

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK**

BEN YAHIA-JIJEL



**FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de Master
En Physique des matériaux**

Présenté par

KIHAL IMEN

Thème

***Etude et simulation des cellules solaires photovoltaïques
à base de silicium***

Soutenue le : 28/10/2020 devant le jury

Président : A. LAOUAR

MCA. Univ.de Jijel

Rapporteur : A. BERBADJ

MCB. Univ.de Jijel

Examineur : O. BOUDRIOUA

MCB. Univ.de Jijel

Année universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

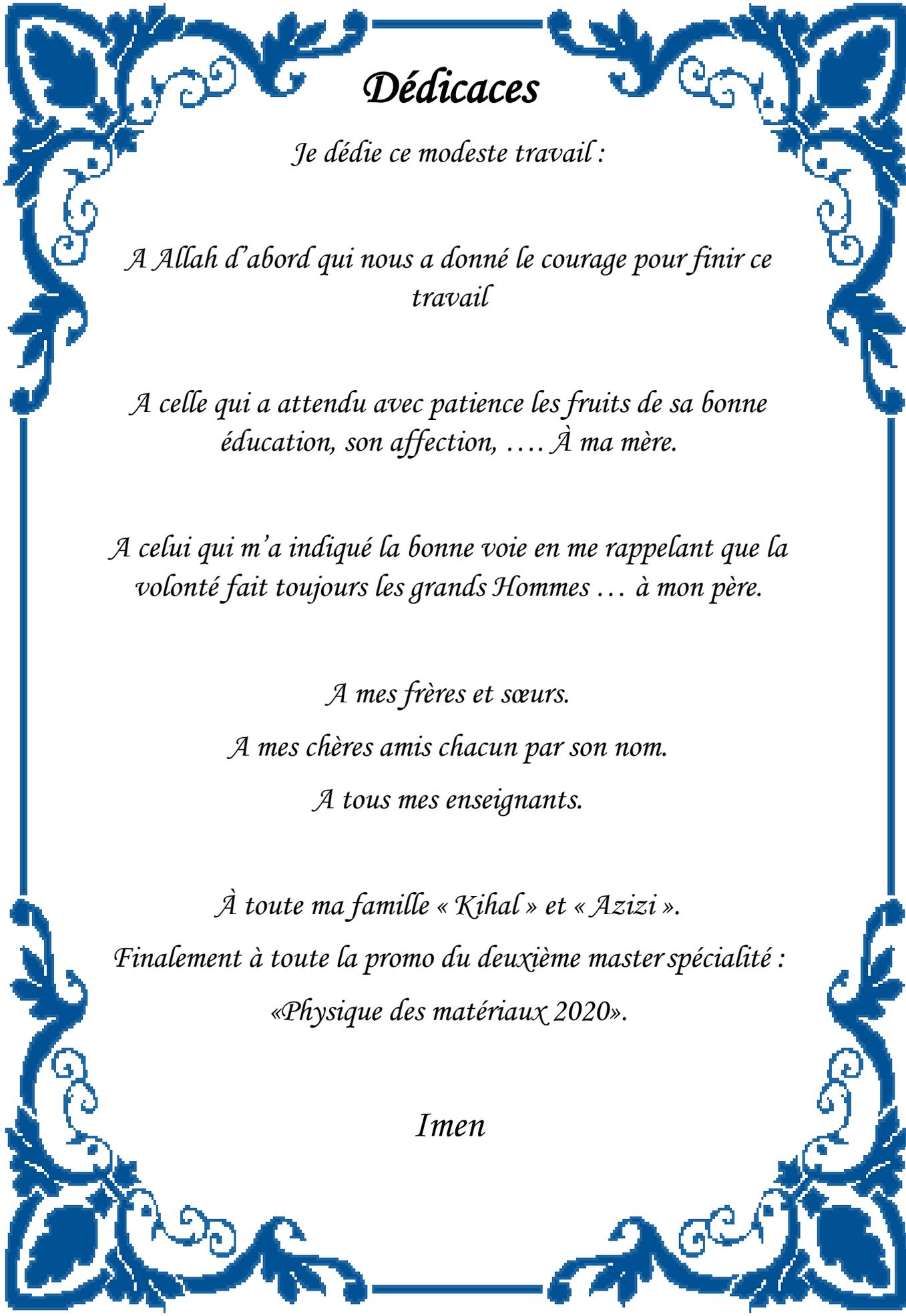
Nous sommes reconnaissants à ALLAH pour la bonne santé et le bien-être qui nous a aidés à compléter ce travail.

Nous remercions messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur Azzeddine Berbadj pour la qualité de son encadrement, son soutien, sa patience, ses conseils avisés, et ses directives précieuses pendant toute la durée de ce travail.

Nous sincères remerciements vont également à tous nos professeurs durant ces cinq années à l'université, pour leurs conseils, leur aide et leur soutien.

Enfin nous en profitons pour remercier tous nos collègues pour tout le plaisir que nous avons eu au cours des cinq dernières années.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

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

À celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, son affection, À ma mère.

À celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands Hommes ... à mon père.

À mes frères et sœurs.

À mes chères amis chacun par son nom.

À tous mes enseignants.

À toute ma famille « Kihal » et « Azizi ».

Enfin à toute la promo du deuxième master spécialité :

« Physique des matériaux 2020 ».

Imen

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Introduction Générale..... | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques | 3 |
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 Energie solaire | 3 |
| I.2.1 Spectre solaire..... | 3 |
| I.2.2 Types des rayonnements solaires..... | 4 |
| I.3 Energie photovoltaïque | 4 |
| I.3.1 Historique | 4 |
| I.3.2 Cellule photovoltaïque..... | 5 |
| I.3.3 Le Principe de fonctionnement d'une cellule solaire..... | 6 |
| I.4 Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque | 8 |
| I.5 Caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque | 8 |
| I.5.1 Courant de court-circuit I_{cc} | 9 |
| I.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co} | 9 |
| I.5.3 Facteur de forme (FF) | 9 |
| I.5.4 Le rendement η | 9 |
| I.6 Types des cellules photovoltaïques..... | 10 |
| I.6.1 Cellules cristallines | 10 |
| I.6.2 Cellules à base de couches minces | 11 |
| I.6.3 Cellules organiques | 11 |
| I.6.4 Cellules à haut rendement | 12 |
| I.6.5 Cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC)..... | 13 |
| I.7 Architectures d'une cellule photovoltaïque | 13 |
| I.7.1 Texturisation de la surface | 14 |
| I.7.2 La couche antireflet..... | 14 |
| I.7.3 Champ électrique dans la zone arrière (BSF) | 15 |
| I.7.4 Les Contacts face, avant et arrière | 15 |
| I.8 Influence de quelques paramètres extérieurs sur le rendement photovoltaïque | 15 |
| I.8.1 Influence de la température..... | 15 |
| I.8.2 Influence de l'éclairement..... | 16 |
| Chapitre II : Couche antireflet et hétérojonctions | 17 |
| II.1 Introduction | 17 |
| II.2 L'oxyde transparent conducteur (TCO) | 17 |

