

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

SIMULATION D'UN CELLULE SOLAIRE A BASE DE SILICIUM PAR LE LOGICIEL PC1D

Présenté par :

- Abdellaoui lakhdar
- Beghni fathi
- Hefaia Abdelbasset

Soutenu le :29/06/2022 devant le Jury :

<i>M. I.Taibi</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Amara Zeyneb</i>	<i>MBA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Amara hassen</i>	<i>DOCTORANT CHERCHEUR</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M. Medjadji Nacera</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Naama – Algérie - 2022



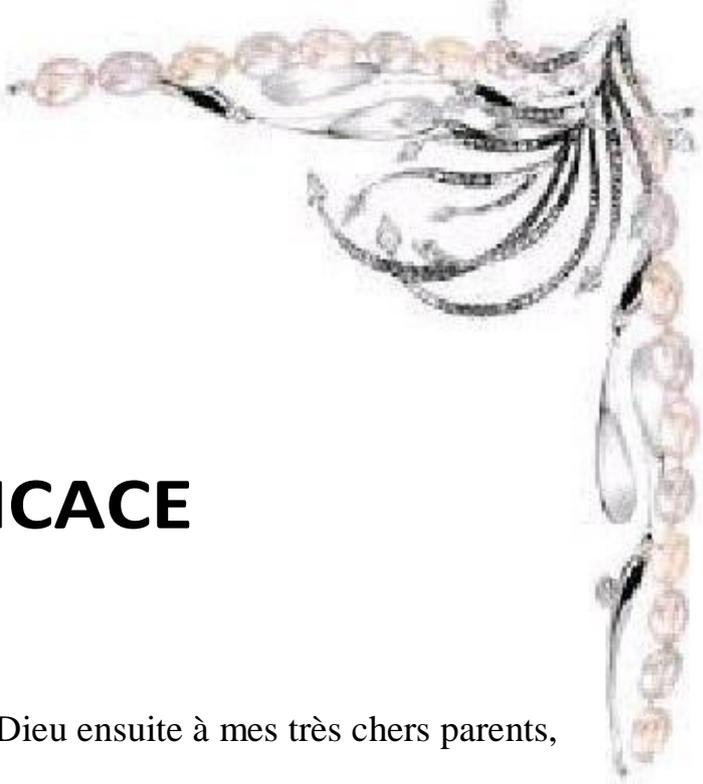
REMERCIEMENT

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté pour Accomplir ce travail.

Nos vifs et sincères remerciements à notre encadreurs M^r AMARA Hassen et M^{elle} AMARA Zeyneb, vous nous avez bien guidés dans ce travail de recherche, en nous donnant inlassablement beaucoup de votre temps, votre enthousiasme à partager vos connaissances tout comme votre sens chaleureux du contact nous a beaucoup marqué. Soyez assuré de notre plus sincère gratitude et de notre profond respect.

Aux membres du jury, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail, nous vous en remercions et vous témoignons notre profonde et respectueuse gratitude.

A tous les professeurs qui ont participés dans notre cursus et surtout à l'ensemble des enseignants de notre spécialité pour la qualité des cours qu'ils nous ont prodigués, et qui nous ont servi pour accomplir ce travail, nous vous remercions et vous témoignons nos sentiments les plus déferents.



DÉDICACE

Le plus grand merci revient à mon Dieu ensuite à mes très chers parents,
pour Leur sacrifice et leur encouragement, c'est grâce à mon Dieu et

à eux que j'ai pu achever mes études

A mon fils MOUAD et ma femme

A mes très chers frères et mes sœurs surtout MOHAMMED AMINE

A tous les membres de ma grande famille.

A tous mes enseignants.

A mes amis garçons et à tous les étudiants de l'électrotechnique.

ABDELLAOUI Lakhdar





DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A Allah d'abord qui nous a donné le courage pour finir ce

Travail

A mes parents

A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.

A ma femme et mon fille SAJA

A mes frères et mes sœurs,

A toute ma famille.

A tous mes enseignants.

A tous mes amis.



BEGHNI FATHI

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A Allah d'abord qui nous a donné le courage pour finir ce

Travail

A mes parents

A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur Soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.

A ma femme et mes fils.....

A mes frères et mes sœurs,

A toute ma famille.

A tous mes enseignants.

A tous mes amis.

HEFAIA Abdelbasset

SOMMAIRE

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Résumi.....	
Listes des figures	
Listes des tableaux.....	
Remerciement	
Didicase	
Nomenclatures.....	
Bibliographie	
Introduction générale	1

C

hapitre I Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

Introduction	2
Energie solaire	2
Spectre solaire.....	2
Types des rayonnements solaires	3
Energie solaire photovoltaïque	4
Historique	4
Cellule solaire photovoltaïque	5
Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire	6
1.4 Irradiation solaire.....	7
Caractérisation électrique des cellules photovoltaïques	7
Le courant de court-circuit <i>ICC</i>	8
La tension en circuit ouvert <i>VCO</i>	8
Le facteur de forme <i>FF</i>	9
Le rendement.....	9
La réponse spectrale.....	10
Types des cellules photovoltaïques	10
Cellules cristallines	10
Cellules à base de couches minces.....	11
Cellules organiques	12

Cellules à haut rendement.....	13
Cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC).....	14
cellules inorganiques.....	14
I. 7. Dopage et silicium.....	15
I. 7.1. Dopage de type N.....	15
I. 7.2. Dopage de type P.....	16
I. 8. Conclusion.....	16

C

hapitre II Réponse spectrale d'une cellule solaire

II .1 Introduction.....	17
II .2 Propriétés PV de silicium.....	17
Les étapes pour obtenir un silicium de qualité électronique.....	21
Réduction de la silice.....	21
Purification du silicium.....	21
II.3.3 Procédure <i>de Czochralski(CZ)</i>	22
II .4 Les étapes pour obtenir des cellules PV industrielle.....	23
A. Décapage.....	24
B. Texturation.....	25
C. Dopage.....	25
D. Bords de plaque.....	25
E. Couche antireflet.....	25
F. Champ face arrière.....	26
G. Métallisation.....	26
II .5 Réponse spectrale d'une cellule PV.....	28
II .6 Intérêt de la réponse spectrale.....	28
II .7 Rendement quantique interne RQI.....	28
II .8 Le rendement quantique externe (RQE).....	29
II .9 Couche antireflet.....	30
II .10 Propriétés de l'oxyde d'étain.....	30
II .10.1. Propriétés structurales.....	30
II .10.2. Propriétés électroniques.....	31

II .10.3. Propriétés optiques.....	32
II .10.4. Propriétés électriques	33
II .11 Modélisation des cellules photovoltaïques et les modèles.....	34
II .11.1 Modèle à sept paramètres (2M7P).....	34
II .11.2 Modèle a six paramètres (6P).....	35
II .11.3 Modèle a cinq paramètres (5P).....	36
II .11.4 Modèle a quatre paramètres (4P).....	36
II .11.5 Modèle a trois paramètres (3P).....	37
II .11 Conclusion	37

C

hapitre III : Résultats et discussion

Introduction	38
Le simulateur PC1D.....	38
A. Paramètres de la partie liée au dispositif (<i>Device</i>).....	39
B. Paramètres de la région 1 et région 2	40
C. Paramètres de la partie excitation.....	40
D. Partie résultats.....	40
III.3 Résultats de simulation.....	41
III.3 .1 Influence de l'épaisseur de base sur la tension, la puissance et le courant.....	41
Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement quantique interne (RQI).....	43
Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement quantique externe (RQE)	44
Influence de la variation de dopage sur le rendement quantique externe (RQE) et interne (RQI).....	45
Cellule de type SnO ₂ -Si (N ⁺) -Si(P).....	46
Caractéristique courant-tension de la cellule solaire	46
Simulation cellule solaire SnO ₂ -Si (N ⁺)-Si(P) par PC1D	47
Effet de l'épaisseur de la CAR sur le rendement	47
Effet de la réflexion.....	48
III.4.3 Simulation cellule solaire SnO ₂ -Si (N ⁺)-Si(P) et cellule Si(N ⁺)-Si(P) simulée sous PC1D.....	49
Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	51

LISTES DES FIGURES
LISTES DES FIGURES

Listes Des Figures

C

hapitre I Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

<i>Figure. I.1 : Répartition spectrale du rayonnement [2].....</i>	<i>2</i>
<i>Figure I.2 : cellules solaire [3]</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.3 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [3].....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.4 Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque [5]</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.5 : Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline [6]</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.6 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [9]</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.7 : Schéma d'une structure tandem [12]</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.8 : Principe de la cellule à hétérojonction [13].....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.9 : présenté dopage P-N [3]</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.10 : forme quatre liaisons covalentes avec un atome donneur [3]</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.11 : forme quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur [3].....</i>	<i>16</i>

C

hapitre II Réponse spectrale d'une cellule solaire

<i>Figure II.1 Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003[4]</i>	17
<i>Figure II.2 Structure de band du Silicium [5]</i>	18
<i>Figure II.3 Méthode de Czochralski [5]</i>	22
<i>Figure II.4 Lingots de silicium monocristallin [5]</i>	23
<i>Figure II.5 Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium [9]</i>	24
<i>Figure II.6 Les étapes de fabrication (A, B, C, D, E, F, G) d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium [11]</i>	25
<i>Figure II.7 Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium.....</i>	27
<i>Cristallin [10].....</i>	27
<i>Figure II.8 Exemple de rendements quantiques externe et interne d'une cellule solaire [12].....</i>	29
<i>Figure II .9 Maille élémentaire de l'oxyde d'étain SnO₂ dans la structure cristalline tétragonale de type rutile.</i>	31
<i>Figure II .10 Spectre de Diffraction des rayons X (DRX) des films SnO₂ [15]</i>	31
<i>Figure II .11 Diagramme énergétique de SnO₂ [18]</i>	32
<i>Figure II .12 Modèle à 7 paramètres.....</i>	34
<i>Figure II .13 Modèle a six paramètres.....</i>	35
<i>Figure II .14 Modèle à 5 paramètres</i>	36
<i>Figure II .15Modèle a 4 paramètres</i>	37
<i>Figure II .16 Modèle a 3 paramètres</i>	37

C

hapitre III : Résultats et discussion

<i>Figure.III.1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique</i>	<i>39</i>
<i>Figure.III.2 Caractéristique I(V) et puissance de la cellule avec texturation</i>	<i>41</i>
<i>Figure.III.3 Variation du rendement quantique interne en fonction de l'épaisseur.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure.III.4 Variation du rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure.III.5 la variation de dopage sur le rendement quantique externe (RQE).....</i>	<i>45</i>
<i>Figure.III.6 la variation de dopage sur le rendement quantique interne (RQI).....</i>	<i>45</i>
<i>Figure.III.7 : La caractéristique I(V) de SnO₂-Si (N⁺) -Si(P) sous PC1D</i>	<i>46</i>
<i>Figure III.8 : variation du rendement quantique interne en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs d'épaisseur de la CAR</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.9 : variation du rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs d'épaisseur de la CAR</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.10 : variation du rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de réflexion.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.11 : variation du rendement en fonction de la réflexion.</i>	<i>48</i>

LISTES DES TABLEAUX
LISTES DES TABLEAUX

Liste Des Tableaux

Chapitre II Réponse spectrale d'une cellule solaire

Tableau II.1-Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques [7].....	21
Tableau II.2 Quelques propriétés du silicium [3]	24
Tableau II.3-Description et rôle des étapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque Industrielle [9].	29

Chapitre III : Résultats et discussion

Tableau III.1-Comparaison cellule avec texturation et sans texturation	42
Tableau III.2-Comparaison entre cellule SnO ₂ -Si (N+) -Si(P) avec couche antireflet et la cellule avec (et sans) texturation Si (N+) -Si(P)	49

NOMENCLATURES
НОМЕНКЛАТУРЕС

Nomenclatures

I_{ph} : Photo-courant [A]

R_s : Résistance série [W]

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W]

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I_0 : Courant de saturation

P_M : Puissance maximale

P_0 : Puissance incident

RS: La réponse spectrale (mA/W)

$I(\lambda)$: L'intensité du courant mesurée (mA/cm²)

P_{inc} : Puissance incidente du rayonnement solaire = 1000 W/m² (ou 0,1 W/cm²)

$\phi(\lambda)$: est le flux lumineux incident (W.cm²)

S : est la surface de la cellule (cm²)

RQI : Rendement quantique interne (%)

$R(\lambda)$: Le coefficient de la réflexion associé à chaque longueur d'onde

$(1 - R(\lambda))$: est la partie transmise du flux de photons incidents, dans le matériau

$J_{ph}(\lambda)$: est la densité de courant collectée à la longueur d'onde λ (A/cm²).

$\phi(\lambda)$: est le flux des photons incidents pour chaque longueur d'onde (cm⁻².s⁻¹).

q : la charge électronique

RQE : Le rendement quantique externe (%),

h : étant la constante de Planck.

λ : La longueur d'onde du photon

I_{CC} : Courant court-circuit

P_{max} : Puissance Max

FF : Facteur de forme

η_m : rendement

INTRODUCTION GENERALE
ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Introduction Générale

La demande mondiale en énergie électrique augmente rapidement et les combustibles fossiles tels que le pétrole, le gaz et le charbon, dont la majeure partie de l'énergie fournie, s'épuisent progressivement. Les sources des énergies renouvelables devraient remplacer les sources d'énergie traditionnelles non renouvelables afin de répondre à la demande croissante d'énergie dans l'avenir. L'énergie renouvelable est nécessaire non seulement en raison de la pénurie inévitable de sources d'énergie fossile.

L'énergie solaire photovoltaïque est assurée fondamentalement par des cellules solaires à base de silicium

Alors le principe d'une cellule photovoltaïque repose sur la conversion d'une énergie lumineuse en énergie électrique utilisable.

Le matériau le plus utilisé et industrialisé depuis 50 ans dans la fabrication de cellules photovoltaïque 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).

