Paramètres	Valeurs
Permittivité relative $\epsilon_r$	11.9
Gap d'énergie $E_g (eV)$	1.12
Affinité électronique $\chi (eV)$	4.05
La densité d'état efficace dans la bande de conduction $N_C(\text{cm}^{-3})$	$2.8 \times 10^{19}$
La densité d'état efficace dans la bande de valence $N_V(\text{cm}^{-3})$	$1.04 \times 10^{19}$
La mobilité des électrons $\mu_n (\text{cm}^2/\text{Vs})$	1500
La mobilité des trous $\mu_p (\text{cm}^2/\text{Vs})$	450

**Tableau III. 1-** Paramètres du silicium.

L'étude est divisée en quatre parties. Dans la première partie l'effet de l'épaisseur  $W_p$  de l'émetteur est étudié. Dans la deuxième partie, l'effet de l'épaisseur du collecteur  $W_n$ . Ensuite le dopage de l'émetteur  $N_a$ , et finalement le dopage du collecteur  $N_d$ .

Les caractéristiques électriques simulées de la cellule solaire sont la caractéristique courant-tension (J-V) et la réponse spectrale dans les conditions standards (spectre AM1.5, éclairement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , température de 300 K). A partir de la caractéristique J-V, les paramètres de sortie de la cellule sont calculés. Ces paramètres sont le courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , le facteur de forme FF, et le rendement de conversion  $\eta$ .

### III.3.1 Effet de l'épaisseur de l'émetteur

Dans cette partie, l'épaisseur de l'émetteur  $W_p$  est variée entre 0.01 et 0.5  $\mu\text{m}$ , alors que le dopage de l'émetteur  $N_a$ , l'épaisseur du collecteur  $W_n$  et le dopage du collecteur  $N_d$  sont fixés aux valeurs indiquées dans le tableau III. 2.

Paramètres	Valeurs
$W_n$ ( $\mu\text{m}$ )	100
$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{18}$
$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5 \times 10^{16}$

Tableau III. 2- Paramètres de la cellule p-n.

La caractéristique J-V et la réponse spectrale obtenus sont présentés dans les figures III. 9 et III. 10, respectivement.

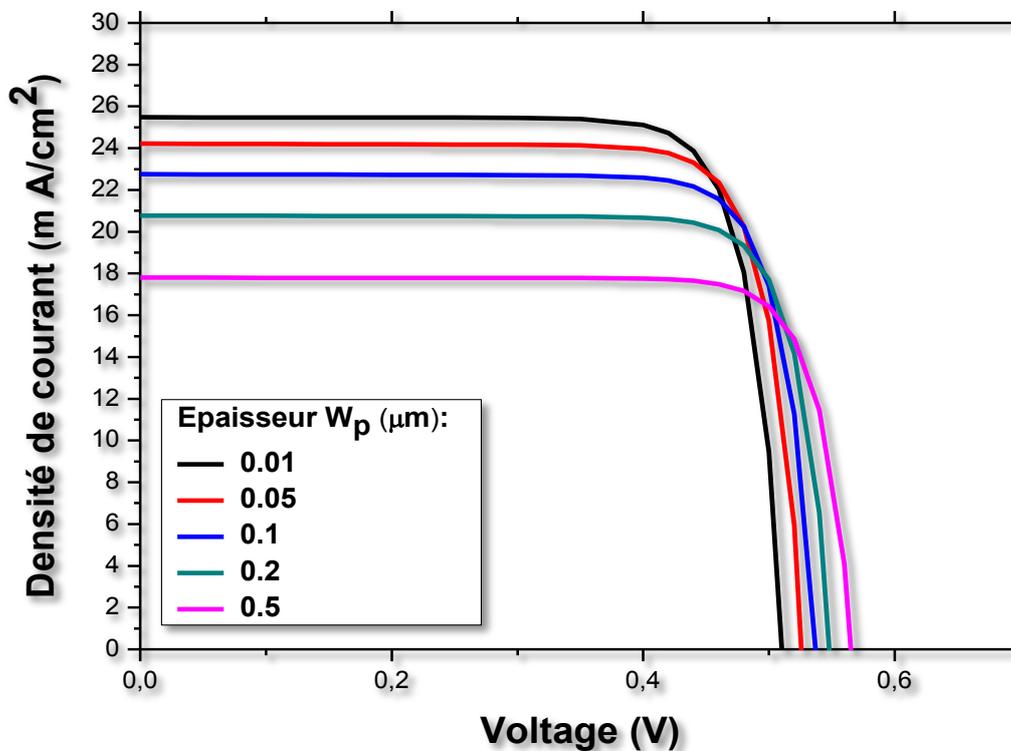


Figure III. 9- Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur  $W_p$  de l'émetteur.