| | |
|--|----|
| II.2.1 Définition..... | 17 |
| II.3 Les propriétés des TCO | 17 |
| II.3.1 Les propriétés optiques | 18 |
| II.3.2 Les propriétés électriques | 20 |
| II.4 Applications des TCO | 20 |
| II.4.1 Cellules solaires..... | 21 |
| II.4.2 Couches protectrices ou intelligentes | 21 |
| II.5 Les TCO plus employés dans les cellules solaires | 22 |
| II.5.1 L'oxyde de Zinc (ZnO)..... | 22 |
| II.5.2 Le dioxyde d'étain (SnO ₂)..... | 22 |
| II.5.3 SnO ₂ dopé In (ITO) | 23 |
| II.5.4 SnO ₂ dopé F (FTO)..... | 23 |
| II.6 Les hétérojonctions..... | 23 |
| II.6.1 Cellule homojonction | 23 |
| II.6.2 Cellule hétérojonction..... | 23 |
| II.7 Contact métal/Semi-conducteur..... | 24 |
| II.7.1 Cas ou $\phi_m > \phi_s$ Semi-conducteur type n..... | 24 |
| II.7.2 Cas ou $\phi_m < \phi_s$ Semi-conducteur type p | 25 |
| II.8 Dynamique des photo-porteurs | 27 |
| II.8.1 La recombinaison volumique | 27 |
| II.8.2 La recombinaison de surface | 28 |
| II.9 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque du type Métal-Semi- conducteur | 29 |
| II.10 Cellule solaire hétérojonction type SnO ₂ /Si(P) | 29 |
| Chapitre III : Résultats et discussion..... | 31 |
| III.1 Introduction | 31 |
| III.2 Présentation du logiciel PC1D | 31 |
| III.3 La structure de la cellule solaire simulée | 32 |
| III.4 Paramètres de simulation | 33 |
| III.5 Résultats de simulation..... | 34 |
| III.5.1 Cellule de type Si (N ⁺)-Si(P)..... | 34 |
| III.5.1.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire..... | 34 |
| III.5.1.2 Influence des Paramètres sur les performances de cellule solaire..... | 35 |
| III.5.2 Cellule de type SnO ₂ -Si(P)..... | 38 |

| | |
|--|----|
| III.5.2.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire | 38 |
| III.5.2.2 Influence des Paramètres sur les performances de la cellule solaire..... | 38 |
| III.5.3 Cellule de type SnO ₂ -Si (N ⁺)-Si(P) | 44 |
| III.5.3.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire..... | 44 |
| III.5.3.2 Influence des Paramètres sur les performances de la cellule solaire..... | 45 |
| III.6 Comparaisons des résultats obtenus | 51 |
| Conclusion Générale | 53 |
| Références bibliographiques. | |
| Résumé. | |

Liste des symboles :

h → la constante de Planck = 6.62×10^{-34}

c → la célérité de la lumière

λ → longueur d'onde

I_{obs} → le courant sous obscurité

I_s → le courant de saturation de la diode

q → charge de l'électron = 1.6×10^{-19}

V → tension appliquée

K → constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23}

T → température absolu

n → le facteur d'idéalité de la diode

I_{ph} → photo-courant de la diode

R_s → résistance série

R_{sh} → résistance shunt (parallèle)

I_{cc} → courant de court-circuit

V_{co} → tension à circuit ouvert

FF → facteur de forme

P_{max} → puissance maximale

η → rendement de la cellule

$P_{incidente}$ → puissance incidente

I_{max} → courant maximal

V_{max} → tension maximale

d_{CAR} → épaisseur de la couche antireflet

n_{CAR} → indice de réfraction de la couche antireflet

T → transmission du film TCO

R → réflexion du film TCO

d → l'épaisseur du film considère

ω_p → fréquence de plasma

ϵ_∞ → la permittivité à haute fréquence

ϵ_0 → la permittivité du vide

τ → le temps moyen entre deux collisions

m^* → la masse effective

ρ → résistivité électrique

σ → conductivité électrique

e → épaisseur de la couche conductrice

μ → la mobilité des porteurs de charge

J → la densité de courant

α → coefficient d'absorption du film

Φ_B → travail de sortie du métal

χ_{SC} → affinité électronique du semi-conducteur

E_C → niveau d'énergie de la bande de conduction

E_{Fn} → niveau d'énergie du niveau de Fermi du semi-conducteur type n

E_{Fp} → niveau d'énergie du niveau de Fermi du semi-conducteur type p

Φ_{SC} → le travail de sortie du semi-conducteur

E_t → la position énergétique d'état de piège

n_i → la concentration intrinsèque

τ_p → la durée de vie pour les trous

τ_n → la durée de vie pour les électrons

J_s → le courant de saturation

Introduction
Générale

Les ressources en combustibles fossiles, qui sont à l'origine de l'augmentation de la température du globe, constituent aujourd'hui l'essentiel de la consommation d'énergie, s'épuiseront dans un avenir prévisible. C'est pourquoi il est nécessaire d'introduire dans le bilan énergétique de nouvelles sources d'énergie qui soient renouvelables.

Contrairement aux énergies dites de stock (provenant du pétrole, gaz, charbon..), les énergies renouvelables sont basées sur l'exploitation d'un flux (soleil, vent, eau) qui se renouvellent en permanence. Parmi celles-ci, l'énergie solaire qui met à la disposition de la terre un grand gisement énergétique par ce que, chaque an la terre reçoit du soleil plus de 14000 fois la production d'énergie annelle mondiale [1].L'exploitation de cette énergie renouvelable fait l'objet des milliers de travaux de recherche :

La recherche de nouvelles structures et de nouveaux matériaux dans la conception des cellules solaires, permet d'augmenter le rendement de conversion et de diminuer le prix de revient des cellules solaires.