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on s'intéressera à la théorie de cellule solaire photovoltaïque.

Dans le second chapitre nous étudierons la réponse spectrale de la cellule solaire (propriété électriques....) et les propriétés électriques de la couche anti reflet.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus par la simulation d'une trois cellule solaire $\text{SnO}_2(\text{N})/\text{Si}(\text{N}+)/\text{Si}(\text{P})$ avec texturation et cellule solaire $\text{SnO}_2(\text{N})/\text{Si}(\text{N}+)/\text{Si}(\text{P})$ sans texturation cellule solaire avec couche anti reflet.

CHAPITRE I : Généralités sur les
cellules solaires photovoltaïques

Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les notions de base des cellules solaires, leur principe de +types des cellules solaires et les caractéristiques des cellules photovoltaïques.

Energie solaire

Spectre solaire

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre ; 150 millions km, le soleil est constitué principalement de gaz (composé de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium), dont la fusion continue à produire une quantité d'énergie phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène et des atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin [1]. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes majoritairement comprises entre $0.2 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$. Hors atmosphère, le rayonnement émis par le soleil (AMO) est constitué de :

9% d'UV ($0.1 \mu\text{m} < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$), 43% de visible Vis ($0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$)

Et 48% d'infrarouges IR ($0.75 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$).

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde des spectres AM 0 et AM 1.5G (voir Figure I.1).

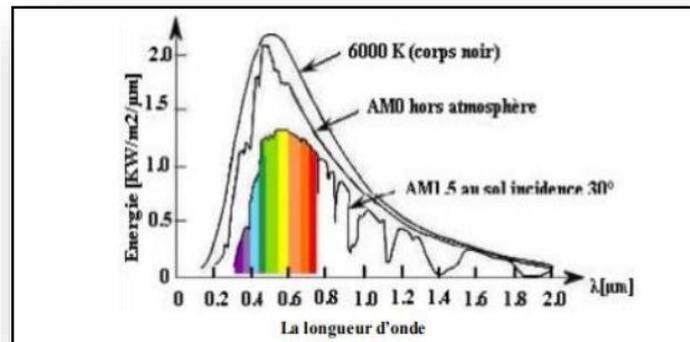


Figure. I.1 : Répartition spectrale du rayonnement [2]

On remarque que l'absorption, due à l'atmosphère à certaines longueurs d'ondes, est très importante.

Les longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique du spectre solaire sont comprises

entre 290 nm et 2770 nm avec les rayons ultraviolets, la lumière visible et les rayons infrarouges. L'atmosphère terrestre joue le rôle de filtre, les nombreux gaz présents dans l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement.

La notion d'Air Mass (AM) quantifie la puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle du soleil par rapport au zénith. Le spectre solaire AM 0 représente le spectre solaire hors atmosphère, il est principalement utilisé dans le cadre des applications spatiales $P \approx 1.36 \text{ KW} \cdot \text{m}^{-2}$. Le spectre AM 1.5 représente le spectre solaire sur Terre au niveau de la mer (soleil au zénith par temps clair avec un angle de 48°) $P \approx 1 \text{ KW} \cdot \text{m}^2$ [5].

Dans le spectre AM 1.5G : Le "1.5" signifie que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil. Le « G » représente le rayonnement "global". Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM 1.5 sous un éclairage de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

Types des rayonnements solaires

On distingue plusieurs types de rayonnement dont nous allons voir quelques-uns.

- **Rayonnement diffus**

Il intéresse tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol [6].

- **Rayonnement direct**

Représente des rayons ultraviolets.

Émis du soleil et arrive à la Terre directement.

Il a une trajectoire linéaire

Employé dans les systèmes de concentration et se symbolise par la lettre "D" dans le spectre AM 1.5D

- **Rayonnement réfléchi**

Il représente des rayons réfléchis par la terre.

- **Rayonnement Global**

Il constitue un ensemble de rayons (direct, diffus et réfléchi) qui est employé pour faire fonctionner les panneaux solaires [1]

Energie solaire photovoltaïque

Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

En 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

En 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

En 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.

En 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

En 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

En 1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés [3]

Cellule solaire photovoltaïque

C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 V à 0,6 V

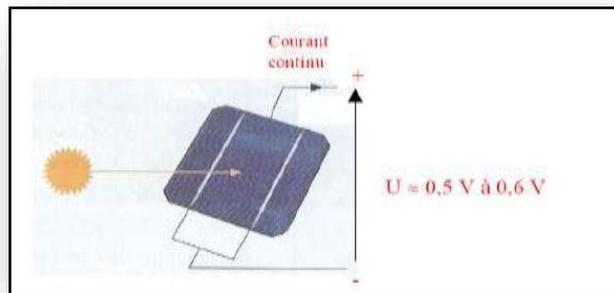


Figure I.2 : cellules solaire [3]

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) :

- une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P),
- une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque à la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium. Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé. [4]

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Elle a été découverte en 1839 par Antoine Becquerel, [3] ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique.

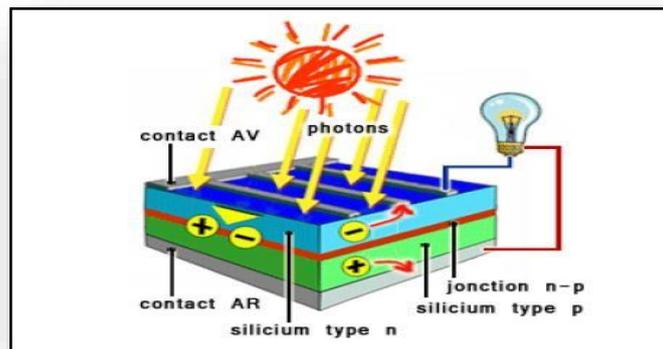


Figure I.3 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [3]

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie ($h\nu$) à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

1.4 Irradiation solaire

Le calcul et les mesures par satellite montrent que la terre qui est située à environ 150 millions de kilomètres du soleil - reçoit une valeur moyenne du flux solaire à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W.

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0.2 et 2.5 μm , il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de 0.4 et 0.8 μm). L'irradiation solaire totale (noté TSI pour total Solar irradiance) est la quantité d'énergie radiative provenant du Soleil (intensité totale du rayonnement) reçue par une surface de 1m² du sommet de l'atmosphère terrestre, lorsque celui-ci se situe à une unité atmosphérique (1,96.108 km) du Soleil et que la trajectoire du rayon est perpendiculaire à cette surface.

Le soleil émet continuellement une énergie radiative considérable dans toutes les directions du système solaire. Celle-ci absorbe et reflète une partie de ce rayonnement solaire de telle sorte que l'énergie reçue au niveau de la surface de la mer (altitude 0 m), par ciel clair et quand le soleil est au zénith, vaut 1 000 W/m². Cette situation a été définie par la communauté scientifique comme une situation de référence décrite par l'indicateur Air-Masse, notée AM 1. Le coefficient Air-Masse évalue la masse atmosphérique traversée par le rayonnement solaire. En moyenne au sol et dans toute la zone tempérée de l'hémisphère nord et donc en France-Europe et en Algérie-Maghreb, on utilise AM1.5 (voir figure I.4)

Caractérisation électrique des cellules photovoltaïques

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension I(V). Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe I-V vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie

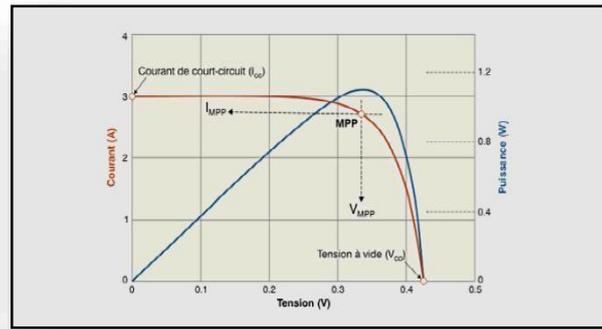


Figure I.4 Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque [5]

Le courant de court-circuit I_{CC}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (I.1)$$

Où :

I_{ph} : Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiante F, avec correction selon T.

R_s : Résistance série [W].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W].

La tension en circuit ouvert V_{CO}

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression :

$$I_{cc} = \frac{K_t}{q} \ln \left| 1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right| \quad (I.2)$$

Avec :

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I_0 : courant de saturation.

Le facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{co}$:

$$FF = \frac{P_M}{I_{cc}V_{cc}} = \frac{I_M V_M}{I_{cc}V_{co}} \quad (I.3)$$

Avec :

P_M : puissance maximale.

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

Le rendement

Le rendement de conversion est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule PV et la puissance du rayonnement solaire incident :

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} \quad (I.4)$$

Avec :

P_0 : Puissance incident.

Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E est l'éclairement -irradiante- (en W/m^2).

Le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_M}{E \cdot S} \quad (I.5)$$

$$P_M = FF * V_{co} * I_{cc} \quad (I.6)$$

$$\eta = \frac{FF * V_{co} * I_{cc}}{E * S} \quad (I.7)$$

La réponse spectrale

Les photons ayant une énergie supérieure au gap du semi-conducteur pourront créer une paire électron-trou. L'énergie excédentaire sera perdue, elle aussi en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Une autre technique fondamentale de caractérisation est la réponse spectrale. Elle permet d'apporter des informations sur la capacité de la cellule à produire un photo-courant en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident. Par exemple, les RS de cellules au silicium cristallin et au silicium amorphe sont représentées sur Figure I.5 [6].

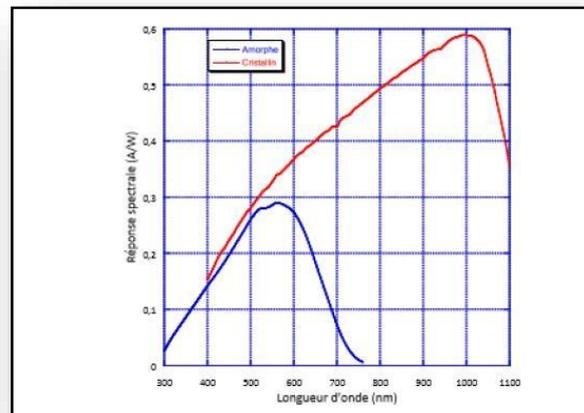


Figure I.5: Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline [6].

Donc la réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit de la cellule par unité de flux monochromatique incident.

$$R_S = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P_g(\lambda)} \quad (I.8)$$

Où $R_S(\lambda)$ est la réponse spectrale, exprimée en A/W ; $P_g(\lambda)$ l'éclairement monochromatique global, exprimé en W/m² et $J_{sc}(\lambda)$ désigne le courant de court-circuit, exprimé en A/cm².

Types des cellules photovoltaïques

Cellules cristallines

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. On distingue deux types de cellules cristallines :

Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

- Cellules en silicium poly cristallin :

Le silicium poly cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multi cristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains [7].

La qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes des grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de gains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction. Les techniques de production du silicium poly cristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre avec une efficacité de 12 % à 14% [8].

- Cellules en silicium monocristallin :

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 % à 15%



Figure I.6 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [9]

Cellules à base de couches minces

- Cellules en Silicium amorphe :

Les cellules en silicium amorphe sont des cellules dont les atomes sont agencés sans réelle organisation ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Désorganisations de la matière entraîne des difficultés de déplacement des charges générées, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Il en résulte un faible rendement. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-

conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si : H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes. Le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes ou horodateurs), possède un rendement de 5 % à 7% sur une surface de 15m² [8].

- Cellules solaires **CIGS**

Les cellules CIGS renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à 2,5 μm d'épaisseur étant dopée p, elle doit être recouverte d'un matériau de type n, par exemple du sulfure de cadmium (*CdS*), du cadmium... mais sur une épaisseur de 0,04 à 0,07 μm , seulement autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont elles aussi à hétérojonction, rendements de conversion faible environ (7%, 11%). Comme son homologue au silicium amorphe, la cellule CIGS résiste mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au *CdT*[10].

- Cellules **CdTe**

Le matériau le plus prometteur est le tellure de cadmium (*CdTe*) qui offre la possibilité de produire des modules à des coûts plus faibles avec un rendement de 10%, et un avantage qui réside dans la forte absorption du tellure de cadmium [10].

Cellules organiques

Les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles [11].

Cellules à haut rendement

- **Cellules à jonction**

Cellules tandem (Cellule micro-morphe) :

Quand on empile deux cellules simples l'une sur l'autre, on obtient des cellules tandem, la cellule « top » est mince (amorphe) et n'absorbe que les photons à haute énergie (bleu) tandis que la cellule « Botton » (en microcristallin) collectionne le reste des photons et les transforme en électricité par exemple : une couche mince de silicium amorphe empilée sur une couche silicium cristallin. Ce tandem optimise le rendement comparé à celui produit par des cellules simples toutes seules et ce, qu'elles que soient leurs caractéristiques (amorphes, cristallines ou microcristallines).

Les cellules empilés l'une sur l'autre sont mises en série grâce à une couche de recombinaison des porteurs de charges.

La tension de circuit ouvert du dispositif est donc la somme des tensions de circuit ouvert des cellules si elles étaient prises toutes seules, et le courant de court-circuit est le plus faible des deux cellules.

Cette structure offre l'avantage de pouvoir utiliser deux matériaux dont les bandes interdites différent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption.