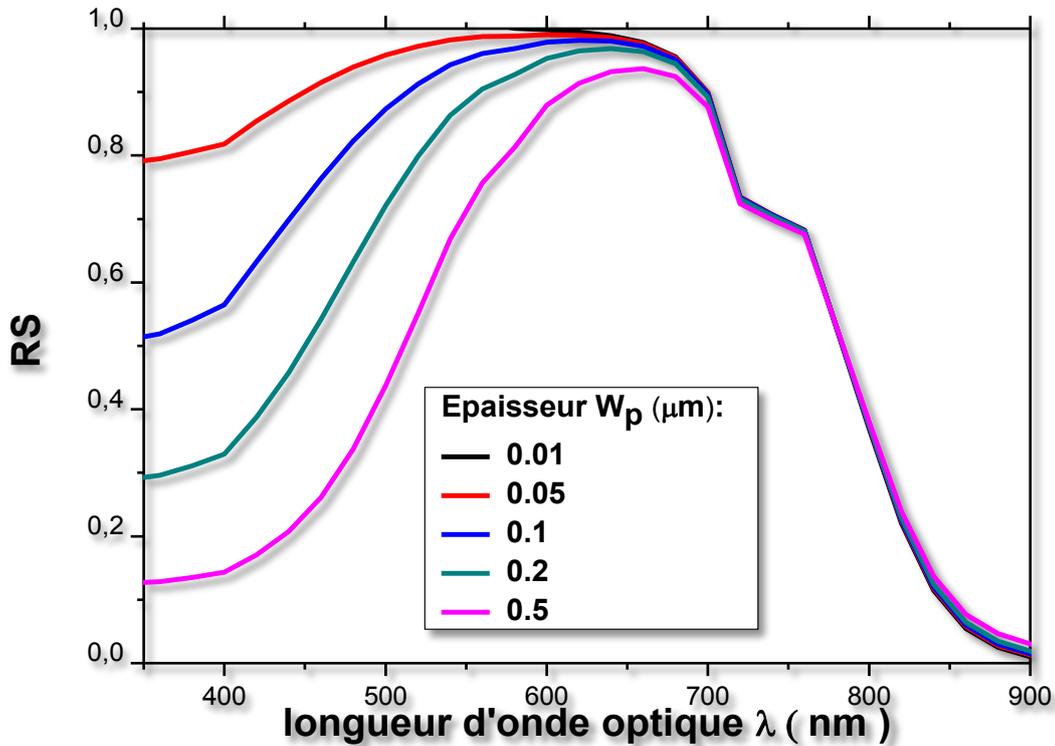


Figure III. 10- Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur  $W_p$  de l'émetteur.

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le tableau III. 3.

Epaisseur $W_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	FF%	$\eta$ %
0.01	25.4776	0.5102	80.7975	10.5029
0.05	24.2170	0.5256	80.7465	10.2786
0.1	22.7492	0.5370	81.2030	9.9201
0.2	20.7691	0.5479	81.5332	9.2787
0.5	17.7999	0.5651	81.8647	8.2352

Tableau III. 3- Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur  $W_p$  de l'émetteur.

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

La réponse spectrale présente des diminutions pour les longueurs d'onde courtes. Ceci est liée au fait que la région p est dans la région frontale de la cellule.

### III.3.2 Effet de l'épaisseur du collecteur

Dans cette partie, l'épaisseur du collecteur  $W_n$  est variée entre 10 et 200  $\mu\text{m}$ , alors que le dopage de l'émetteur  $N_a$ , l'épaisseur de l'émetteur  $W_p$  et le dopage du collecteur  $N_d$  sont fixés aux valeurs indiquées dans le tableau III. 4.

Paramètres	Valeurs
$W_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.1
$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{18}$
$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5 \times 10^{16}$

Tableau III. 4- Paramètres de la cellule p-n.

La caractéristique J-V et la réponse spectrale obtenus sont présentés dans les figures III. 11 et III. 12, respectivement.

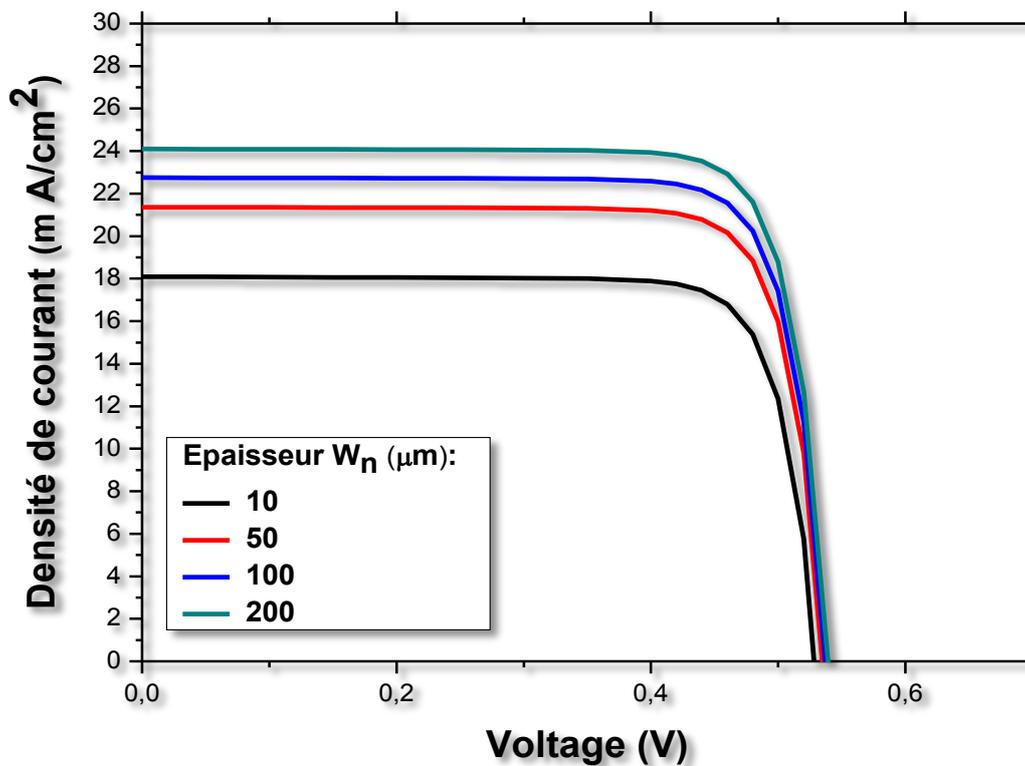


Figure III. 11- Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur  $W_n$  du collecteur.