Aussi, faut-il signaler que notre attention s'est accentuée sur l'utilisation des oxydes transparents conducteurs pour réaliser des cellules solaires à hétérojonction à partir d'un substrat de silicium. Ces cellules solaires constituent un moyen pour réduire le prix de l'électricité solaire à grande échelle, car elles présentent :

- Un cout de fabrication faible par rapport aux cellules solaires conventionnelles à homojonction PN.
- Une facilité de mise en œuvre des techniques utilisées pour leur fabrications, d'où l'avantage d'avoir un rendement photovoltaïque appréciable. Pour obtenir de bon rendement, il est très nécessaire d'optimiser tous les paramètres d'une structure de cellule solaire, tout en sachant que cette optimisation est due à une simulation numérique.

Notre étude s'est appuyée sur la simulation des cellules solaires à hétérojonction. L'objectif est de savoir le rôle du TCO dans l'amélioration du rendement des cellules solaires et l'influence de divers paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire.

Ce mémoire est composé de trois chapitres selon la structure suivante :

Dans le premier chapitre, on présentera les généralités sur les cellules solaires (le principe de fonctionnement, architecture d'une cellule, différents types de cellules photovoltaïques.....).

Dans le deuxième chapitre, on présentera un état de l'art des TCO, ainsi que l'étude des cellules solaires à hétérojonction. Dans un premier temps, une explication des propriétés de ces oxydes transparents est donnée avec une attention particulière portée sur les caractéristiques optiques et électriques et quelques applications des TCO. Puis, dans un deuxième temps, nous

présentons la physique de la structure métal/semi-conducteur (M-S) employée dans les cellules photovoltaïques.

Le troisième chapitre traite la simulation numérique de trois types de cellules solaires qui sont : (Si (N+)/Si(P)), (SnO₂/Si(P)) et (SnO₂ /Si (N +)/Si(P)), et ce, en utilisant le logiciel PC1D. Pour cela, il faudra modéliser la couche mince d'oxyde d'étain et traduire son comportement en tant que couche mince dégénérée et transparente, et ce, en introduisant tous les paramètres SnO₂ dans le logiciel PC1D, puis on discutera les résultats de la simulation.

Chapitre I
Généralités sur les
cellules solaires
photovoltaïques

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons les notions de base des cellules solaires, leur principe de fonctionnement, généralités sur l'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire, les différents types des cellules solaires et les caractéristiques des cellules photovoltaïques.

I.2 Energie solaire :

I.2.1 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 [2] [3].

Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes majoritairement comprises entre 0.2 μm et 3 μm . Hors atmosphère, le rayonnement émis par le soleil (AMO) est constitué de :

9% d'UV($0.1 < \lambda < 0.4 \mu m$).

43% de visible($0.4 < \lambda < 0.75 \mu m$).

48% d'infrarouges($0.75 < \lambda < 5 \mu m$).

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 (FigureI.1).

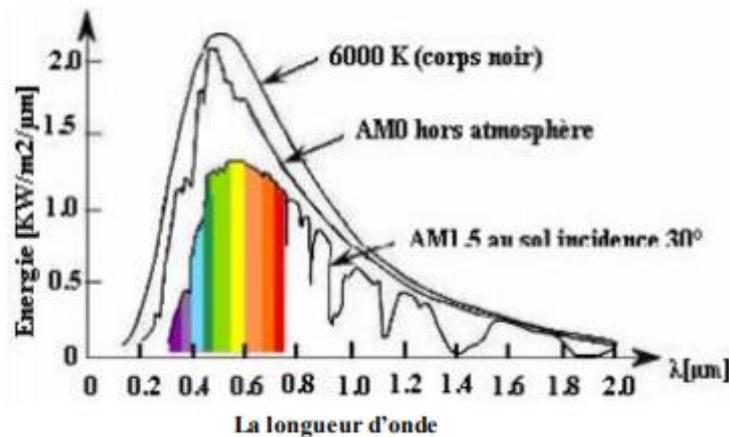


Figure. I.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [4].

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 290nm et 2770nm 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 $P \approx 1.36KW.m^{-2}$. 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°) $P \approx 1KW.m^2$ [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 *AM1.5* sous un éclairage de $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$.

I.2.2 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 :**

Il représente des rayons ultraviolets. Il est émis du soleil et arrive à la Terre directement. Il a une trajectoire linéaire Il est 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.

I.3 Energie photovoltaïque :

I.3.1 Historique :

L'énergie photovoltaïque est la conversion du rayonnement solaire en électricité. « Photovoltaïque » est un mot grec qui réunit photo qui veut dire lumière et volt qui est une unité qui mesure de la tension électrique et qui tient son nom du physicien Volta.

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a prouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière.

Par la suite, Albert Einstein à découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas un seul caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules (les photons). L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où h est la constante de Planck, c la célérité de la lumière et λ sa longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valu à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %. C'était en 1958 où le premier engin spatial alimenté par énergie photovoltaïque a été lancé dans l'espace. Jusqu'à maintenant, l'énergie solaire photovoltaïque est le seul type d'énergie d'alimentation des satellites [7].

Les Américains ont lancé en 1959 le satellite vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%.

La première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique. C'est en 1983 que la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt 4000 kilomètres en Australie. Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers. Les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 20% [8].

I.3.2 Cellule photovoltaïque :

C'est un composant électronique qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique c'est-à-dire il convertit le photon reçu en une tension électrique continue. Cela se fait à partir d'un processus nommé « effet photo-électrique ». Cette cellule est, généralement, faite de matériaux semi-conducteurs. Les cellules réunies forment le module ou le panneau photovoltaïque. Elle peut être conçue à base d'une homojonction ou d'une hétérojonction.

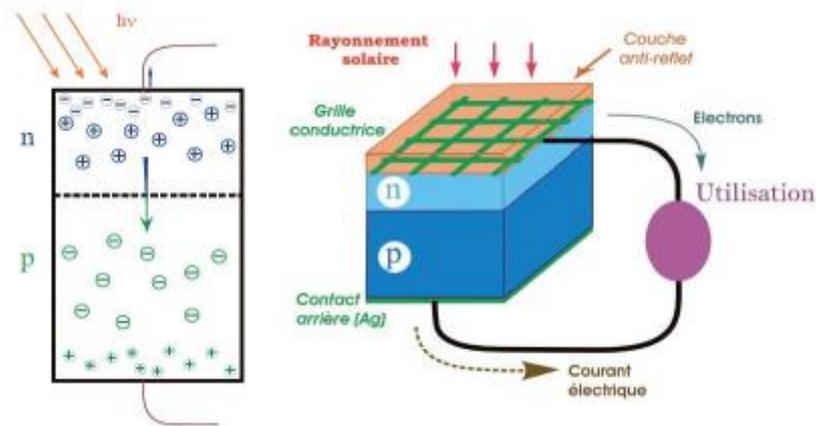


Figure. I. 2 : Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque [9].