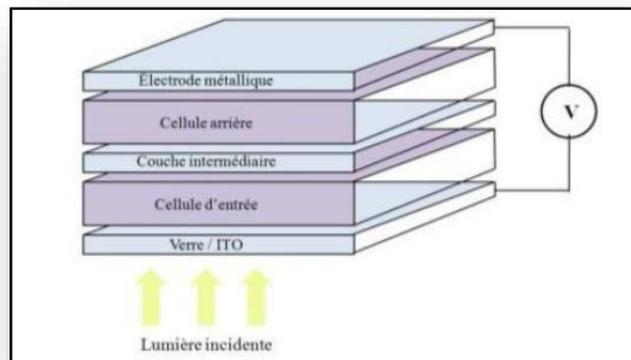


Figure I.7 : Schéma d'une structure tandem [12]

- **Cellules multi-jonctions :**

Les cellules multi-jonctions (hétérojonction) sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs ($GaAs$, Ge , $GaInP_2$...) possédant chacun un spectre limité, de telle sorte que le choix des matériaux dont les longueurs d'onde limites soient les plus proches possibles les unes des autres. On obtient ces cellules multi-jonctions à partir de différentes couches minces, ce qui permet

d'optimiser le travail d'absorption et obtenir un meilleur rendement, atteignant 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place. Ces cellules limitent les pertes d'énergie car il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure I.8). Ainsi, il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [13].

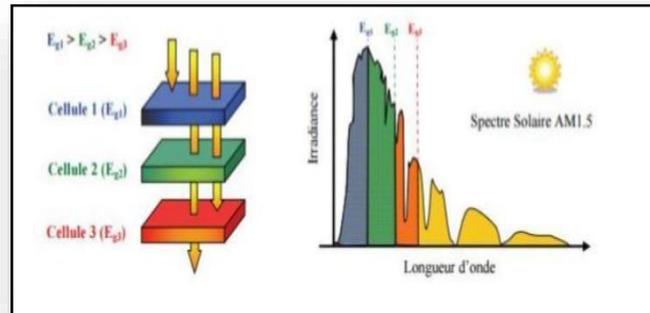


Figure I.8 : Principe de la cellule à hétérojonction [13].

Cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC)

Inspiré par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 90 des cellules solaires composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié est de 10,4% pour une cellule de 1cm², réalisé par la société Sharp [14]

cellules inorganiques

Cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (*notée E_g* en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée à l'énergie du photon. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile [15]

I. 7. Dopage et silicium

Pourquoi le silicium ?

Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique. Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons.

Si un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 5 électrons périphériques (phosphore par exemple), un électron ne participe pas aux liaisons, il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur est dit doper N.

Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome ayant trois électrons périphériques (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir combler ce manque. On dit alors qu'il y a conduction par un trou et le semi-conducteur est dit dopé de type P.

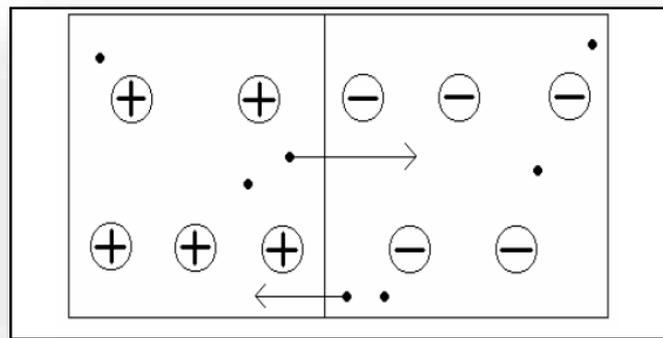


Figure I.9 : présenté dopage P-N [3]

I. 7.1. Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

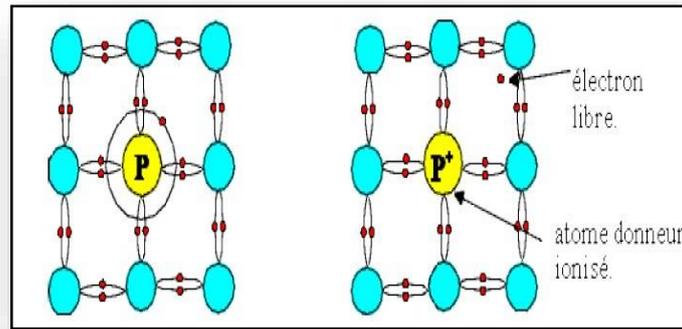


Figure I.10 : forme quatre liaisons covalentes avec un atome donneur [3]

I. 7.2. Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

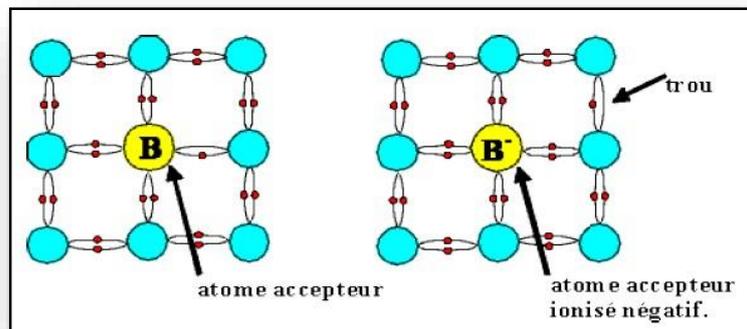


Figure I.11 : forme quatre liaisons covalentes avec un atome accepteur [3]

I. 8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule photovoltaïque, technologie des cellules solaires PV à base de Silicium et caractérisation électrique des cellules photovoltaïques.

CHAPITRE II : Réponse spectrale
CHAPITRE II : Réponse spectrale
d'une cellule solaire
q, nne cellule solaire

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 [1], 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 [2].

II .2 Propriétés PV de silicium

Le silicium fait partie de la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, il dispose de 4 électrons de valence [3]. 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%) [1]. 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 (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore) [1].

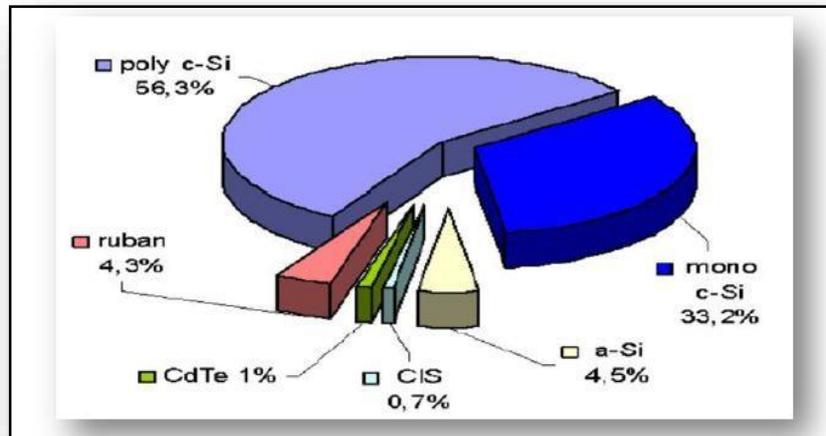


Figure II.1 Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003[4].

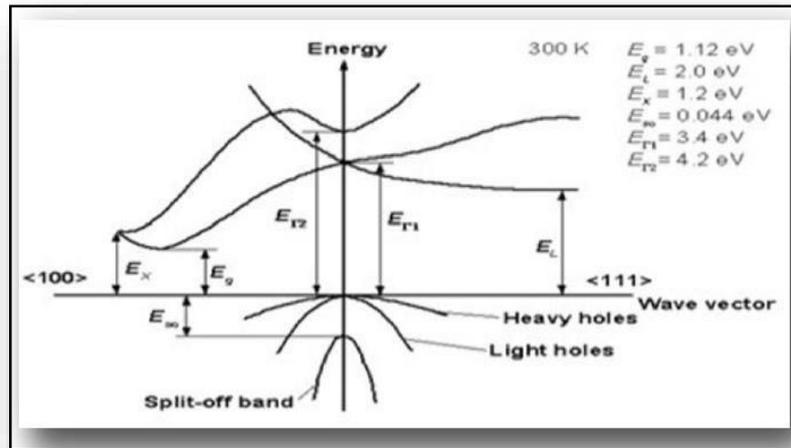


Figure II.2 Structure de bande du Silicium [5].

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

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) [6].

Le tableau suivant reprend les principaux avantages et inconvénient des différents types de cellules PV [7].

Tableau II.1-Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques [7]

Types de cellules PV		AVANTAGES	INCONVENIENT
Cellules cristallines	Cellules monocristallines	<ul style="list-style-type: none"> • bon rendement, de 14 à 16%. • bon ratio (d'environ 150 WC/m²) ce qui permet un gain de place si nécessaire (surface de 1,75 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance). • durée de vie importante (+/- 30 ans). • nombre de fabricants élevé. • stabilité de production. 	<ul style="list-style-type: none"> • coût de production élevé. • rendement faible sous un faible éclairement. • méthode de production laborieuse.

	<p style="text-align: center;">Cellules polycristallines</p> <ul style="list-style-type: none"> ● bon rendement, de 11 à 13%. ● bon ratio (environ 120 WC/m²) mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin (surface de 2 ha environ nécessaire pour 1MW_c de puissance). ● durée de vie importante (+/- 30 ans). ● meilleur marché que le monocristallin. ● cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module. ● stabilité de production. ● adapté à la production à grande échelle 	<ul style="list-style-type: none"> ● rendement faible sous un faible éclairement
<p style="text-align: center;">Couches minces</p>	<p style="text-align: center;">Silicium amorphe</p> <ul style="list-style-type: none"> ● fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert). ● un peu moins chère que les autres technologies. intégration sur supports souples ou rigides. ● Moins sensible aux températures élevées. 	<ul style="list-style-type: none"> ● rendement faible en plein soleil, de 5% à 7%. ● nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio WC/m² faible, environ 60 WC/m²) - (surface de 3,75 ha environ nécessaire pour 1MW_c de puissance). ● performances qui diminuent avec le temps, d'environ 7%. ● Durée de vite courte (+/10an

Chapitre II : Réponse spectrale d'une cellule solaire

	CIS / CIGS	<ul style="list-style-type: none">• 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).• permet de s'affranchir du silicium.• les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité.• la cellule peut être construite sur un substrat flexible.• coût moindre que pour le silicium amorphe.	<ul style="list-style-type: none">• ratio WC/m² moyen (surface de 2,75 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance).• moins performant que le silicium traditionnel.
--	-------------------	--	---

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 [3].

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 μm 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 [6].

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

Tableau II.2 Quelques propriétés du silicium [3].

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

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].

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.

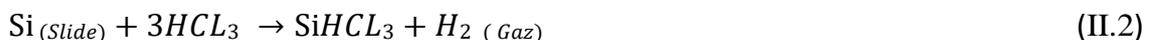
Réaction principale :



Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique [5].

Purification du silicium

On va effectuer une purification chimique, une des méthodes consiste à faire une distillation à partir de SiHCl₃ (*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 *autrichlorosilane*. Puis SiHCl₃ (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. *Cetrichlorosilane* purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium [5]



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* [5].

II.3.3 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 (voir figure II.3) [5].

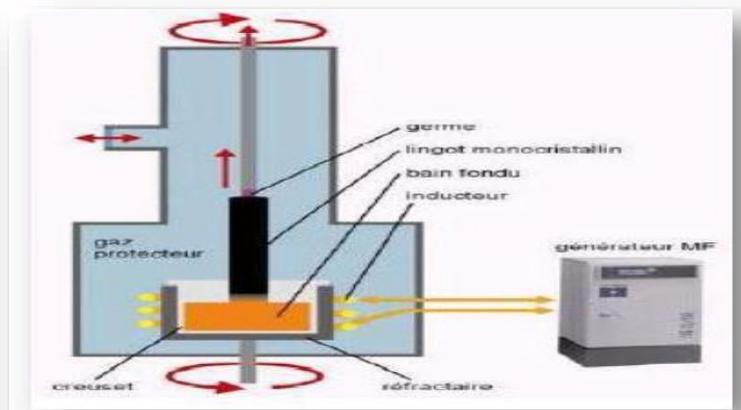


Figure II.3 Méthode de Czochralski [5].

La figure II.4 présente deux cristaux obtenus par la méthode Czochralski le premier à un diamètre de 150mm, le second à un diamètre de 200mm [5].



Figure II.4 Lingots de silicium monocristallin [5].

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 [5].

II .4 Les étapes pour obtenir des cellules PV industrielle

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 multi cristallin [8]. 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, vue 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 [8].

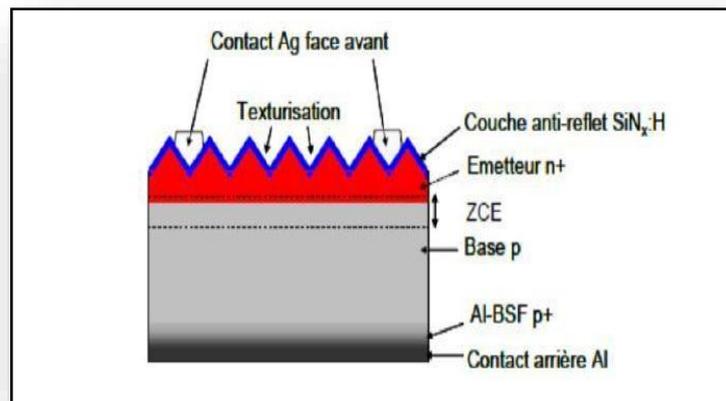


Figure II.5 Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium [9].

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 [10].

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 recherchée, la profondeur de jonction se répartit entre 0.15 et $0.5\mu\text{m}$. On réalise la zone N + par diffusion. La concentration en impuretés pouvant dépasser 10^{20}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, et la tension de circuit ouvert entre 0.55 et 0.6V [6]. L'enchaînement des étapes ci-dessous représente un procédé industriel standard auquel il faudra ajouter les sous-étapes de transport, nettoyage et mesure [10] :

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 CH₃COOH et d'acide nitrique HNO₃.