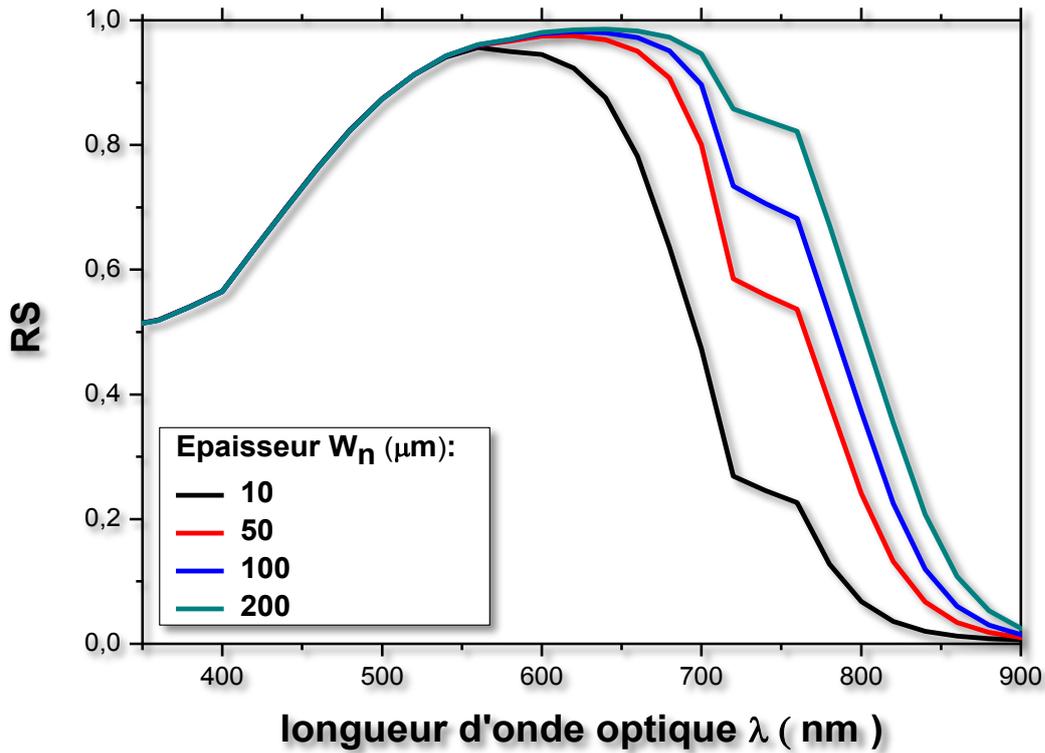


Figure III. 12- Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur  $W_n$  du collecteur.

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le tableau III. 5.

Epaisseur $W_n(\mu m)$	$J_{cc}(mA/cm^2)$	$V_{oc}(V)$	$FF\%$	$\eta\%$
10	18.0925	0.5281	80.8320	7.7236
50	21.3670	0.5347	81.2113	9.2779
100	22.7492	0.5370	81.2030	9.9201
200	24.0973	0.5392	81.1494	10.5433

Tableau III. 5- Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur  $W_n$  du collecteur.

Dans ce cas, l'augmentation du collecteur conduit à l'amélioration de  $J_{cc}$  et par la suite du rendement.  $V_{oc}$  et  $FF$  cependant présentent de faibles variations.

La réponse spectrale s'améliore pour les longueurs d'onde longues comme l'émetteur est dans la région arrière.

### III.3.3 Effet du dopage de l'émetteur

Dans cette partie, le dopage de l'émetteur  $N_a$  est varié entre  $10^{17}$  et  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , alors que l'épaisseur du collecteur  $W_n$ , l'épaisseur de l'émetteur  $W_p$  et le dopage du collecteur  $N_d$  sont fixés aux valeurs indiquées dans le tableau III. 6.

Paramètres	Valeurs
$W_n$ ( $\mu\text{m}$ )	200
$W_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.01
$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5 \times 10^{16}$

Tableau III. 6- Paramètres de la cellule p-n.

La caractéristique J-V et la réponse spectrale obtenus sont présentés dans les figures III. 13 et III. 14, respectivement.

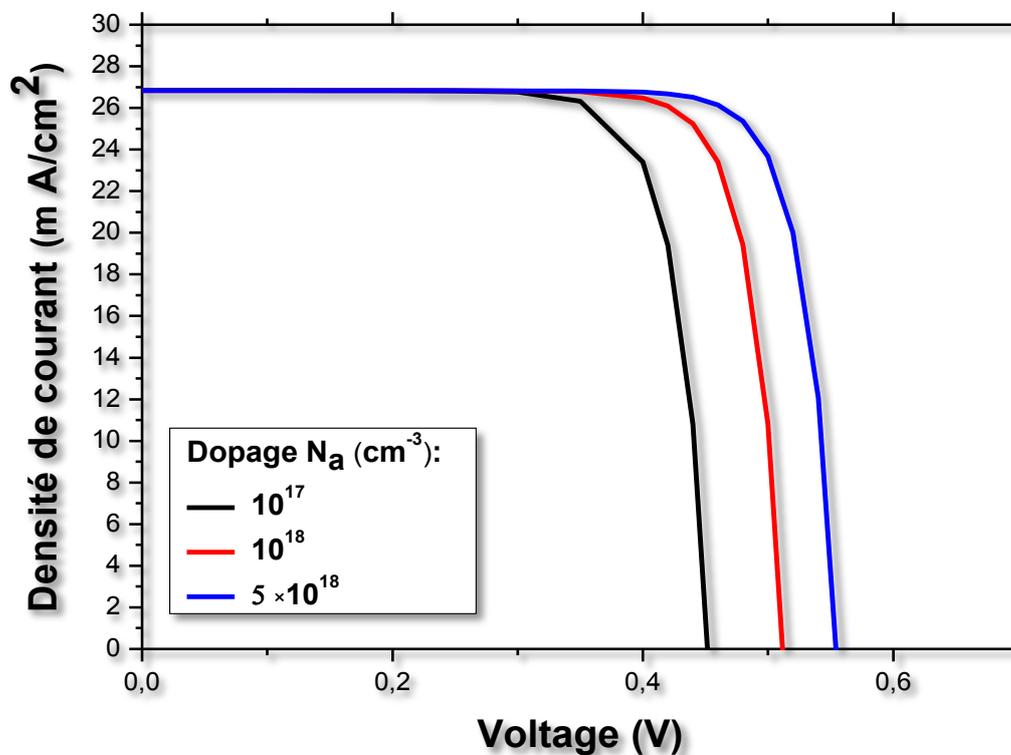


Figure III. 13- Caractéristique J-V avec l'effet du dopage  $N_a$  de l'émetteur.