I.3.3 Le Principe de fonctionnement d'une cellule solaire:

La cellule photovoltaïque absorbe des photons de la lumière incidente à l'aide du matériau semi-conducteur constitué d'une bande de conduction et d'une bande de valence qui, entre elles, se trouve la bande interdite (gap).

Si l'énergie de photon incident est supérieure à l'énergie de gap, alors il transmet son énergie à l'électron qui est à son tour transporté de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant un trou dans la bande de valence. Cette absorption du photon entraîne une création des paires électron-trous.

Si l'énergie du photon est insuffisante, alors il n'est pas absorbé et il traverse le matériau sans transmettre son énergie.

Après création de paires électron-trous, si les porteurs ne sont pas extraits d'une manière suffisamment rapide de part et d'autre de la cellule, alors il y aura une recombinaison entre l'électron et le trou.

Pour cela, on impose un champ électrique interne à la cellule pour séparer les porteurs et pour orienter des porteurs chargés positivement et négativement en sens inverse.

La création du champ électrique interne est due à l'utilisation d'une jonction P/N constituée de deux matériaux semi-conducteurs dopés respectivement, positivement et négativement.

Lors du contact des deux semi-conducteurs il apparait trois régions :

Région dopée N, région dopé P, région interface des deux autres. Dans cette dernière il y a diffusion des porteurs libres majoritaires et recombinaison entre eux. Cette zone est appelée la zone de déplétion (zone de charge d'espace ZCE). Les charges portées par les atomes dopés qui ne sont plus à proximité d'un porteur libre de charges opposées, sont responsables de la formation d'un champ électrique. Ce dernier est à la base de la séparation des paires électron-trous photo

générées, bien sûr sous illumination, et à l'attraction des électrons dans le matériau dopé N et les trous dans celle dopé P, Tout cela fait naitre un photo courant.

La conversion photovoltaïque dans une cellule solaire repose sur :

- L'absorption de la lumière et la génération des paires électron-trous.
- La diffusion et la séparation des pairs électron-trous créés par photons.
- La collecte des charges : les pairs électro-trous se font retourner par voie d'un champ électrique de la jonction vers les régions où elles seront majoritaires (Figure.I.3) c.-à-d. les électrons vers l'émetteur (région type N) et les trous vers la base (région type P).

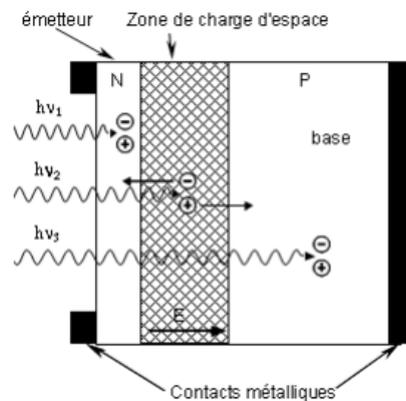


Figure.I.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [10].

La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction PN, le courant sous obscurité dans telle structure est donné par la formule suivante [11] :

$$I_{obs} = I_s \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] \quad (I.2)$$

I_{obs} : le courant sous obscurité.

I_s : le courant de saturation de la diode.

q : charge de l'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19} C$);

V : tension appliquée.

K : constante de Boltzmann ($K = 1.38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$);

T : température absolu en Kelvin.

Le coefficient « n » est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égale à 1 si la diode est idéale, et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison) [12].

Et sous éclaircissement le courant est donné par la formule :

$$I = I_{obs} - I_{ph} = I_s \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] - I_{ph} \quad (I.3)$$

I_{ph} : photocourant de la diode.

I.4 Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque:

La modélisation électrique de la cellule photovoltaïque tient compte des différents paramètres :

- **Le générateur de courant** : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.
- **La résistance série R_s** : elle prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de silicium.
- **La résistance shunt R_p** : elle représente la résistance shunt qui modélise les fuites par l’effet de bord autour de la cellule solaire ; connue aussi sous le nom de résistance de court-circuit [13].
- **La diode d_1** : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l’émetteur.
- **La diode d_2** : modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d’espace.

n : facteur d’idéalité; il dépend des propriétés physiques et technologiques de la cellule.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donné par la relation :

$$I = I_{s1} \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] + I_{s2} \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] + \frac{V-IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (I.4)$$

Le schéma équivalent de la cellule solaire est le modèle représenté à la Figure.I.4 suivante :

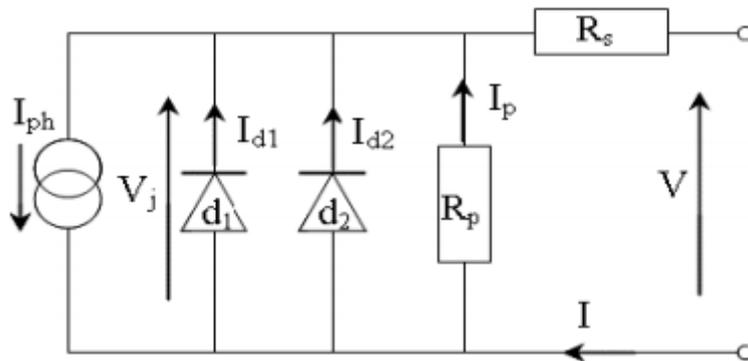


Figure. I.4 : Modélisation électrique d’une cellule photovoltaïque [11].

I.5 Caractéristiques d’une cellule solaire photovoltaïque:

Les paramètres d’une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension (I-V) (Figure.I.5) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

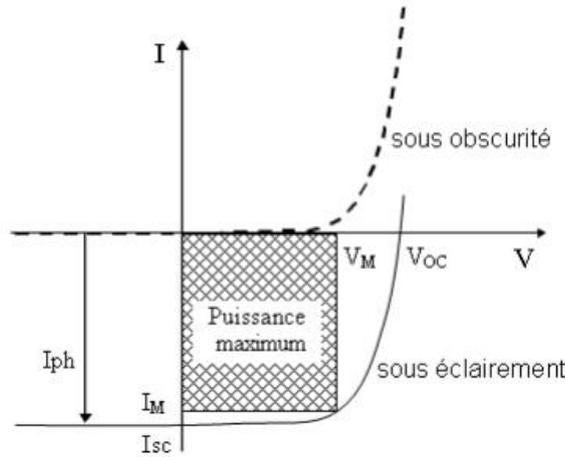


Figure. 1.5 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire sous obscurité éclairément.