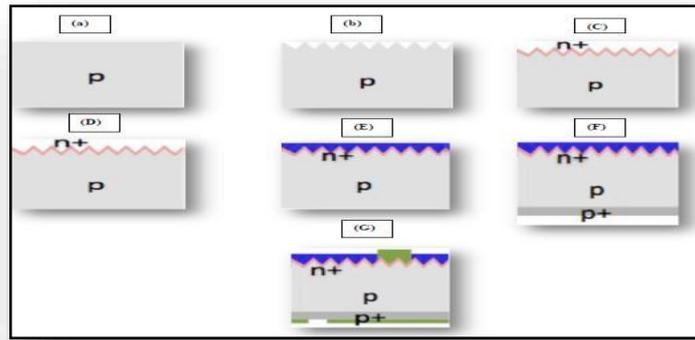


Figure II.6 Les étapes de fabrication (A, B, C, D, E, F, G) d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium [11].

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 $POCl_3$ dans un four à passage, $800^{\circ}C < T < 900^{\circ}C$, 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+ 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 CF_4 et oxygène 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 Si_3N_4 à partir de silane SiH_4 et d'ammoniac 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°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 [10].

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

Tableau II.3-Description et rôle des étapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque Industrielle [9].

Etape	Techniques d'élaboration	Rôle Texturisation
Texturisation	Gravure chimique dans un bain acide (Si multi-cristallin) ou basique (Si monocristallin)	Diminution de la réflectivité
Formation de la jonction p-n	Diffusion de phosphore POCl ₃ (~ 30 min à 850 °C)	Création d'un émetteur n+ de résistance de couche $50 \Omega < R_{sh} < 60 \Omega$
Ouverture de la jonction	Gravure plasma latérale, gravure chimique ou découpe laser	Elimination des courts circuits entre l'émetteur n+ et la base p
Dépôt de la couche <i>anti - reflet</i>	Dépôt PECVD de <i>SiN_o</i> ou <i>SiNx:H</i>	Diminution de la réflectivité et amélioration de la passivation en surface et en volume
Métallisation	-Face avant : sérigraphie d'une grille Ag -Face arrière : sérigraphie pleine plaque Al	Assurer une bonne conduction du courant
Recuit des contacts	Four à passage (30s à 800°C)	-Face avant : gravure de la couche antireflet et formation du contact des sur l'émetteur -Face arrière : formation d'une couche p ⁺ (BSF)

Chapitre II : Réponse spectrale d'une cellule solaire

Les cellules photovoltaïques ainsi finies sont assemblées entre elles (en série et/ou en parallèle) et encapsulées pour devenir un module solaire photovoltaïque pouvant fonctionner pendant plus de 20 ans [6].

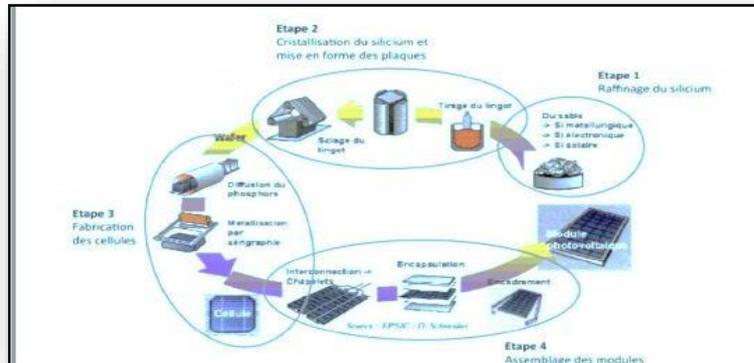


Figure II.7 Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium

Cristallin [10].

On y retrouve les étapes suivantes [10]

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

Étape 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).

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

Étape 4 : Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.

Étape 5 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques [10].

II .5 Réponse spectrale d'une cellule PV

La réponse spectrale RS d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'intensité du courant $I(\lambda)$ généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident $P_{inc}(\lambda)$. La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante [12]

$$RS(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda).S}$$

Où :

RS : La réponse spectrale (mA/W),

$I(\lambda)$: L'intensité du courant mesurée (mA/cm²),

P_{inc} : Puissance incidente du rayonnement solaire = 1000 W/m² (ou 0,1 W/cm²),

$\phi(\lambda)$: est le flux lumineux incident (W.cm²),

S : est la surface de la cellule (cm²).

II .6 Intérêt de la réponse spectrale

La réponse spectrale (ou le rendement quantique), aux courtes longueurs d'onde (α élevé), apporte des informations sur les zones du semi-conducteur proche de la surface éclairée. Les informations concernant le volume peuvent être obtenues à partir de la réponse aux grandes longueurs d'onde (α faible). La réponse spectrale est l'une des méthodes de caractérisation utilisée pour la détermination des paramètres du dispositif durant l'étape recherche et développement et durant la production des cellules solaires.

II .7 Rendement quantique interne RQI

Le rendement quantique externe est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la surface de la cellule) et les photons transmis (absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette valeur s'appelle le rendement quantique interne RQI [12].

Si l'on prend en compte de la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine le rendement quantique interne $RQI(\lambda)$ de la cellule solaire par :

$$RQI = \frac{RQE}{(1-R(\lambda))}$$

RQI : Rendement quantique interne (%),

$R(\lambda)$: Le coefficient de la réflexion associé à chaque longueur d'onde,

$(1 - R(\lambda))$: est la partie transmise du flux de photons incidents, dans le matériau,

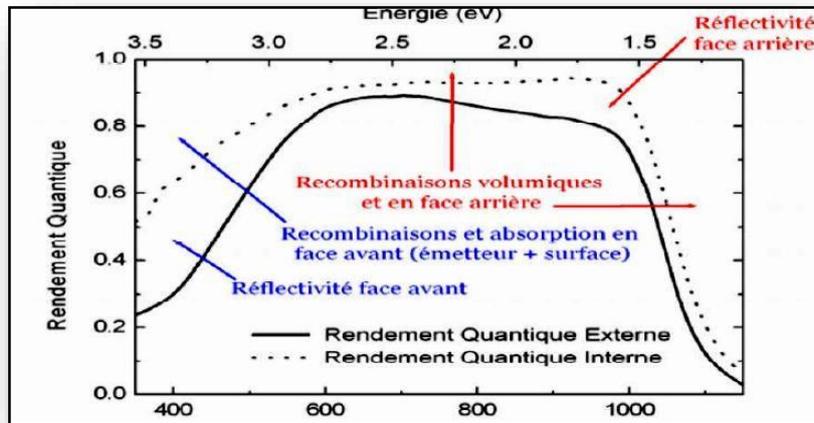


Figure II.8 Exemple de rendements quantiques externe et interne d'une cellule solaire [12].

II .8 Le rendement quantique externe (RQE)

Le rendement quantique externe RQE est le pourcentage d'électrons collectés qui participent photocourant par rapport au nombre de photons incidents [12].

$$RQE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q \phi(\lambda)} \quad \text{II.5}$$

Où :

$J_{ph}(\lambda)$: est la densité de courant collectée à la longueur d'onde λ (A/cm²).

$\phi(\lambda)$: est le flux des photons incidents pour chaque longueur d'onde (cm⁻².s⁻¹).

q : La charge électronique.

C'est en général cette grandeur qui est mesurée par les physiciens et qui permet de calculer le rendement quantique externe contraire à la réponse spectrale, utilisé par les ingénieurs. En prenant en compte de l'énergie des photons, on trouve la relation entre ces deux grandeurs :

$$RQE = \frac{hc}{q \lambda} \times RS \quad \text{II.6}$$

RQE : Le rendement quantique externe (%),

h : Étant la constante de Planck.

λ : La longueur d'onde du photon.

II .9 Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) d'épaisseur (d_{CAR}) et d'indice de réfraction (n_{CAR}) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces.

On obtiendra l'annulation des deux faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et l'interface CAR/semi-conducteur (deux rayons réfléchis en opposition de phase). Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents).

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , $SiNx$, etc) [13].

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule.

Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

Les couches antireflets, elles sont généralement de la silice (SiO_2), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donnée dans le logiciel sous forme de fichiers.

II .10 Propriétés de l'oxyde d'étain

Le dioxyde d'étain ou « oxyde stannique » se trouve à l'état naturel sous forme de cassitérite minérale. La cassitérite est un oxyde de couleur variable, allant du jaunâtre au noir, elle est connue et exploitée depuis les temps les plus anciens. Son nom (du grec *kassiteros*, "étain") lui a été donné par le minéralogiste français *Beudant* en 1832 [14]. Notre travail porte sur ce matériau dont nous allons passer en revue les principales propriétés. Celles-ci ont été beaucoup étudiées par de nombreux auteurs, tant au niveau structural [15] que des propriétés électriques ou optiques.

II .10.1. Propriétés structurales

Le dioxyde d'étain est le principal minerai d'étain. A l'état naturel (sous forme cassitérite), cristallise dans une structure de type rutile. Les paramètres du réseau cristallin sont les suivants : $a=b= 4.74\text{Å}$ $c= 3.19\text{Å}$. La maille élémentaire est quadratique, contient six atomes : deux atomes d'étain et quatre atomes d'oxygène. Chaque atome d'étain est le centre d'un octaèdre régulier formé par six atomes d'oxygène, tandis que chaque atome d'oxygène est entouré par trois atomes d'étain situé au sommet d'un triangle isocèle [16]. Les rayons ioniques du cation Sn^{4+} et de l'anion O^{2-} ont pour valeurs respectivement 0.071 et 0.14 nm. Une représentation schématique d'une maille élémentaire de dioxyde d'étain est reportée en figure II .8 L'orientation cristallographique de la maille du SnO_2 varie selon le mode d'élaboration de l'oxyde d'étain [18]. (Voir figure II .9).

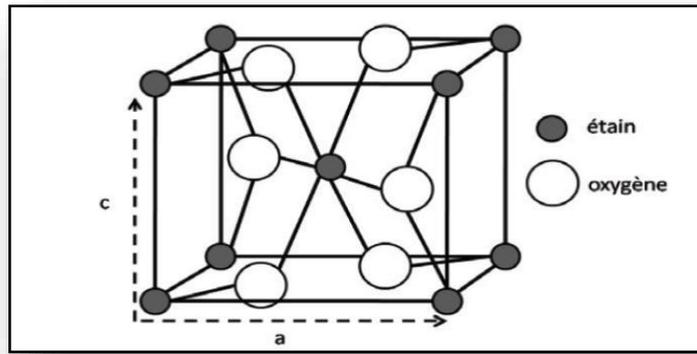


Figure II .9 Maille élémentaire de l'oxyde d'étain SnO_2 dans la structure cristalline tétragonale de type rutile.

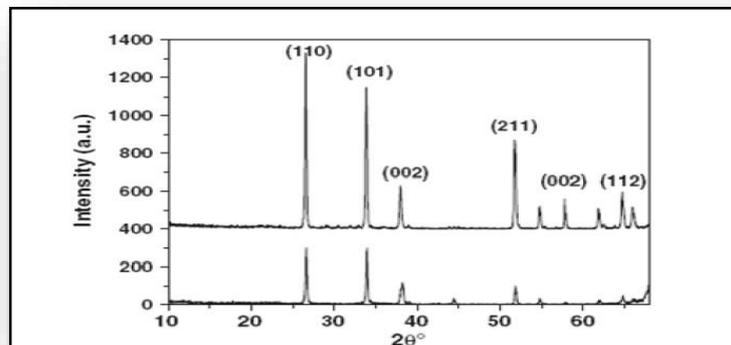


Figure II .10 Spectre de Diffraction des rayons X (DRX) des films SnO_2 [15].

II .10.2. Propriétés électroniques

L'oxyde d'étain est un semi-conducteur avec une large bande interdite de 3,6 eV à 300K [17]. La conductivité électrique du matériau est due aux défauts intrinsèques tels que les lacunes d'oxygènes ou bien à l'existence d'atomes d'étain interstitiels.

La conductivité électronique est produite à cause de la mobilité des électrons à partir de la lacune d'oxygène créée possédant 2 électrons qu'elle peut céder sous l'effet de la température. Les électrons libérés peuvent se fixer sur des atomes d'étain Sn^{4+} . Ils deviennent alors Sn^{2+} et se comportent comme des donneurs d'électrons (figure II .10). La concentration d'électrons libres dans SnO_2 pur est proportionnelle à celle des lacunes d'oxygènes, les atomes d'étains interstitiels agissent aussi comme donneurs intrinsèques [16].

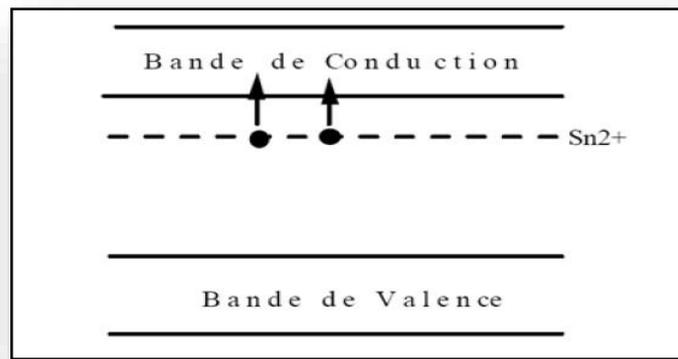


Figure II .11 Diagramme énergétique de SnO₂ [18].

II .10.3. Propriétés optiques

L'oxyde d'étain présente une forte absorption dans le domaine de l'ultraviolet et une forte réflexion dans le domaine de l'infrarouge. Il présente aussi une forte transmission dans toute la gamme spectrale du visible.

C'est un semi-conducteur à large bande interdite (gap). On relève d'après la bibliographie, une grande dispersion de l'énergie de cette bande interdite qui varie suivant le mode de préparation et le taux du dopage (3.6- 4.22) eV [19]. La valeur moyenne expérimentale est de 3,6 eV.

Le gap du dioxyde d'étain est du type direct, les extrema de la bande de valence et de la bande de conduction sont sur le même axe du vecteur d'onde K dans la zone de Brillouin. Les transitions des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction se font verticalement.