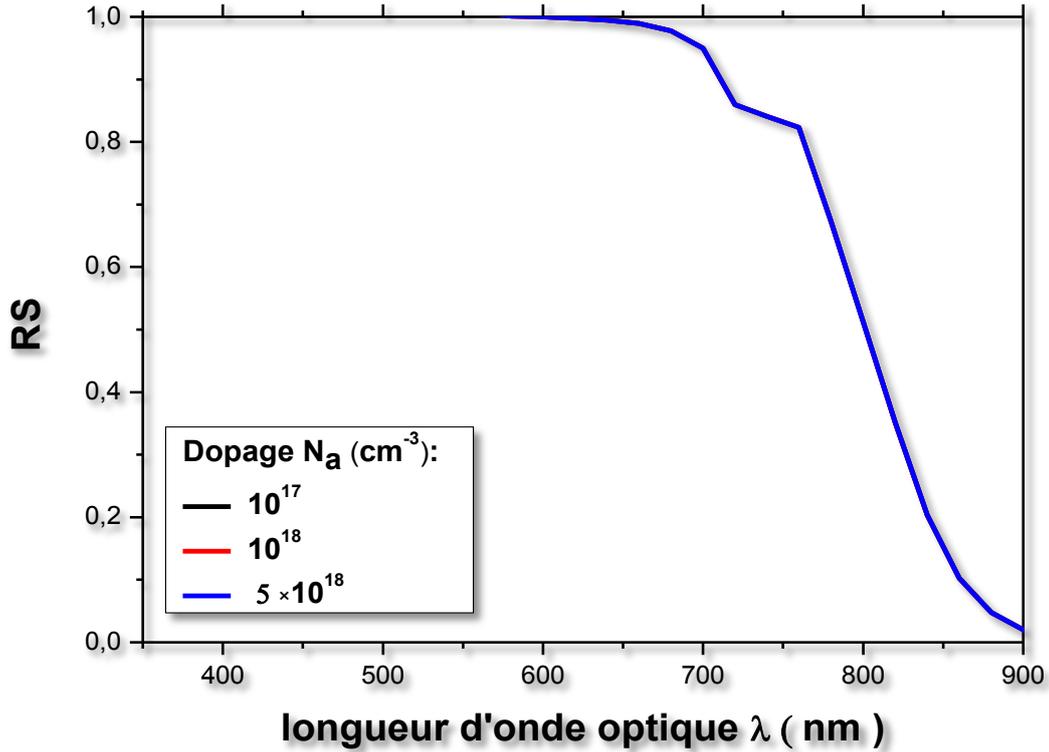


Figure III. 14- Réponse spectrale avec l'effet du dopage  $N_a$  de l'émetteur.

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le tableau III. 7.

Dopage $N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	FF%	$\eta$ %
$10^{17}$	26.8459	0.4517	77.1726	9.3582
$10^{18}$	26.8407	0.5117	80.8468	11.1042
$5 \times 10^{18}$	26.8343	0.5541	81.8844	12.1749

Tableau III. 7- Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet du dopage  $N_a$  de l'émetteur.

Dans ce cas,  $J_{cc}$  est insensible au dopage de l'émetteur, alors que  $V_{oc}$  et FF augmentent, ce qui conduit à l'augmentation du rendement de la cellule.

La réponse spectrale, comme  $J_{cc}$ , est insensible au dopage de l'émetteur.

### III.3.4 Effet de dopage du collecteur

Dans cette partie, le dopage du collecteur  $N_d$  est varié entre  $10^{15}$  et  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , alors, l'épaisseur du collecteur  $W_n$ , l'épaisseur de l'émetteur  $W_p$  et le dopage de l'émetteur  $N_a$  sont fixés aux valeurs indiquées dans le tableau III. 8.

Paramètres	Valeurs
$W_n$ ( $\mu\text{m}$ )	200
$W_p$ ( $\mu\text{m}$ )	0.01
$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{18}$

Tableau III. 8- Paramètres de la cellule p-n.

La caractéristique J-V et la réponse spectrale obtenus sont présentés dans les figures III. 15 et III. 16, respectivement.

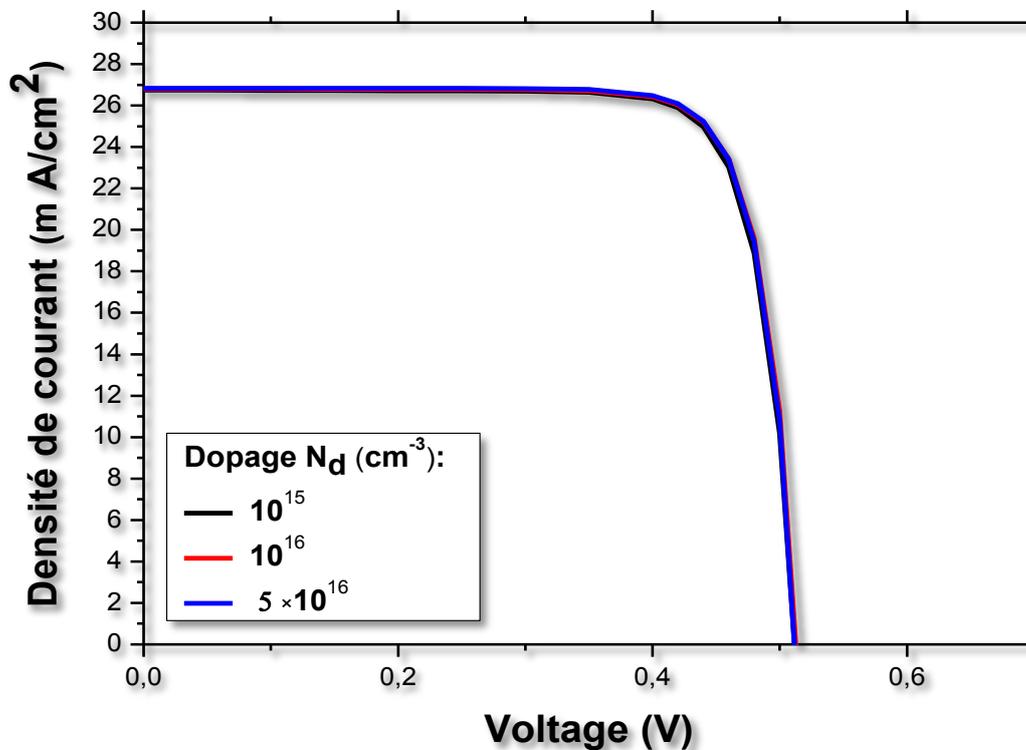


Figure III. 15- Caractéristique J-V avec l'effet du dopage  $N_d$  du collecteur.