I.5.1 Courant de court-circuit I_{cc} : Le courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au courant produit à tension nulle $V = 0$. Le courant est d'autant plus élevé que l'absorption de la cellule est grande et que les recombinaisons sont faibles.

I.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co} : La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de la cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairément de la cellule.

$$I = 0 \rightarrow I_s \left[e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] - I_{ph} = 0$$

V_{co} : est donné par :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad (I.5)$$

I.5.3 Facteur de forme (FF) : Le facteur de forme (FF) de la courbe I-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale. Il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante :

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

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

I.5.4 Le rendement η : Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule P_{max} et la puissance lumineuse incidente $P_{incidente}$ [14] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{co} I_{cc} FF}{P_{incidente}} \quad (I.7)$$

Aussi faut –il ajouter à paramètres un point important ou le courant et la tension atteignent le maximum qui se définit par :

la puissance maximale P_m : Soit P maximal, il faut être dans les conditions où le produit V I est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile.

$$P_{max} = V_{max}I_{max} \quad (I.8)$$

I.6 Types des cellules photovoltaïques :

I.6.1 Cellules cristallines : Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. On distingue deux types de cellules cristallines :

I.6.1.1 Cellules en silicium polycristallin :

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains [15].

La qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinautes 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 polycristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre [16]. Avec une efficacité de 12 % à 14% [17].

I.6.1.2 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% [17].



Figure.I.6 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [16].

I.6.2 Cellules à base de couches minces :

I.6.2.1 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 [18]. 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 [17].

I.6.2.2 Cellules 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%) [18][17]. 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 CdTe [18].

I.6.2.3 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 [18].

I.6.3 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 [19].

I.6.4 Cellules à haut rendement :

I.6.4.1 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 (bleue) 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 (Spectres d'absorption) différent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption.

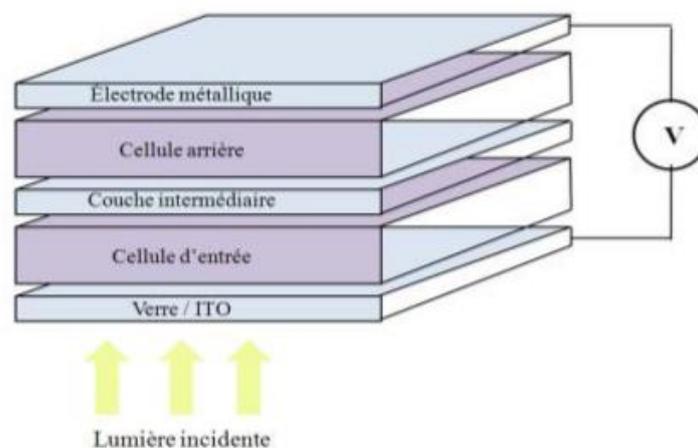


Figure.I.7 : Schéma d'une structure tandem [20].

I.6.4.2 Cellules multi-jonctions :

Les cellules multi-jonctions sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP2...) 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 [6].

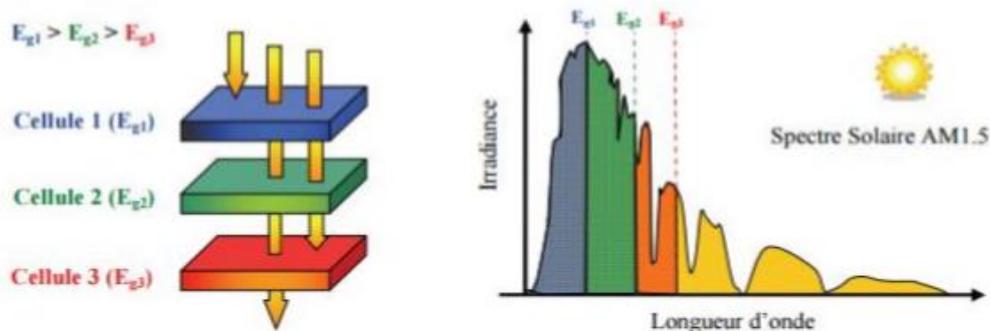


Figure.I.8 : Principe de la cellule à hétérojonction [6].

I.6.5 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 [21].

I.7 Architectures d'une cellule photovoltaïque : La cellule solaire est constituée de plusieurs couches qui sont présentées sur la Figure.I.9 :

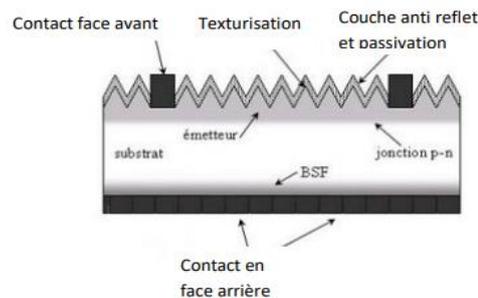


Figure.I.9 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium [22].

I.7.1 Texturisation de la surface :

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche antireflet (CAR), permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de silicium [23]. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement en forme de pyramide. Cette forme pyramidale du relief multiplie les réflexions dans le but de donner les chances à la lumière pour pénétrer dans le matériau. Dans le cas d'une réflexion double (Figure.I.10), son coefficient devient R^2 , ce qui entraîne une baisse de la réflexion totale sur cette surface. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

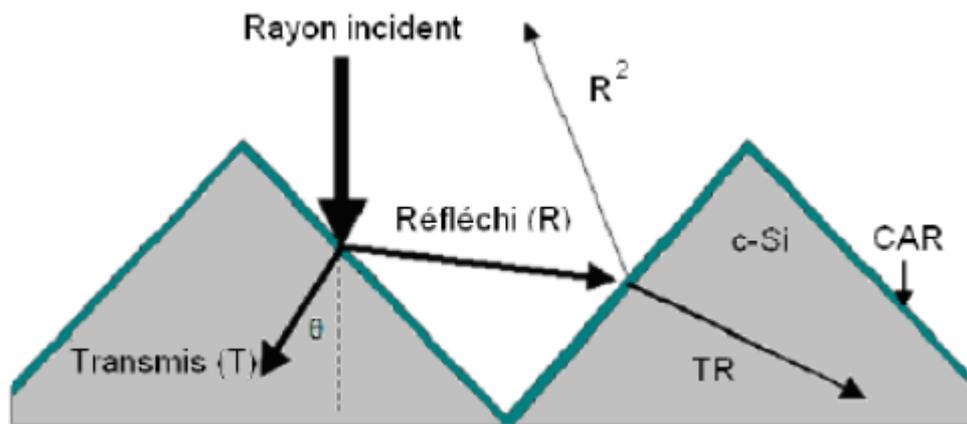


Figure.I.10 : Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission et $T+R=1$ (l'absorption est négligée) [24].