La transmission optique des couches minces du dioxyde d'étain est importante dans le spectre du visible $400 < \lambda < 800$ nm [20,21], et décroît pour les faibles longueurs d'ondes $\lambda < 400$ nm (hautes énergies). Pour des longueurs d'ondes importantes (faibles énergies) la lumière sera réfléchie. L'indice de réfraction du dioxyde d'étain, varie en fonction des conditions d'élaboration, (1.997- 2.093). L'indice de réfraction des films SnO₂ obtenus par sol- gel, augmente à (1.8-1.9) due à la forte interaction entre les couches, due à la faible viscosité qui remplit les pores [22]. Le dopage à l'antimoine provoque la diminution de l'indice (1.40-1.45]. L'indice de réfraction des films SnO₂ croît (1, 35- 1,88) avec l'augmentation du temps de recuit [19].

II .10.4. Propriétés électriques

Rappelons qu'à température ambiante l'oxyde d'étain (SnO_2) est un matériau semi-conducteur avec un gap de 3.6 eV à est pratiquement isolant (SnO_2), mais une fois dopé il devient un bon conducteur. Le dopage est réalisé avec des atomes de la colonne III ou de la colonne II, par exemple l'Indium (colonne III) ou des atomes de Zinc (colonne II) qui ont environ les mêmes rayons ioniques (0.081nm) pour In^{3+} et 0,074nm pour Zn^{2+} que les ions d'étain Sn^{4+} (0.071nm).

Leur incorporation dans le réseau de SnO_2 les place aux mêmes nœuds du réseau que les atomes Sn. L'introduction de ce dopant a pour conséquence l'addition d'un électron libre dans le réseau par atome d'indium. La résistivité de ce semi-conducteur de type n ainsi créé, diminue lorsque la concentration de porteurs (électrons) augmente.

La concentration des porteurs de charges de l'oxyde d'étain performant est comprise entre 10^{19} - 10^{21}cm^{-3} . Après dopage à l'antimoine, la densité des porteurs de charge augmente $18 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ - $32.65 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$, $10 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ [23]. SnO_2 présente généralement une résistivité électrique $\rho \approx 10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$. Cette faible résistivité électrique est due à une importante concentration de porteurs.

La conductivité électrique de ce matériau, dépend de la mobilité des porteurs.

La mobilité des porteurs est un paramètre qui a une influence sur la conductivité électrique des couches, elle dépend de la diffusion des porteurs de charge dans le réseau cristallin. Plus la concentration des porteurs est élevée plus la diffusion devient importante plus la mobilité diminue ce constat est observé par Serin [24], pour des films déposés par spray dont la mobilité (35-10,5) cm^2/Vs , diminue avec l'augmentation de la température du substrat au moment où la concentration des porteurs de charge augmente. L'augmentation de la pression d'oxygène des films SnO_2 déposés par PLD, provoque la diminution de la diffusion des porteurs à travers les joints de grains et par conséquent, la mobilité et la conductivité (1,6-6) cm^2/Vs des films augmente. Les défauts de structure à la surface des grains est responsable de la baisse de la mobilité [25].

II .11 Modélisation des cellules photovoltaïques et les modèles

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

II .11.1 Modèle à sept paramètres (2M7P)

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives (voir figure II .12 suivant)

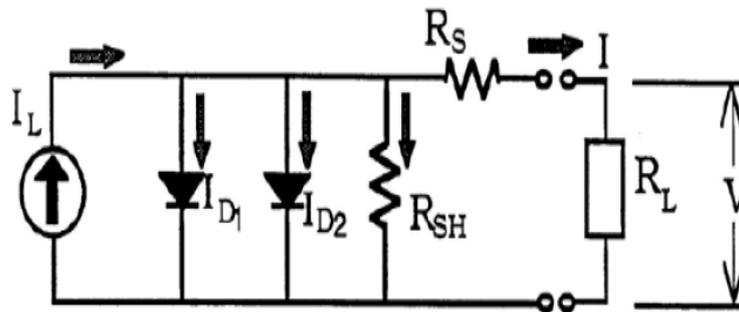


Figure II .12 Modèle à 7 paramètres

Les paramètres de ce circuit sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant inverse de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant inverse de saturation de la diode 2.

$Y1 = A1 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$Y2 = A2 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

$A1$ et $A2$: sont les facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2.

N_{CS} = Nombre des cellules en série.

R_S = la résistance série.

R_{SH} = la résistance shunt.

L'équation $I(V)$ caractéristique de ce circuit est :

$$I = I_1 - I_{D_1} - I_{D_2} - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad \text{II.7}$$

$$I_{D_1} = I_{01} \left(\exp\left(\frac{q}{Y_1 k T c} x (v + IR_s)\right) - 1 \right) \quad \text{II.8}$$

$$I_{D_2} = I_{02} \left(\exp\left(\frac{q}{Y_2 k T c} x (v + IR_s)\right) - 1 \right) \quad \text{II.9}$$

Remplaçant (II.9) et (II.8) dans (II.7) nous obtenons :

$$I = I_L - I_{01} \left(\exp\left(\frac{q(v+IR_s)}{Y_1 k T c}\right) - 1 \right) \quad \text{II.10}$$

II .11.2 Modèle a six paramètres (6P)

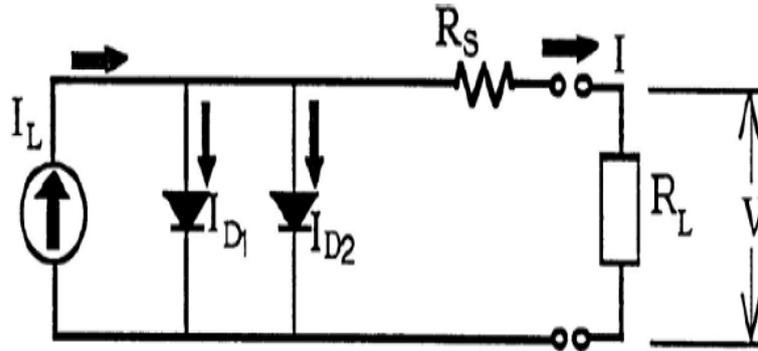


Figure II .13 Modèle a six paramètres

Les six paramètres de ce circuit sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant de saturation de la diode 2.

$Y_1 = A_1 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$Y_2 = A_2 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

N_{CS} = Nombre des cellules en série.

R_s = la résistance série.

Les relations courant-tension pour ce circuit sont les suivant:

$$I = I_L - I_{D_1} - I_{D_2} \quad \text{II.11}$$

$$I_{D_1} = I_{01} \left(\exp\left(\frac{q}{Y_1 k T c} x (v + IR_s)\right) - 1 \right) \quad \text{II.12}$$

$$I_{D_2} = I_{02} \left(\exp\left(\frac{q}{Y_2 k T c} x (v + IR_s)\right) - 1 \right) \quad \text{II.13}$$

Remplaçant (II.12) et (II.13) dans (II.11) nous obtenons :

$$I = I_L - I_{01} \left(\exp\left(\frac{q(v+IR_s)}{Y_1 k T c}\right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp\left(\frac{q(v+IR_s)}{Y_2 k T c}\right) - 1 \right) \quad \text{II.14}$$

II .11.3 Modèle a cinq paramètres (5P)

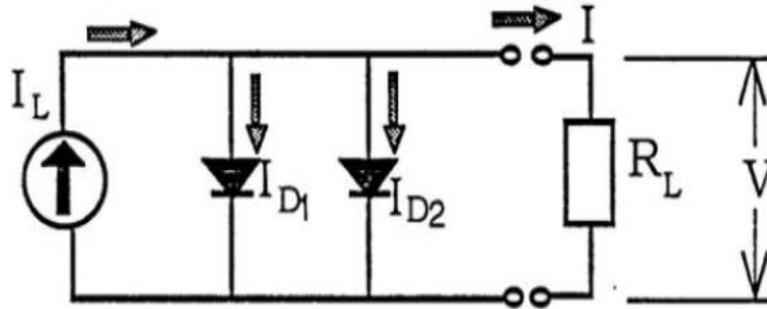


Figure II .14 Modèle à 5 paramètres

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit de modèle à six paramètres représenté sur la figure II .14. Cette simplification se traduit à supposer que la résistance série est négligeable. Avec une résistance ne série nulle, le circuit équivalent sera représentée comme suit (figure II .14)

Les cinq paramètres de ce modèle sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant de saturation de la diode 2.

$Y_1 = A_1 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$Y_2 = A_2 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

N_{CS} = Nombre des cellules en série.

L'équation générale de ce modèle est :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad \text{II.15}$$

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp\left(\frac{qV}{Y_1 k T_c}\right) - 1 \right) \quad \text{II.16}$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp\left(\frac{qV}{Y_2 k T_c}\right) - 1 \right) \quad \text{II.17}$$

Remplaçant (II.16) et (II.17) dans (II.15) nous obtenons :

$$I = I_L - I_{01} \left(\exp\left(\frac{qV}{Y_1 k T_c}\right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp\left(\frac{qV}{Y_2 k T_c}\right) - 1 \right) \quad \text{II.18}$$

II .11.4 Modèle a quatre paramètres (4P)

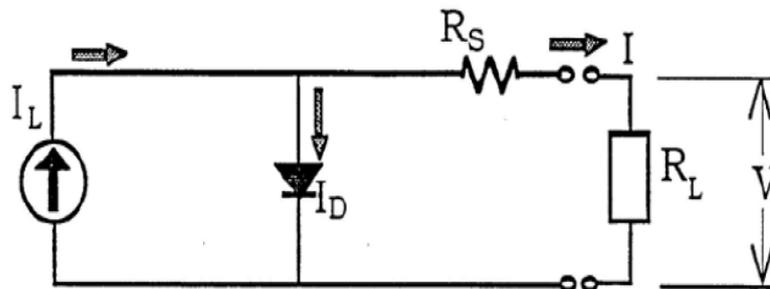


Figure II .15 Modèle a 4 paramètres

Les quatre paramètres de ce modèle sont :

I_L = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

Y = facteur de qualité

R_s =la résistance séries

Les différentes équations décrivant ce modèle seront détaillées par la suite.

II .11.5 Modèle a trois paramètres (3P)

Si on suppose que la résistance série est nulle (comme pour le circuit à cinq paramètres) le circuit à 4 paramètres se réduit à un circuit à trois paramètres représenté par la figure (1.9.5). Ce circuit équivalent est considéré comme idéal.

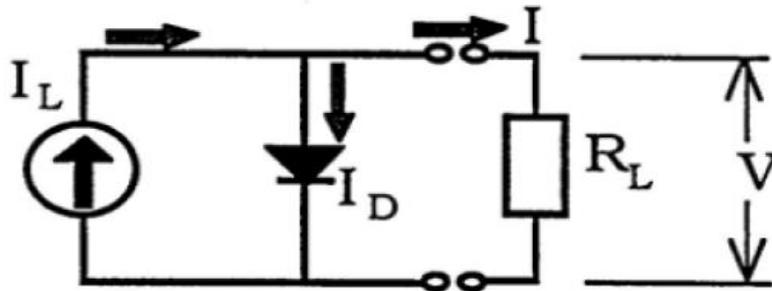


Figure II .16 Modèle a 3 paramètres

Les trois paramètres de ce circuit sont :

I_L = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

Y = facteur de qualité

Les relations courant-tension de ce circuit sont :

$$I = I_L - I_D \quad \text{II.19}$$

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{YkTc} - 1\right) \right) \quad \text{II.20}$$

Si on remplace (II.20) dans (II.19) on obtient :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{YkTc} - 1\right) \right) \quad \text{II.21}$$

II .12 Conclusion

L'électricité photovoltaïque est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules PV. Dans ce chapitre Nous avons présenté le silicium cristallin comme matériau de base dans la technologie photovoltaïque et la fabrication des cellules solaires en silicium.

Et dans le chapitre suivant on doit utiliser le logiciel de simulation PC1D qui permet le calcul des paramètres électriques de la cellule solaire.

CHAPITRE III : Résultats et
CHAPITRE III : Results et
discussion
discussion

Introduction

Les performances d'une cellule solaire photovoltaïque proviennent de l'optimisation de toutes les couches (*layers*) formant la cellule.

La recherche des paramètres optimaux pour les deux cellules proposés dans les différentes régions offrant les meilleurs rendements fait l'objet de cette étude. Dans le monde de la simulation et la caractérisation des dispositifs optoélectroniques en particulier les cellules photovoltaïques, il existe plusieurs environnements et outils de simulation comme le *Synopsys*, *Silvaco*, *Scaps*, *AMPS-1D* et le *PC1D*.

On a choisi de travailler avec le simulateur *PC1D* car il est très facile, rapide et utile pour les structures simples non complexes.

A partir des caractéristiques (courant-tension) fournies par le *PC1D*, on peut déterminer les valeurs des facteurs caractérisant les cellules, tels que le courant I_{CC} , la tension V_{CO} , le rendement η , et le facteur de forme FF [1].

Le simulateur PC1D

Le *PC1D* (personnel computer one-dimensionnel) est l'un des programmes qui a été élaboré pour modéliser et exploiter les composants semi-conducteurs, notamment les cellules photovoltaïques. A l'aide du *PC1D*, la compréhension des cellules solaires et leurs phénomènes physiques internes tels que le mouvement des porteurs minoritaires la recombinaison et la photo génération, devient aisée [2].

Le programme *PC1D* a été élaboré par Paul A. *Basare* durant ses travaux de recherche à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa, et fut rendu public, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18^{ème} conférence sur le photovoltaïque IEEE PVSC (décembre 1985).

Le programme *PC1D* fournit des résultats sous forme d'affichages graphiques montrant des valeurs physiquement significatives tel que : Courbes courant-tension I-V : En polarisation directe de l'échantillon, les courbes I-V permettent de déterminer le courant de saturation le facteur de qualité et la résistance en série.