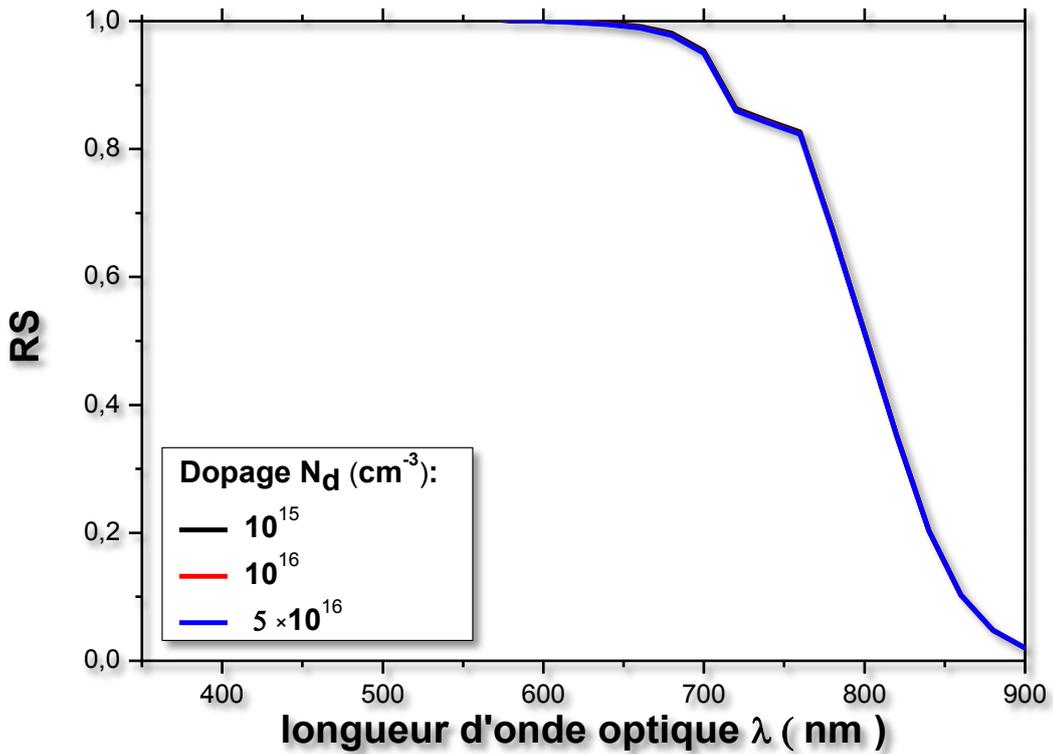


Figure III. 16- Réponse spectrale avec l'effet du dopage  $N_d$  du collecteur.

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le tableau III. 9.

Epaisseur $N_d(\text{cm}^{-3})$	$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(V)$	$FF\%$	$\eta\%$
$10^{15}$	26.7441	0.5117	80.3094	10.9910
$10^{16}$	26.7990	0.5127	80.7361	11.0935
$5 \times 10^{16}$	26.8407	0.5117	80.8468	11.1042

Tableau III. 9- Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de dopage  $N_d$  du collecteur.

Dans ce cas, l'effet du dopage du collecteur est négligeable sur les paramètres de sortie de la cellule.

### III.4 Optimisation de la cellule

Afin d'améliorer le rendement de la cellule, on ajoute deux régions fortement dopées ; une ( $p^{++}$ ) dans la région de l'émetteur, et l'autre ( $n^{++}$ ) dans la région du collecteur.

L'épaisseur de l'émetteur  $W_p = 0,01 \mu\text{m}$ , alors que le dopage de l'émetteur  $N_a = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , l'épaisseur du collecteur  $W_n = 200 \mu\text{m}$  et le dopage du collecteur  $N_d = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ . Un schéma de cette structure est présenté dans la figure III. 17.

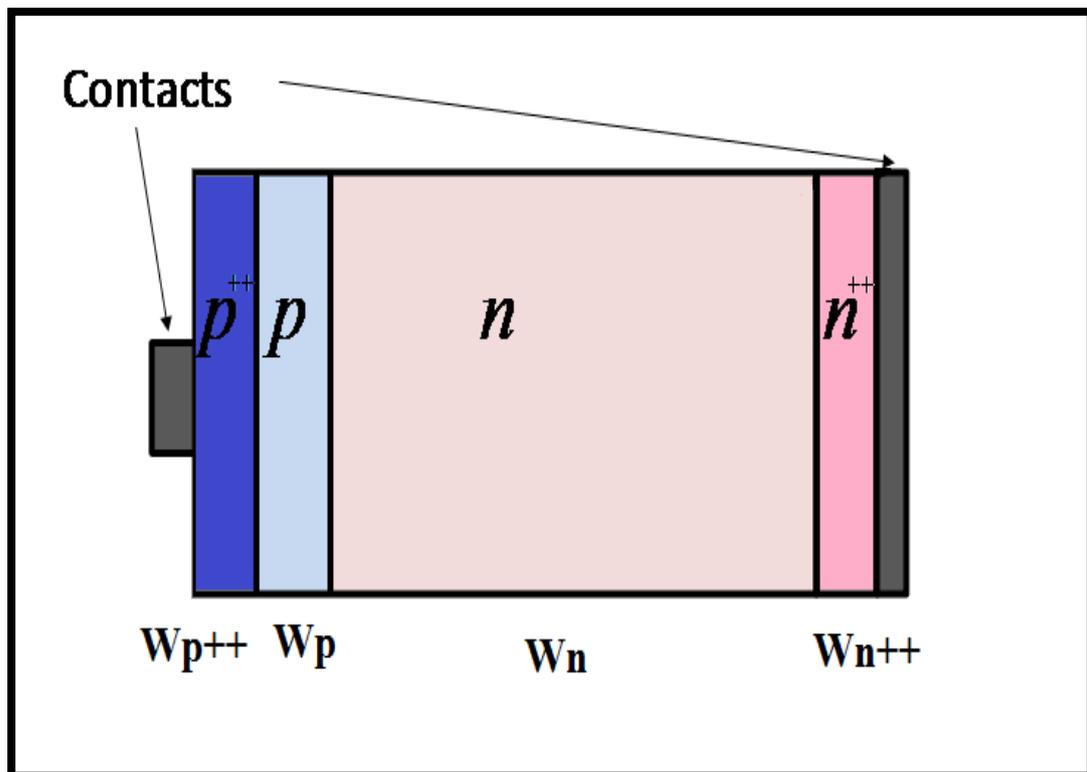


Figure III. 17- Schéma de la cellule solaire étudiée.