I.7.2 La couche antireflet :

La cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface au niveau de la face avant, il faut que cette surface soit recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Réflexive Coatings CAR). La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le semi-conducteur.

La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau n_{CAR} , de l'épaisseur de la couche déposée d_{CAR} , de l'angle d'incidence λ et de l'état de polarisation du rayon incident.

De différentes couches anti-réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes: TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 et SiN_x ou conductrices : ZnO ou l'ITO [25].

I.7.3 Champ électrique dans la zone arrière (BSF) :

La réalisation d'un champ électrique du type BSF (Back Surface Field) par transition abrupte de dopage sur la face arrière de la cellule solaire dans la zone de contact ohmique, permet de collecter les paires électron-trous qui sont créés par les radiations d'onde de spectre solaire. Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction, au lieu qu'il soit recombinaison dans ce voisinage. Ils participent à la photo-courant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charges est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [14].

I.7.4 Les Contacts face, avant et arrière :

La collection du courant des porteurs photogénérés se fait par contacts métalliques de l'émetteur et du substrat. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractérisation ($I-V$) du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement.

Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de 100 μm et une épaisseur de 10 μm à 30 μm [26] [27] permettant de conduire une forte densité de courant.

I.8 Influence de quelques paramètres extérieurs sur le rendement photovoltaïque :**I.8.1 Influence de la température :**

La température exerce une influence importante sur le comportement de la cellule, qui se manifeste principalement par :

- Une diminution de la tension générée,
- Et une légère augmentation du courant.

Donc, cette influence de la température aura aussi une influence sur le rendement de la cellule. Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux [28].

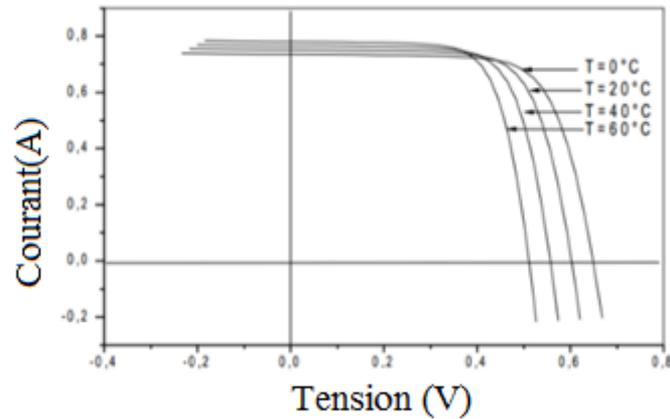


Figure.I.11 : Influence de la température sur une cellule solaire [28].

I.8.2 Influence de l'éclairement :

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m^2 . La nuit, il est nul ($0 W/m^2$). Il varie au cours de la journée entre 0 et $1000 W/m^2$ (valeur maximum), en fonction de la tension. L'éclairement a une nette incidence sur la valeur de I_{cc} . Lorsqu'il double, I_{cc} double aussi. L'éclairement a très peu d'incidence sur la tension à vide V_{co} [28]

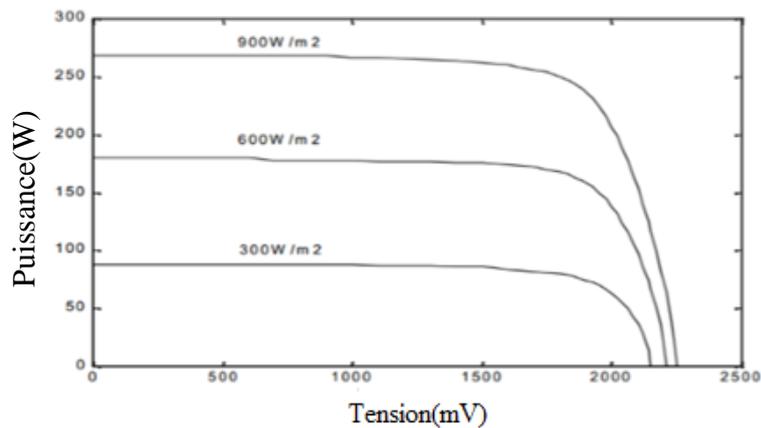


Figure.I.12 : Influence de l'éclairement sur la cellule solaire [28].

Chapitre II
Couche antireflet
et hétérojonctions

II.1 Introduction :

Dans cette section, on va exposer les bases fondamentales pour éclaircir la structure hétérojonction des cellules solaires et le rôle de la couche antireflet du TCO sur la cellule solaire comme suit :

On énonce l'état de l'art du TCO tout en mettant en évidence les propriétés optiques et électriques.

On discute aussi certaines conceptions sur la structure métal/semi-conducteur du point de vue description des phénomènes physiques qui la gère.

II.2 L'oxyde transparent conducteur (TCO) :**II.2.1 Définition :**

Les oxydes transparents conducteurs (Transparents Conductivité Oxydes) TCO sont des semi-conducteurs dégénérés à large gap (supérieur à 3.1 eV). Ils ont une transmission élevée (environ 90%). Ils constituent une classe unique de matériaux qui présentent à la fois la transparence dans le spectre du visible (longueur d'onde de 400 nm) et la bonne conductivité électrique simultanément [29]. En général, ces deux caractéristiques sont liées à l'épaisseur de la couche déposée. Par exemple, elles dépendent de la taille des grains, qui croit, habituellement, avec l'épaisseur du film.