Aux fort courants, on a l'influence de la résistance de la résistance série de la structure qui se traduit par une courbure de la caractéristique $h(I)=f(V)$. L'effet de la résistance série est important, elle provoque un courant direct opposé à la photo courant engendrant une baisse du rendement. L'exploitation de la partie linéaire de la courbe $\ln(I)=f(V)$ donne la valeur du facteur de la qualité de la structure. Ce facteur traduit l'écart par rapport à une diode, ou la conduction se fait uniquement par

Chapitre III : Résultats et discussion

diffusion, il traduit aussi l'existence des défauts cristallographiques. Le rendement quantique interne IQE (λ) : Le rendement quantique interne représente le rapport entre le nombre de porteurs collectés et le nombre de photons traversant la surface du dispositif.

Ce rendement est calculé numériquement par le logiciel PC1D en fonction de la longueur d'onde.

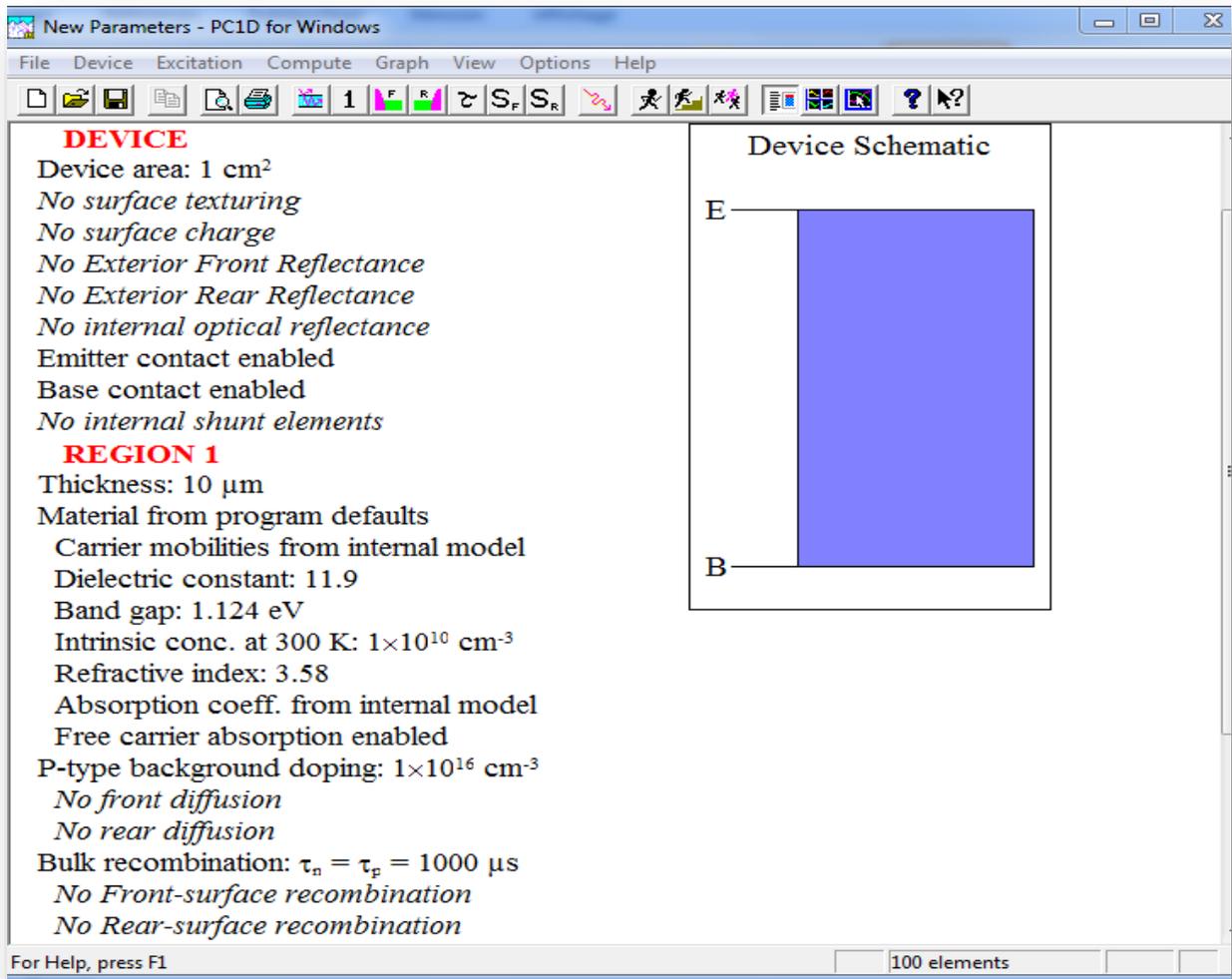


Figure.III.1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

A. Paramètres de la partie liée au dispositif (*Device*)

Cette partie renferme les paramètres essentiels du dispositif. On trouve :

- Aire du dispositif : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photo-courant d'une manière appréciable. Dans notre simulation nous avons choisi une surface de 01 cm².
- Texture en surface : une surface texturée est composée de micro pyramides dont les bases sont enracinées en profondeur avec un certain angle facial. La texturisation des surfaces donne lieu à une diminution importante des pertes du rayonnement incident par réflexion.

Chapitre III : Résultats et discussion

- Charges électriques en surfaces avant et arrière : les deux faces du dispositif sont considérées comme neutres, c.à.d. qu'il n'y a pas de barrière de potentielle aux surfaces.
- Réflectance optique interne : elle traduit les réflexions dites diffuse ou spéculaire du flux lumineux sur les surfaces avant et arrière du dispositif.
- L'effet des éléments qui peuvent court-circuiter le dispositif. Ils sont généralement liés aux impuretés métalliques qui peuvent se diffuser en volume du dispositif lors de son élaboration.

B. Paramètres de la région 1 et région 2

- C'est dans cette partie qu'on introduit les paramètres relatifs à la cellule solaire (type de matériaux utilisés, l'épaisseur, le dopage...etc.). On cite de part et d'autre :
- L'épaisseur de la cellule solaire : on y trouve les épaisseurs de la base et de l'émetteur. Ce dernier est considéré mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur une dizaine de micromètres.
- Le matériau utilisé pour former la cellule : des fichiers d'extension (*.mat) servent à stocker des paramètres du matériau tels que la mobilité, la constante diélectrique, l'énergie du gap (eV), la concentration intrinsèque (cm^{-3}), l'indice de réfraction, le profil, le type et la concentration du dopage.
- Les recombinaisons des porteurs de charge en volume, en faces avant et arrière de la cellule solaire.

C. Paramètres de la partie excitation

Cette partie renferme des fichiers qui rentrent dans la simulation de la caractéristique courant-tension (I-V) et autres caractéristiques comme la réponse spectrale. On y trouve également trois modes d'excitation à savoir l'excitation en mode équilibre et celles en modes transitoire et stationnaire. Aussi, la température T du milieu ambiant est arborée.

D. Partie résultats :

Cette partie permet de visualiser des courbes comme celle du courant-tension (I-V) et d'extraire les valeurs des grandeurs photovoltaïques comme le courant de court-circuit I_{CC} et celle de la tension en circuit ouvert V_{CO} .

III.3 Résultats de simulation

III.3.1 Influence de l'épaisseur de base sur la tension, la puissance et le courant

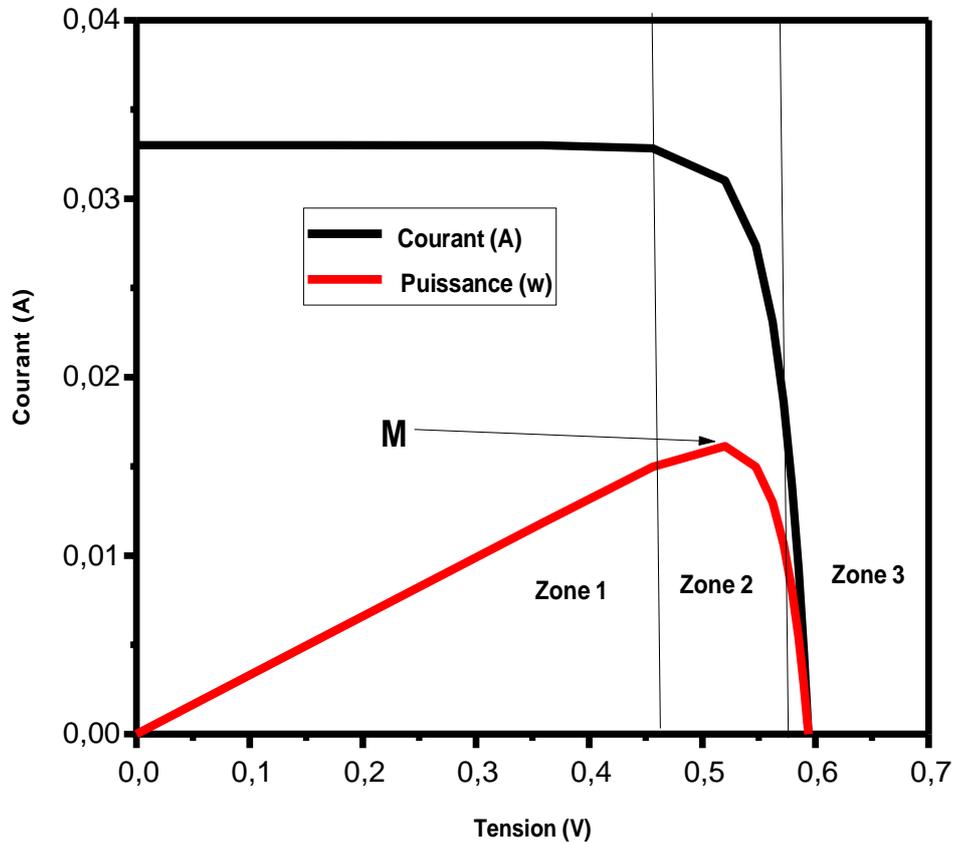


Figure.III.2 Caractéristique I(V) et puissance de la cellule avec texturation.

La courbe I-V de la figure. III.2 peut être décomposée en 3 zones :

- Zone 1 : le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- Zone 2 : elle correspond au coude de la caractéristique. Elle est la région intermédiaire entre les zones 1 et 3. Elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- Zone 3 : elle se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilé à un générateur de tension.

Chapitre III : Résultats et discussion

Pour La courbe P (V) on constate que la puissance augmente jusqu'à à un point maximal puis démunie. Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

Facteur de forme FF et rendement en puissance :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée par la cellule

$P = V.I$ et la puissance du rayonnement solaire incident P_0 .

On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale $P_{max} = V_m I_m$

Et la puissance P_0 : $\eta_m = \frac{V_m I_m}{P_0}$

La valeur de P_0 est de 0.1W par cm^2 de surface de la cellule

Le facteur de forme FF traduit l'effet de la forme de la courbe de la caractéristique I(V) sur le

Rendement de la cellule, plus la courbe est proche du rectangle, plus FF est proche de 1.

FF est donné par la relation

$$FF = \frac{P_{max}}{P_1} = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{co}} \quad (III.1)$$

Ce qui donne

$$\eta_m = \frac{V_m I_m}{P_0} = FF \frac{V_{co} I_{co}}{V_m I_m} \quad (III.2)$$

Où :

I_{cc} : Courant court-circuit

P_{max} : Puissance maximal

FF : Facteur de forme

η_m : rendement

Tableau III.1. Comparaison cellule avec texturation et sans texturation

	Résultat (avec texturation)	Résultat (sans texturation)
Courant court-circuit I_{cc} (A)	-0.0330	-0.0323
Puissance max P_{max} (w)	0.0161 watts	0.0159
Tension circuit-ouvert V_{co} (V)	0.5938 volts	0.5961
Facteur de forme (FF)	0.8217	0.8258
Rendement η (%)	16.1	15.9

Chapitre III : Résultats et discussion

On remarque une légère amélioration du rendement maximale pour une cellule de 1 cm^2 qui peut-être plus grande si on augmente la surface. La face avant (face éclairée) est texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule.

Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement quantique interne (RQI)

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique, nous avons de même varié cette dernière entre $[0.1-0.5] \mu\text{m}$ en fixant les autres paramètres.

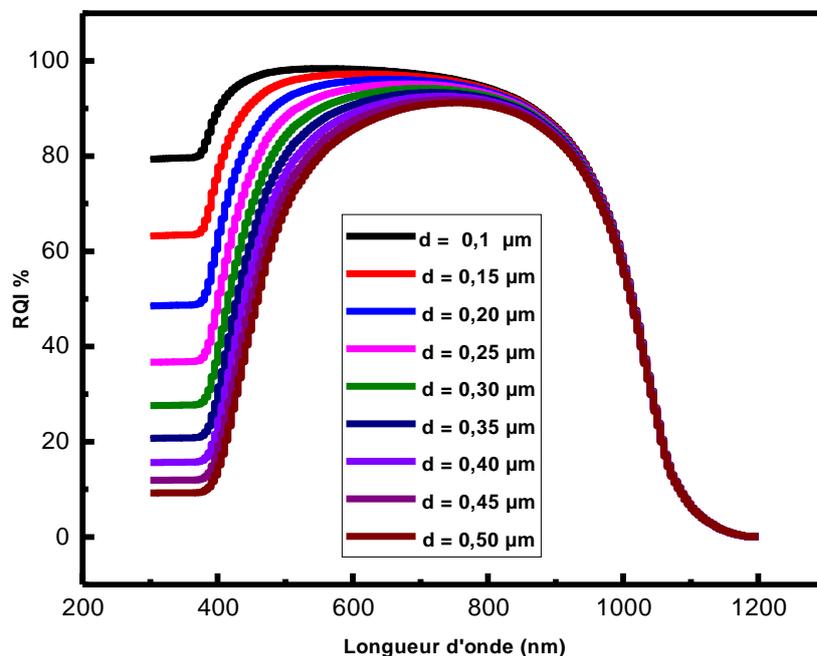


Figure.III.3 Variation du rendement quantique interne en fonction de l'épaisseur

La figure.III.3 montre la variation du rendement quantique interne en fonction de l'épaisseur.