#### III.4.1 Effet de l'épaisseur de la région fortement dopée $n^{++}$

Dans cette partie, l'épaisseur de la région fortement dopée  $W_{n^{++}}$  est variée entre 0.01 et 0.5  $\mu\text{m}$ , alors que le dopage de la région fortement dopée  $N_{a^{++}}$ , le dopage de la région fortement dopée  $N_{d^{++}}$  et l'épaisseur de la région fortement dopée  $W_{p^{++}}$  sont fixés aux valeurs indiquées dans le tableau III. 10.

Paramètres	Valeurs
$N_{a++}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \times 10^{19}$
$N_{d++}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \times 10^{19}$
$W_{p++}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,01

Tableau III. 10- Paramètres de la cellule p-n.

La caractéristique J-V et la réponse spectrale obtenus sont présentés dans les figures III. 18 et III. 19, respectivement.

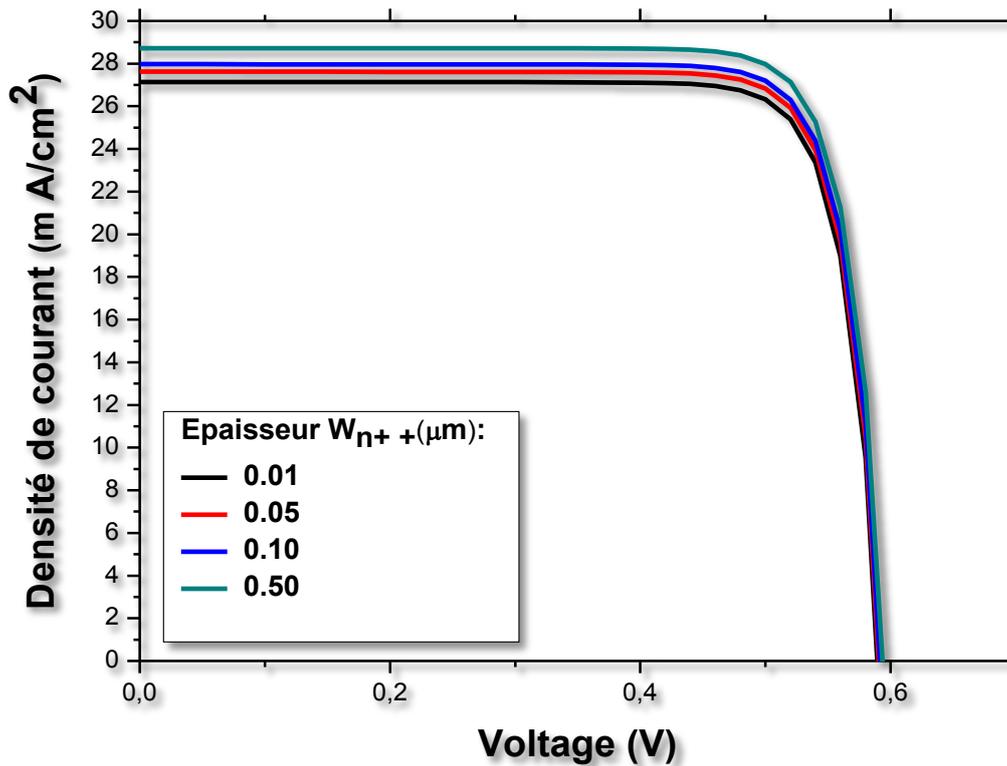


Figure III.18 - Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur  $W_{n++}$  de la région fortement dopée.

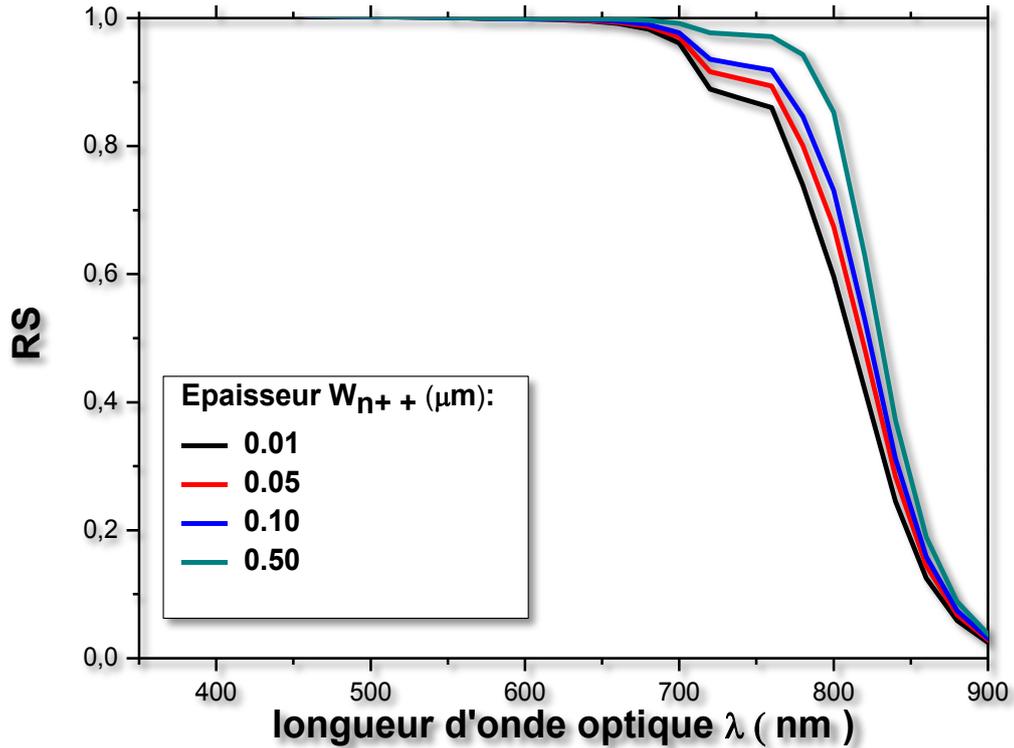


Figure III. 19- Réponse spectrale avec l'effet de l'épaisseur  $W_{n++}$  de la région fortement dopée.