Les oxydes d'indium, de cadmium, d'étain, de zinc et de gallium sont les plus connus parmi les TCO [30]. Couramment, les oxydes sont dopés par un métal. Cependant, ce dopant métallique n'est actif que lorsqu'il se substitue au métal primaire. La bande de conduction est, alors, fortement perturbée par chaque atome dopant, la diffusion des électrons de conduction est, alors, accrue, et la mobilité est en conséquence la conduction chute. C'est pourquoi certains oxydes sont dopés avec du fluor, qui, lorsqu'il se substitue à l'oxygène, engendre une perturbation de la bande de valence, ce qui minimise la diffusion des électrons de conduction [31].

Aussi, faut-il signaler que tous ces TCO sont de type N (les porteurs sont donc des électrons) et que la découverte récente de TCO de type P pourrait ouvrir la voie à une nouvelle électronique, même si leur conductivité est encore très mauvaise [32][33].

II.3 Les propriétés des TCO :

Les TCO présentent deux propriétés importantes qui sont propriétés optiques et propriétés électriques :

II.3.1 Les propriétés optiques :

Les propriétés optiques des matériaux sont régies par trois phénomènes essentiels qui sont : la transmission T, la réflexion R, l'absorption A.

II.3.1.a La transmission T :

La transmission optique est définie comme étant le rapport entre l'intensité de la lumière incidente (I_0) et l'intensité de la lumière transmise à travers le matériau (I_T).

$$T\% = 100 \cdot \frac{I_T}{I_0} \quad (\text{II.1})$$

II.3.1.b La réflexion R :

C'est l'intensité de la lumière qui est réfléchiée au niveau de sa surface (I_R) par rapport à l'intensité lumineuse incidente (I_0).

$$R\% = 100 \cdot \frac{I_R}{I_0} \quad (\text{II.2})$$

II.3.1.c L'absorption A:

C'est le rapport entre l'intensité de la lumière absorbée (I_A) et l'intensité lumineuse incidente (I_0).

$$A\% = 100 \cdot \frac{I_A}{I_0} \quad (\text{II.3})$$

La conservation du flux donne les relations :

$$I_0 = I_A + I_R + I_T \quad (\text{II.4})$$

On obtient alors la relation :

$$1 = A + R + T \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient d'absorption α :

La loi de Beer-Lambert permet de relier le flux transmis et l'épaisseur de la couche «d» au coefficient d'absorption illustré par l'équation suivante.

$$T = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (\text{II.6})$$

Avec T et R : transmission et réflexion du film TCO. d: l'épaisseur du film considéré.

« α » étant le coefficient d'absorption du film, il est lié au coefficient d'extinction k qui traduit l'absorption du rayonnement par le matériau par la relation suivante :

$$K = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (\text{II.7})$$

Les mesures de la transmission, de la réflexion et de l'épaisseur des oxydes transparents conducteurs permettent de déduire l'indice de réfraction n, le coefficient d'extinction k et le

gap E_g . Le spectre typique de la transmittance d'un film de TCO est représenté sur la Figure.II.1 qui montre trois régions distinctes : absorption, transmission et réflexion [34].

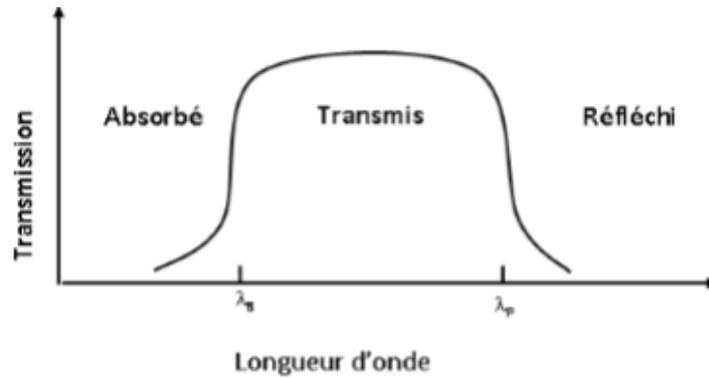


Figure.II.1 : La fenêtre optique des oxydes transparents conducteurs (TCO).

La fenêtre optique est centrée entre deux longueurs d'ondes caractéristiques où la lumière n'est plus transmise avec pour chaque zone un phénomène différent. À faible longueur d'onde dans le domaine de l'UV proche ($\lambda < \lambda_g$), l'absorption est dominée par les transitions bande à bande. Les photons incidents avec une énergie égale à celle du gap ou supérieure seront absorbés par des électrons de la bande de valence ce qui leur permettront d'aller dans la bande de conduction.

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} \quad (\text{II.8})$$

h : la constante de Planck.

c : la vitesse de lumière.

À haute longueur d'onde, dans le domaine de le proche infrarouge ($\lambda > \lambda_p$), la lumière incidente est réfléchi par le matériau. (λ_p), qui est appelée longueur d'onde de plasma. Elle donne la fréquence de plasma par :

$$\omega_p = \frac{2\pi c}{\lambda_p} \quad (\text{II.9})$$

Ce phénomène peut être décrit par la théorie classique des électrons libres de Drude [35].

A cette longueur d'onde, la couche mince absorbe une partie du rayonnement incident, cette absorption dépend de la présence d'électrons libres dans le matériau, de sa concentration et de sa mobilité [36].

$$\lambda_p = 2\pi c \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_\infty \tau}{N e \mu}} \quad (\text{II.10})$$

Avec ϵ_∞ : la permittivité à haute fréquence. τ est le temps moyen entre deux collisions.

ϵ_0 : la permittivité du vide. μ : la mobilité des porteurs de charge.

II.3.2 Les propriétés électriques :

Les oxydes transparents conducteurs sont des oxydes semi-conducteurs à grand gap (E_g) décrit les propriétés électriques des TCO avec une conductivité électrique dans la gamme $10^4 - 10^5 S.cm^{-1}$.

II.3.2.a La conductivité électrique :

La conductivité électrique est due aux défauts intrinsèques (lacunes d'oxygène et atomes du métal dans des positions interstitielles) ou aux dopants extrinsèques.

Si un champ électrique E est appliqué à un matériau, la densité J en A/m^2 , est donnée par :

$$J = \sigma E \tag{II.11}$$

Et la mobilité des porteurs de charge μ ($cm^2V^{-1}S^{-1}$) et de la charge électrique élémentaire de l'électron q :

$$\sigma = q \cdot n_v \cdot \mu = \frac{1}{\rho} \tag{II.12}$$

ρ est La résistivité électrique, s'exprime en $\Omega.cm$ définie comme l'inverse de la conductivité.