On remarque que le rendement obtenu pour une épaisseur de $0.1 \mu\text{m}$ est plus grand que pour l'épaisseur de $0.5 \mu\text{m}$ par exemple et les autres. Donc, les couches à très faible épaisseur sont les plus intéressantes et les plus attrayantes.

Ce résultat est expliqué par la diminution du nombre de porteurs photo-générés et l'augmentation du risque de recombinaison face arrière.

Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement quantique externe (RQE) :

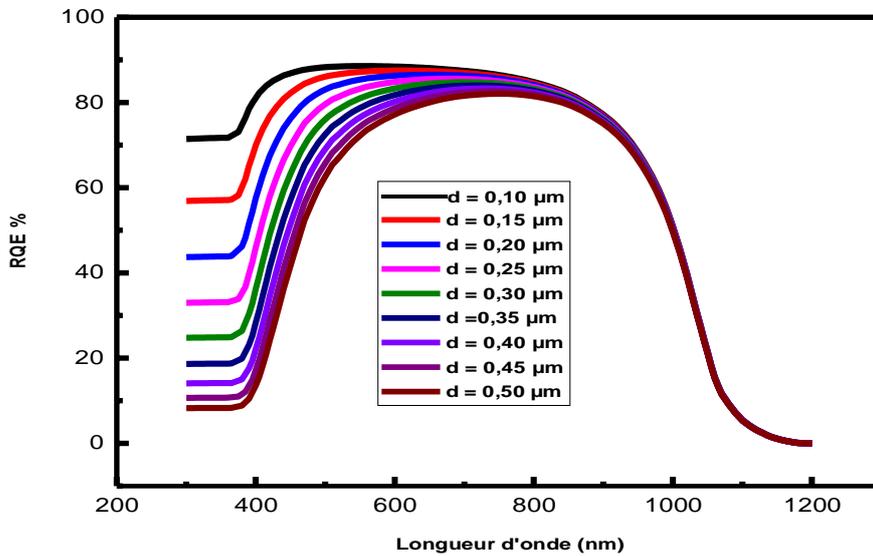


Figure.III.4 Variation du rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur

La figure.III.4 montre la variation du rendement quantique externe en fonction de l'épaisseur.

Les meilleures valeurs du rendement électrique sont obtenues dans le sens décroissant de l'épaisseur : une épaisseur de $0.1 \mu m$ donne un rendement maximal de, ce qui implique l'importance de ce dernier facteur dans l'absorption des photons.

Influence de la variation de dopage sur le rendement quantique externe (RQE) et interne (RQI)

Nous avons ensuite varié le dopage de l'émetteur en fixant les autres paramètres pour analyser l'influence de ce dernier sur le rendement électrique (voir Figure.III.4 et Figure.III.5)

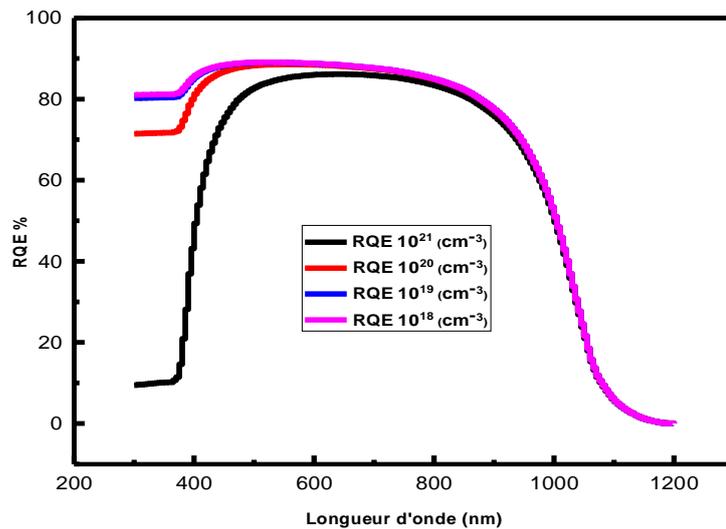


Figure.III.5 la variation de dopage sur le rendement quantique externe (RQE)

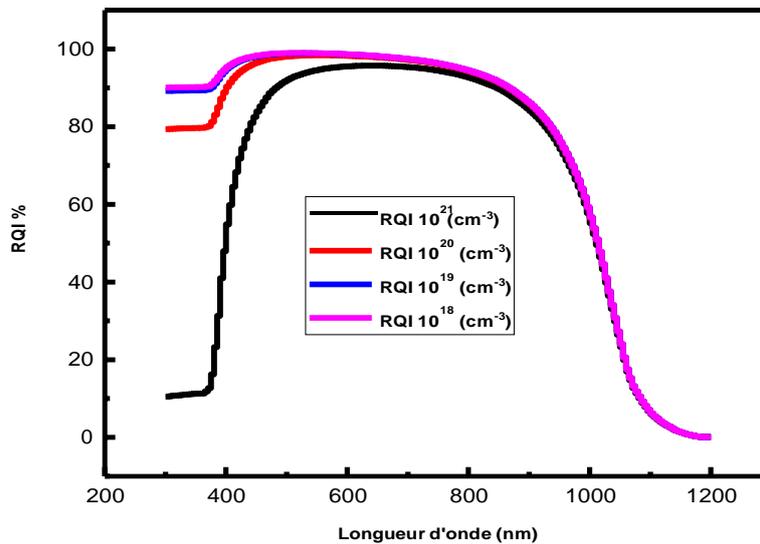


Figure.III.6 la variation de dopage sur le rendement quantique interne (RQI)

La figure.III.5 et la figure.III.6 montrent la variation de dopage sur le rendement quantique externe (RQE) et le rendement quantique interne (RQI)

Chapitre III : Résultats et discussion

Les meilleurs rendements sont obtenus pour des émetteurs à faible dopage.

Donc nous avons un dopage de 1.10^{18} donne un rendement maximal que les autres dopages.

Ce résultat peut être expliqué par la diminution de la zone de charge d'espace ZCE due à l'augmentation du dopage de la base (NAB), ce qui induit une diminution du photo courant de génération dans la ZCE et celle du photo courant de diffusion des électrons dans le volume suite à l'augmentation du risque de recombinaison dans la base.

Cellule de type $\text{SnO}_2\text{-Si (N}^+\text{) -Si(P)}$

Caractéristique courant-tension de la cellule solaire

La caractéristique I-V de la cellule solaire $\text{SnO}_2\text{-Si (N}^+\text{) -Si(P)}$ simulée sous PC1D (voir la figure III.7).

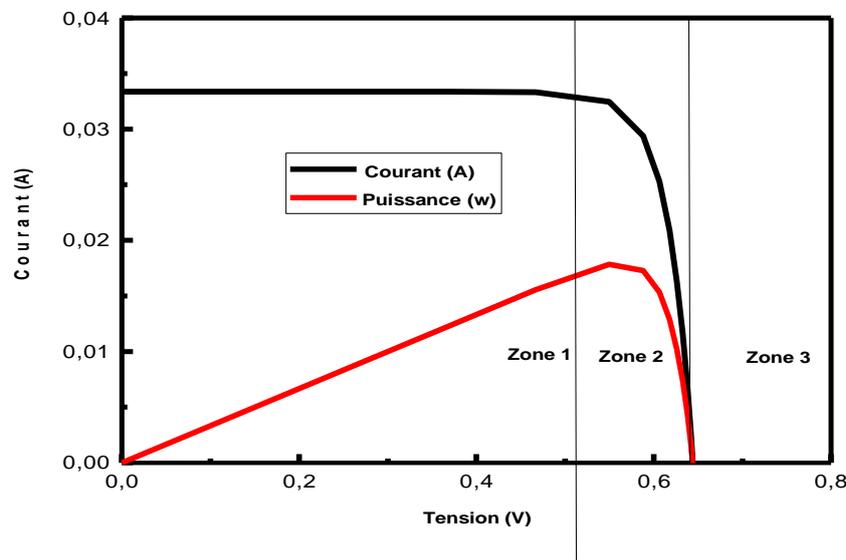


Figure.III.7 : La caractéristique $I(V)$ de $\text{SnO}_2\text{-Si (N}^+\text{) -Si(P)}$ sous PC1D.

La courbe I-V de la figure. III.7 peut être aussi décomposée en 3 zones :

- Zone 1 : le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- Zone 2 : elle correspond au coude de la caractéristique. Elle est la région intermédiaire entre les zones 1 et 3. Elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- Zone 3 : elle se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilé à un générateur de tension.

Pour La courbe P (V) on constate que la puissance augmente jusqu'à à un point maximal 0.01785 w puis démunie.

Simulation cellule solaire SnO₂-Si (N⁺)-Si(P) par PC1D :

Effet de l'épaisseur de la CAR sur le rendement :

✚ Effet sur le rendement quantique interne (RQI)

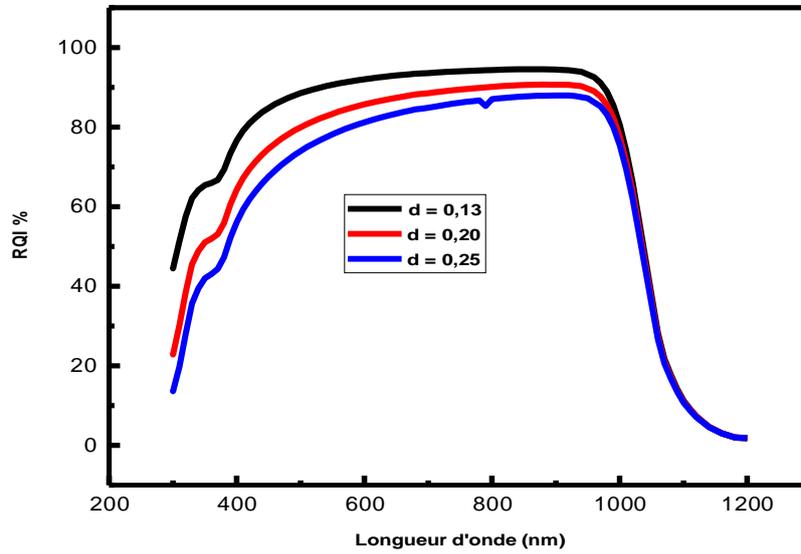


Figure III.8 : variation du rendement quantique interne en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs d'épaisseur de la CAR.

✚ Effet sur le rendement quantique externe (RQE)

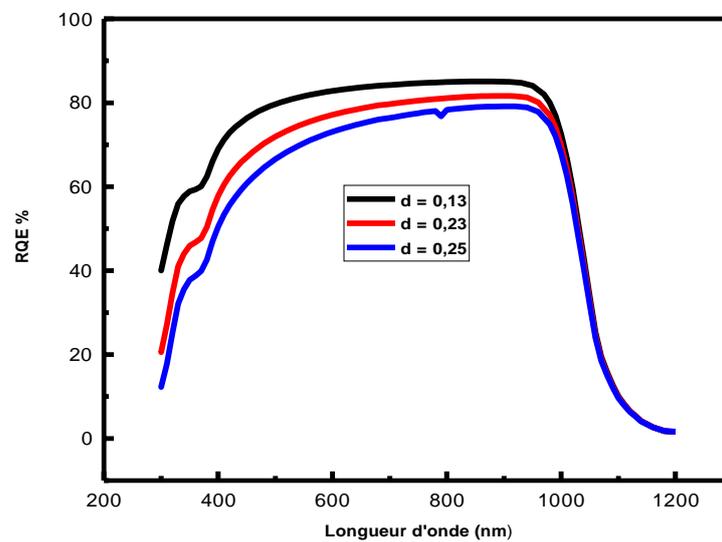


Figure III.9 : variation du rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs d'épaisseur de la CAR.

Chapitre III : Résultats et discussion

On a fait varier l'épaisseur de la couche de SnO₂ pour différentes valeurs. On observe que le rendement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur (voir figure III.8 et figure III.9). Cette diminution peut être expliquée par la diminution de la transparence suite à l'augmentation de l'absorption de la CAR [3].

Effet de la réflexion

Nous avons simulé l'effet de la réflexion sur le RQE, le résultat est tracé sur les deux figures suivantes :

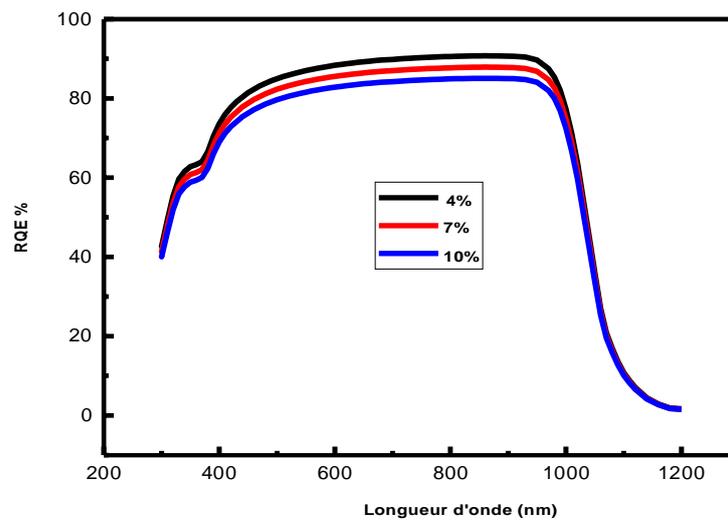


Figure III.10 : variation du rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de réflexion.