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le tableau III.11.

Epaisseur $W_{n++}$ ( $\mu\text{m}$ )	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	FF%	$\eta\%$
0.01	27.1359	0.5894	82.5377	13.2018
0.05	27.6195	0.5906	82.6167	13.4769
0.10	27.9711	0.5915	82.6634	13.6769
0.50	28.7266	0.5936	82.7329	14.1069

Tableau III. 11- Les paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur  $W_{n++}$  de la région fortement dopée.

D'après le tableau et les figures, une amélioration est remarquée pour le rendement de la cellule et de sa réponse spectrale pour les longueurs d'ondes longues.

### III.5 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 résumée :

- ✚ 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.

Une optimisation supplémentaire des paramètres de sortie de la cellule à été effectuée par l'ajout de régions fortement dopées au dessous des contacts ;  $p^{++}$  coté émetteur et  $n^{++}$  coté collecteur. Ceci a donné un bon rendement de conversion de 14% devant 11-12% de la cellule solaire simple p-n.

# **Conclusion Générale**

# Conclusion Générale

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules PV.

Nous avons présenté le silicium cristallin comme matériau de base dans la technologie photovoltaïque et la fabrication des cellules solaires en silicium.

L'objectif de ce travail est l'étude par simulation numérique de l'effet de dopage et épaisseurs sur les caractéristique électriques d'une cellule solaire ( p/n) en silicium cristallin, et Comment améliorer l'efficacité de la cellule étudiée par L'ajout des régions fortement dopées dans cette cellule.

Nous avons utilisé le logiciel de simulation AMPS pour développer un programme de simulation qui permet le calcul des paramètres électriques de la cellule solaire. Les paramètres que nous avons étudié et analysé, sous les conditions standards (spectre AM1.5, éclairement de 1000W/m<sup>2</sup>), sont la caractéristique densité de courant - tension ( $J-V$ ), la densité de courant de court circuit ( $J_{CC}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ), le facteur de remplissage ( $FF$ ), le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) et la réponse spectrale (SR).

Résumé des résultats de l'étude de simulation :

- 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.

Une optimisation supplémentaire des paramètres de sortie de la cellule à été effectuée par l'ajout de régions fortement dopées au dessous des contacts ; p<sup>++</sup> coté émetteur et n<sup>++</sup> coté collecteur. Ceci a donné un bon rendement de conversion de 14% devant 11-12% de la cellule simple p-n.

# **Bibliographie**

# Bibliographie

[01] Caroline Boulord : « DEVELOPPEMENT DE TECHNIQUES DE METALLISATION INNOVANTES POUR CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A HAUT RENDEMENT », Thèse de Doctorat, 2011, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[02] Adaika Marwa : « ETUDE PAR SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'EFFET DES COUCHE SUR-DOÉES CÔTÉ CONTACTS AVANT ET ARRIERE SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE n/p EN SILICIUM », Thèse de Master, 2012, Université Mohammed Khiderde Biskra.

[03] Djeriouat Khadidja : « OPTIMISATION DU RENDEMENT DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A HÉTÉROJONCTIONS: GaInP/GaAs », Thèse de Magister, 2011, Université Abou BekrBelkid de Tlemcen.

[04] Malika Madani : « REALISATION DES COUCHES ANTIREFLETS DANS LES CELLULES SOLAIRES A COUCHES MINCES », Thèse de Magister, 2006, Université Abou Bekr Belkid de Tlemcen.

[05] Benoit Brousse : « RÉALISATION ET CARACTÉRISATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES OBTENUES PAR DÉPÔT PHYSIQUE », Thèse de Doctorat, 2004, Université de Limoges.

[06] Boukerzaza Nassima : « ETUDE DE L'EFFET DES PERTES THERMIQUES SUR LES CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE », Thèse de Magistère, Université Mentouri de Constantine.

[07] Dib Wassila: «MODELISATION DES STRUCTURES PHOTOVOLTAIQUES : ASPECTS FONDAMENTAUX ET APPLIQUES», Thèse de Doctorat, 2010, Université Abou Bekr Belkidde Tlemcen.

[08] Sylvain Cros : «DE L'INFLUENCE DE L'ACIDE CARBONIQUE DE L'AIR SUR LA TEMPERATURE TERRESTRE», Rapport du GIEC, 2007, Ecole des Mines de Paris - Paris Tech.

[09] Zouak Belkacem : «ETUDE DE L'ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX THERMOELECTRIQUES DES ANCIENNES ET NOUVELLES GÉNÉRATION RT APPLICATIONS PHOTOVOLTAIQUE THERMOÉLECTRICITÉ», Thèse de Magister, 2012, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[10] José Miguel Navarro : «CELLULES PHOTOVOLTAIQUES ORGANIQUES TRANSPARENTES DANS LE VISIBLE », Thèse de Doctorat, 2008, Université de Toulouse.

[11] Serge Poignant : «L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE», Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.

[12] Rémi de Bettignies : «CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES DÉRIVÉES DE NOUVEAUX SYSTÈMES CONJUGUÉS», Thèse de Doctorat, 2003, Université d'Angers.

[13] Maifi Lyes : «CALCUL DES PARAMÈTRES INTERNES D'UN MODULE PHOTOVOLTAIQUE A PARTIR DES PARAMÈTRES EXTERNES MESURÉS», Thèse de Magister, 2010, Université Mentouri de Constantine.

[14] Petibon Stéphane : «NOUVELLES ARCHITECTURES DISTRIBUEES DE GESTION ET CONVERSION DE L'ÉNERGIE POUR LES APPLICATIONS PHOTOVOLTAIQUES », Thèse de Doctorat, 2009, Université de Toulouse.

[15] Bouchekouf Seloua : «MODELISATION NUMERIQUE DES OPVC DANS LES SYSTEMES EnR», Thèse de Doctorat, 2010, Université Mentouri de Constantine.

[16] Benahmed Benabdallah Nadia : «PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SEMI-CONDUCTEURS (Si monocristallin et Ge) ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES A BASE DE Si et SiGe», Thèse de Magister, 2006, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen.

[17] Ben machiche Samira : «ETUDE DES PARAMÉTRÉS LIMITANT LE RENDEMENT D'UNE PHOTOPILE A BASE D'UNE STRUCTURE MIS», Thèse de Magister, 2009, Université Hadj Lakhdar de Batna.

[18] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled «ETUDE DE LA JONCTION PN D'UN SEMI-CONDUCTEUR A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE», Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, Université de Mentouri- Constantine et l'Institut National des Sciences appliquées de Lyon.

[19] <http://www.montefiore.ulg.ac.be/~vdh/supports-elen0075-1/notes-chap2.pdf>.

[20] Nichiporuk Oleksiy : «SIMULATION, FABRICATION ET ANALYSE DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A CONTACTS ARRIÉRES INTERDIGITÉS», Thèse de Doctorat, 2005, Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatique.

[21] Hocine Ghembaza : «OPTIMISATION DU PROFIL DE DISTRIBUTION DU PHOSPHORE DANS LES CELLULES SOLAIRES A BASE DE», Thèse de Magister, 2011, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen.

[22] Ouddah Mourad : «ÉTUDE DU SILICIUM POREUX DESTINEAUX CELLULES SOLAIRES », Thèse de Magister, 2009, Université Mentouri de Constantine.

[23] <http://www.pvmeas.com/solarcellspectralresponse.pdf>.

[24] Julien Dégoulange : «PURIFICATION ET CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET ELECTRIQUES DE SILICIUM D'ORIGINE METALLURGIQUE DESTINE A LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE», Thèse de Doctorat, 2008, Institut National Polytechnique DE Grenoble.

[25] Khadija Kouz, Hinde Cherkaoui Dekkaki, Sarah Cherel, Bertrand Maljournal, Christine Leger, Bendaoud Attaous, Fabrice Cuzin, Slimane Aziki : «Etude d'impact environnementale et sociale cadre du projet de complexe solaire d'Ouarzazate (Maroc)», 2011, Marocain Agency For Solar Energy.

[26] Louardi Remache: «SILICIUM POREUX PASSIVE PAR DES NITRURES ET DES OXYDES DE SILICIUM .APPLICATION AUX REVETEMENTS ANTIREFLECHISSANTS», Thèse de Doctorat, 2011, Université Mentouri de Constantine.

[27]Cécile Miquel : «SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES : FABRICATION ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL», Synthèse réalisée par Cécile Miquel sous la direction de Bruno Gaidon, 2009, HESPUL ENERGIES Renouvelables et Efficacité Energétique.

[28] Yiming Liu , Daniel Heinzl, Angus Rockett : «A REVISED VERSION OF THE AMPS SIMULATION CODE», Bourses d'Etat, Université de Nankai, à Tianjin, Chine et l'Université de l'Illinois, Urbana, Etats-Unis.

[29] Le logiciel de simulation : «AMPS-1D».

## Abstract

The purpose of this work is to study the effect of the thickness and doping of the emitter and the collector on the electrical characteristics of a p-n crystalline silicon solar cell. This study was carried out in the laboratory LMSM at the University of Biskra.

The electrical characteristics are the current-voltage characteristic under AM1.5 solar cell spectrum, the spectral response and the output parameters of the cell ( $J_{cc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ). The simulation is done by AMPS-1D software. The results show that the decrease of the emitter thickness, the increased of the collector thickness and the increase of the emitter doping results in an improvement in the cell efficiency. However, the doping of the collector does not give significant effect. In addition, the addition of highly doped regions below the contacts has improved the conversion efficiency to 14% from 11-12% of the single p-n solar cell.

**Key words:** Solar cell, crystalline silicon, doping effect, the thickness effect, AMPS software.

## Résumé

Le but de ce mémoire est l'étude de l'effet des épaisseurs et du dopage de l'émetteur et du collecteur sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire p-n en silicium cristallin. Cette étude a été effectuée au sein du laboratoire LMSM à l'université de Biskra.

Les caractéristiques électriques sont la caractéristique courant-tension en présence de l'éclairement solaire AM1.5 et la réponse spectrale, ainsi que les paramètres de sortie de la cellule ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ). La simulation est faite par le logiciel AMPS-1D. Les résultats obtenus montrent que la diminution de l'épaisseur de l'émetteur, l'augmentation de l'épaisseur du collecteur et l'augmentation du dopage de l'émetteur entraîne une amélioration dans le rendement de la cellule. Cependant, le dopage du collecteur n'a pas d'effet significatif. En plus, l'ajout de régions fortement dopées au dessous des contacts ;  $p^{++}$  coté émetteur et  $n^{++}$  coté collecteur a amélioré le rendement de conversion à 14% devant 11-12% de la cellule solaire simple p-n.

**Mots clé :** Cellule solaire, Silicium cristallin, L'effet de dopage, L'effet de l'épaisseur, AMPS.

## الملخص

في هذا العمل قمنا بعملية محاكاة للخصائص الكهربائية والطيفية للخلية الشمسية n+/p مصنوعة من السيليسيوم عن طريق البرنامج AMPS-1D. نهدف من هذه الدراسة الى دراسة تأثير السمك والتطعيم لكل من الباعث والمجمع على الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية. تمت هذه الدراسة في مخبر المواد نصف الناقلية و المعدنية. تظهر نتائج المحاكاة أن لكل من سمك الباعث و المجمع تأثير على مردود التحويل. نقص سمك الباعث و زيادة سمك المجمع يحسنان من المردود. بالنسبة للتطعيم وجدنا أن زيادة تطعيم الباعث يحسن من المردود أما المجمع فليس له تأثير يذكر. في الأخير إضافة مناطق شديدة التطعيم أدنا الوصلات المعدنية تحسن من كفاءة تحويل من 11-12% للخلية البسيطة إلى 14%.

**الكلمات الدالة:** خلية شمسية, السيليسيوم البلوري, تأثير السمك, تأثير التطعيم , AMPS.