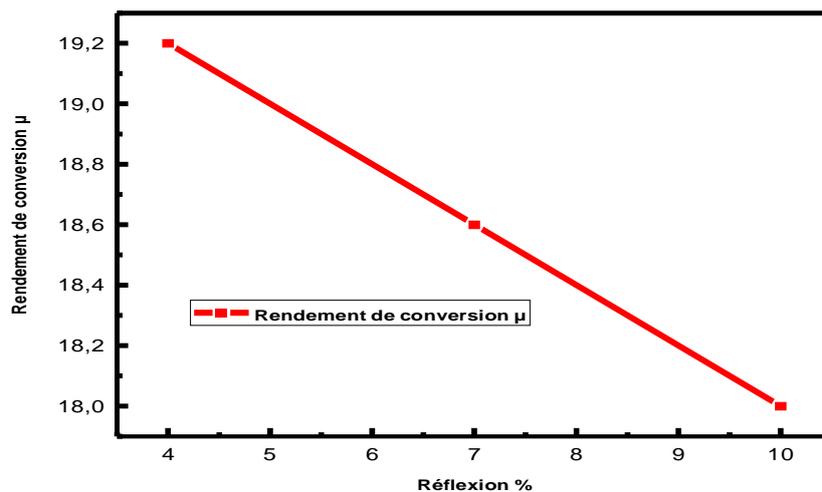


Figure III.11 : variation du rendement en fonction de la réflexion.

Chapitre III : Résultats et discussion

On remarque une amélioration est observée lorsque la réflectivité diminue.

En augmentant de plus en plus la réflexion, le rendement de conversion de la cellule diminue à cause de la réduction du nombre de photons absorbés par la cellule solaire et par conséquent du photocourant résultant.

III.4.3 Simulation cellule solaire SnO₂-Si (N⁺)-Si(P) et cellule Si(N⁺)-Si(P) simulée sous PC1D

La valeur de P₀ est de 0.1W par cm² de surface de la cellule, on calcule le rendement et le facteur de forme suite à la relation 1 et 2 est on trouve :

Tableau III.2. Comparaison entre cellule SnO₂-Si (N⁺)-Si(P) avec couche antireflet et la cellule avec (et sans) texturation Si (N⁺)-Si(P)

Résultat	(SnO ₂ – Si(N ⁺) – Si(P))	(Si (N ⁺)-Si(P)) sans texturation	(Si (N ⁺)-Si(P)) avec texturation
Courant court-circuit I _{cc} (A)	-0.0334	0.0325	-0.0333
Puissance max (w)	0.0180	0.0161	0.0164
Tension circuit-ouvert V _{co} (V)	0.6439 volts	0.5981	0.5968
Facteur de forme (FF)	0.8217	0.8282	0.8252
Rendement η (%)	18	16.1	16.4

Ces résultats montrent que la cellule SnO₂-Si (N⁺)-Si(P) avec couche antireflet (18.0%) à un bon rendement que la cellule avec texturation Si (N⁺)-Si(P) (16.4%) et la cellule sans texturation (16.1%)

Conclusion

Nous avons calculé les différents paramètres caractérisant une cellule solaire tels que le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, la puissance maximale et le rendement. Nous avons étudié aussi l'influence des paramètres de la cellule sur les résultats de simulation

Les résultats de simulation des trois cellules : cellule SnO₂-Si (N⁺)-Si(P) avec couche antireflet, cellule avec texturation Si (N⁺)-Si(P) et la cellule sans texturation Si (N⁺)-Si(P) montrent que

Chapitre III : Résultats et discussion

l'utilisation de SnO₂ comme couche antireflet à la surface de la cellule solaire à homo-jonction améliore considérablement le rendement de conversion

Donc ces paramètres ont un rôle fondamental sur les performances de la cellule.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Dans ce présent travail, notre étude s'est basée sur la simulation à l'aide du logiciel PC1D d'une cellule solaire de type $\text{SnO}_2(\text{N})/\text{Si}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$ où le SnO_2 a été utilisé comme couche antireflet.

Dans la première partie de cette étude, une optimisation des paramètres technologiques et géométriques de la cellule à homojonction $\text{Si}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$ a été faite et a permis de déterminer les valeurs optimales de ces paramètres à savoir : le dopage et l'épaisseur du substrat.

Dans une deuxième partie nous avons rajouté une couche antireflet $\text{SnO}_2(\text{N})$. Dans le but de mettre en évidence l'importance d'une CAR sur la cellule solaire au silicium, nous avons étudié les effets des paramètres tels que : l'épaisseur, le dopage....etc.

Les résultats de simulation des trois cellules montrent que l'utilisation de SnO_2 comme couche antireflet à la surface de la cellule solaire à homo-jonction améliore considérablement le rendement de conversion de 16.4% pour une cellule $\text{Si}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$ texturisée à 18.0% pour la même cellule avec CAR.

Bibliographie

Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

- [1] M^{elle} Kihal Imen, Etude et simulation des cellules solaires photovoltaïques à base de silicium, mémoire de master, Université de Jijel, 2020
- [2] S. Mohamed Ait-cheikh « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [3] Mr BOUGHANEM djamaia « Influence des propriétés du silicium amorphe hydrogéné sur la performance d'une Cellule solaire HIT » mémoire de master, Université de Mostaganem.
- [4]. Ministry of energy
<http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels>.
- [5]. Mr. Abderrazek Mahfoude « modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement », thèse de doctorat, université setif, 2015.
- [6]. Melle Arras Aida, Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si, mémoire de master, Université de Tlemcen. 2018
- [7] Handbook of Semiconductor Wafer Clinging Technology (Science, Technology, and Applications); Werner Kren; Noyes Publications; Westwood New Jersey, U.S. p
- [8] EPIA (European Photovoltaic Industry Association). Global market outlook for photovoltaics until 2013. Disponible sur <http://www.epia.org/publications/epiapublications.html>, 2009.
- [9] N. BANDADLA, optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires conventionnelles à base de mc_si, mémoire de magister, université de Tlemcen, 2012.

Bibliographie

- [10] K. Amara, Contribution à l'étude d'une conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, thèse de magister, université de Tizi-Ouzou, 2015
- [11] M. BELARBI, Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.
- [12] M. C. Abdelli, Etude des cellules photovoltaïques organiques, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013
- [13] M. Petibon Stéphane « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [14] F. NemmarBelhocine, Etude et réalisation de cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques, thèse de doctorat, université de Tizi-Ouzou.
- [15] M, BERREGUI Abdelfettah et ABSA Amjed Etude technicoéconomique d'une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla, mémoire de master, université de Ouargla, 2019

Bibliographie

Chapitre II : Réponse spectrale d'une cellule solaire

- [1] Ben machiche Samira : «ETUDE DES PARAMÉTRES LIMITANT LE RENDEMENT D'UNE PHOTOPILE A BASE D'UNE STRUCTURE MIS», Thèse de Magister, 2009, Université Hadj Lakhdar de Batna
- [2] Malika Madani : «REALISATION DES COUCHES ANTIREFLETS DANS LES CELLULES SOLAIRES A COUCHES MINCES», Thèse de Magister, 2006, Université Abou BekrBelkïd de Tlemcen.
- [3] 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
- [4] NichiporukOleksiy : «SIMULATION, FABRICATION ET ANALYSE DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A CONTACTS ARRIÈRES INTERDIGITÉS», Thèse de Doctorat, 2005, Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatique.
- [5] BenahmedBenabdallah 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 BekrBelkïd de Tlemcen
- [6] AdaikaMarwa : «ETUDE PAR SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'EFFET DES COUCHE SUR-DOÉES CÔTÉ CONTACTS AVENT ET ARRIERE SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE n /p EN SILICIUM», Thèse de Master, 2012, Université Mohammed Khiderde Biskra.

Bibliographie

- [7] Khadija Kouz, HindeCherkaouiDekkaki, Sarah Cherel, Bertrand Maljournal, Christine Leger, BendaoudAttaous, 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.
- [8] LouardiRemache: «SILICIUM POREUX PASSIVE PAR DES NITRURES ET DES OXYDES DE SILICIUM .APPLICATION AUX REVETEMENTS ANTIREFLECHISSANTS», Thèse de Doctorat, 2011, Université Mentouri de Constantine.
- [9] 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
- [10]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.
- [11] José Miguel Navarro : «CELLULES PHOTOVOLTAIQUES ORGANIQUES TRANSPARENTES DANS LE VISIBLE », Thèse de Doctorat, 2008, Université de Toulouse.
- [12] Hadjèr, H.: Caractérisation automatisée d'une cellule solaire, Mémoire de Master,
Université Med Khider Biskra (Algérie), 2014, pp 27-30.
- [13] Nichiporuk Oleksiy , Thèse de doctorat de L'INSA de Lyon, Simulation, fabrication et
analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, 2005.

Bibliographie

- [14] WaelHamd, Thèse de Doctorat, Université De Limoges(2009)
- [15] Suhua Luo, Jiyang Fan, Weili Liu, Miao Zhang, Zhitang Song, Chenglu Lin, Xinglong Wu and PaulK Chu, *Nanotechnology* 17(2006) 1695–1699
- [16] Mounir Gaidi, These de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble(1999)
- [17]. Yongsheng Zhang, KeYu, Guodong Li, Deyan Peng, Qiuxiang Zhang, Hongmei Hu, Feng Xu, Wei Bai, ShixiOuyang and Ziqiang Zhu, *Applied Surface Science*, volume 253, issu 2,(2006), 792-796
- [18] DainiusPerednis& Ludwig j. Gauckler, *Journal of Electroceramics*, 14(2005), 103–111
- [19] Abdul Faheem Khan, Mazhar Mehmood, Muhammad Aslam, Muhammad Ashraf, *Applied Surface Science* 256 (2010) 2252–2258
- [20] Jun Bo han, Hui Jun Zhou, QuQuan Wang, *Materials Letters* 60 (2006) 252 - 254
- [21] F.Kurdesau, G.Khripunou, A.F.Dacunha, M.Kaelin, .N.Tiwari, *journal of non crystalline solids* (2006) 1466-1470
- [22] J P Chatelon, C Terrier and J A Roger, *Semicond. Sci. Technol.* 14(1999) 642–647.
- [23] K.S.Shamala, L.C.Murthy and K.Narasimha Rao, *Bull Matter*, vol27 N°3 (2004) 295-301
- [24] T. Serin , N. Serin , S. Karadeniz , H. Sar , N. Tugluoglu , O. Pakma *Journal of Non-Crystalline Solids* 352 (2006) 209–215
- [25] I. Saadeddin, B. Pecquenard , J.P. Manaud , R. Decourt , C. Labrugere, T. Buffeteau, G. Campet, *Applied Surface Science* 253 (2007) 5240–5249

Bibliographie

Chapitre III : Résultats et discussion

- [1] Benaïcha Mouna, Etude des matériaux semi-conducteurs III-V application à la conversion photovoltaïque, MAGISTER EN PHYSIQUE, 2007.
- [2] Christine E. Richardson, Harry A. Atwater ; Device Modeling of Polycrystalline Thin Film Silicon Solar Cells Thomas J. Watson Laboratory of Applied Physics, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.
- [3] A.S. Gilmore, A. Al. Kaoud V. Kaydanow, and T. Trohno, "Mobility in SnO₂: F thin film polycrystalline films: Grain boundary effect and scattering in the grain bulk" Proc. spring. mat. Res. Soc. Symp, (2001).

المخلص

يركز عملنا على محاكاة نالث خالبا شمسية تعتمد على السيلينيون $\text{SnO}_2(\text{N}) / \text{Si}(\text{N}^+) / \text{Si}(\text{P})$ ، حيث نم اسخدام طبقة SnO_2 بؤدر اسخدام طبقة مضادة للنعكاس.

حساب الكفاءة، ماس كهربائبي، ولفطية الدائرة المفدوحة. نم

درسنا تأثير معلامات الخلوية على السبجابات الكهربائبية $I(V)$ والكمية لخالبا SnO_2 و $\text{Si}(\text{N}^+) / \text{Si}(\text{P})$ و $(\text{N}^+) / \text{SI}(\text{N}^+) / \text{Si}(\text{P})$.

أظهرت نتائج المحاكاة أن خلوية $\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^+)\text{-Si}(\text{P})$ ذات الطبوة المضادة للنعكاس تؤدي أداً أنضل من الخلوية ذات التركيب $\text{Si}(\text{N}^+)\text{-Si}(\text{P})$ والخلوية بدون نسبج.

الكلمات المفتاحية: الخالبا الضوئية، الخالبا الشمسية، الطبقة المضادة للنعكاس، PC1D.

Résumé

Notre travail porte sur la simulation des trois cellules solaire à base de silicium $\text{SnO}_2(\text{N})/\text{Si}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$, où la couche SnO_2 a été utilisé autant que couche antireflet.

Un calcul du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert.

Puis nous avons étudié l'influence des paramètres des cellules sur les réponses électriques $I(V)$ et quantiques des cellules $\text{Si}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$ et $\text{SnO}_2(\text{N}^+)/\text{SI}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$.

Les résultats de la simulation que montrent que la cellule $\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^+)\text{-Si}(\text{P})$ avec couche antireflet à un bon rendement que la cellule avec texturation $\text{Si}(\text{N}^+)\text{-Si}(\text{P})$ et la cellule sans texturation.

Mots clés : Photovoltaïque, cellules solaires, couche antireflet, PC1D.

Abstract

Our work focuses on the simulation of three solar cells based on silicon $\text{SnO}_2(\text{N})/\text{Si}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$, where the SnO_2 layer has been used as much as an antireflection layer. A calculation of efficiency, short circuit current and open circuit voltage. Then we studied the influence of cell parameters on the electrical $I(V)$ and quantum responses of $\text{Si}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$ and $\text{SnO}_2(\text{N}^+)/\text{SI}(\text{N}^+)/\text{Si}(\text{P})$ cells. The simulation results showed that the $\text{SnO}_2\text{-Si}(\text{N}^+)\text{-Si}(\text{P})$ cell with anti-reflective layer performs better than the cell with $\text{Si}(\text{N}^+)\text{-Si}(\text{P})$ texturing and the cell without texturing.

Keywords : Photovoltaic, solar cells, anti-reflective layer, PC1D.