II.3.2.b La résistance carrée :

La résistance carrée ou surfacique R_S est une propriété électrique de surface importante dans le domaine des TCO, elle est définie comme le rapport entre la résistivité ρ et l'épaisseur de la couche selon la relation suivante :

$$R_S = \frac{\rho}{d} \tag{II.13}$$

II.3.2.c La mobilité :

La mobilité est un paramètre qui influe sur la conductivité électrique, et l'augmentation de cette grandeur améliorera les propriétés électriques du l'TCO et s'exprimant en μ ($cm^2V^{-1}S^{-1}$). Cette relation est donnée par :

$$\mu = \frac{e \tau}{m^*} \tag{II.14}$$

Où τ est le temps moyen entre deux collisions, m^* est la masse effective de l'électron et e la charge d'électron.

II.4 Applications des TCO :

Les TCO sont utilisés dans de nombreuses applications différentes, telles que les cellules solaires, les capteurs de gaz, l'isolation des fenêtres et l'isolation thermique des lampes, la production de couches chauffantes de protection de pare-brise du véhicule contre le gel et le brouillard, les écrans tactiles, les vitrages "intelligents" écrans plats, fenêtre antigel fenêtre

réfléchissant la chaleur (four, bâtiment,...) , protection électromagnétique ou toutes autres applications optoélectroniques.

Je me contente uniquement de donner deux explications au TCO :

II.4.1 Cellules solaires :

Les TCO dans les cellules solaires sont employés comme électrodes transparentes. Ils doivent nécessairement avoir une haute transmission optique afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et également une bonne conductivité électrique qui est requise pour obtenir le moins de pertes de transport des charges photogénérées. On peut utiliser les TCO dans tous les types des cellules solaires, telles qu'à-Si:H, poly-Si:H, CIGS, polymères, etc.

II.4.2 Couches protectrices ou intelligentes :

Les oxydes métalliques sont utilisés dans le domaine des fenêtres électrochromiques. Une fenêtre électrochromique est constituée de la superposition de plusieurs couches comprises entre deux plaques de verre. Deux couches de TCO y assurent les contacts électriques. Au centre, une solution d'électrolyte permet le passage des ions d'une électrode électrochromique à l'autre. Avec le passage d'un courant, la première couche électrochromique libère un ion qui se dirige vers l'autre couche par l'intermédiaire de l'électrolyte. Cet ion réagit avec la seconde couche électrochromique et le produit devient alors absorbant dans le domaine du visible. Ces matériaux sont utilisables pour réaliser des dispositifs tels que des miroirs chauffants (Heat Mirror films (HMF) [39]. Un exemple de cellule est donné à la Figure.II.2.

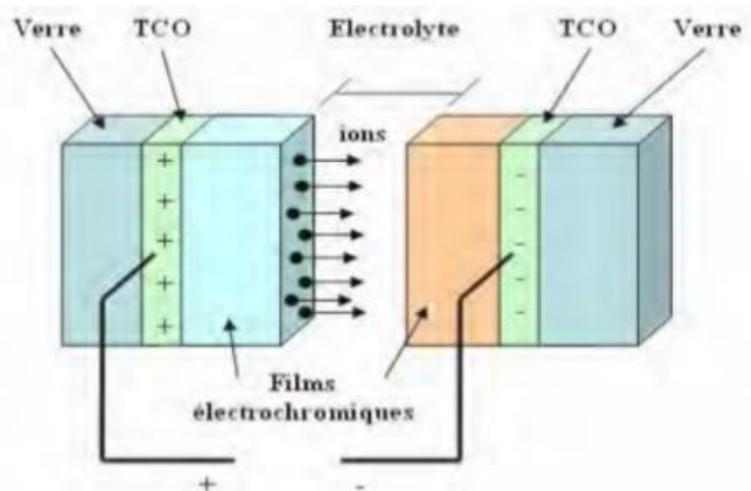


Figure.II.2 : Exemple d'une fenêtre électrochromique avec les différentes couches la composant [36].



Figure.II.3 : Quelques applications des TCO [38].

II.5 Les TCO les plus employés dans les cellules solaires :

II.5.1 L'oxyde de Zinc (ZnO) :

C'est un semi-conducteur de large gap, il est transparent dans le domaine visible [38]. Actuellement de nouvelles voies de recherches en optoélectronique suscitent un très vif intérêt pour ce matériau car ses propriétés sont multiples : grande conductivité thermique, grande capacité calorifique, constante diélectrique moyenne, haute résistivité, faible absorption. Il diffuse et absorbe fortement les rayonnements ultraviolets [25]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par ZnO sont : ZnO/Si(P) ; ZnO/Si(n) ; ZnO/Si(N)/Si(P) ; n-ZnO/p-CdTe.

II.5.2 Le dioxyde d'étain (SnO₂) :

Est un semi-conducteur de type n à large bande interdite (entre 3,5 et 4,1 eV) [39][40]. Le SnO₂ est un matériau chimiquement inerte et dur mécaniquement ; il résiste aux hautes températures et il est stable vis à vis de l'atmosphère [41]. Il facilite en particulier la décomposition de nombreux hydrocarbures au-dessus de 350°C. Ces propriétés assez particulières ont depuis très longtemps attiré l'attention des scientifiques qui ont tenté d'améliorer les performances électriques par différentes méthodes (stabilisation microstructurale, dopage...) [42]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par SnO₂ sont : SnO₂/Si(p) ; SnO₂/Si(N) /Si(P).

II.5.3 SnO₂ dopé In (ITO):

L'ITO est un semi-conducteur de type n fortement dégénéré à bande interdite directe (gap direct) variant entre 3.5 et 4.3 eV selon les auteurs, offrant ainsi une bonne transmission dans le domaine spectral du visible. Dans le cas où l'ITO est dégénéré, le niveau de Fermi est situé à l'intérieur de la bande de conduction (niveau E_c), son comportement est alors quasi métallique [43]. Deux causes sont à l'origine de cette dégénérescence : les lacunes d'oxygène et l'étain en substitution. La concentration des porteurs de charges d'un TCO performant est comprise entre $10^{20} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. L'ITO présente généralement une résistivité électrique $\rho \approx 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. Cette faible résistivité électrique est due à une importante concentration de porteurs [44]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par ITO sont : n-ITO/p-InP ; n-ITO/p-CdTe ; n-ITO/p-Si.

II.5.4 SnO₂ dopé F (FTO):

Les films de SnO₂ dopé fluor sont polycristallins (taille de grain, $\approx 400 \text{ \AA}$) et cristallisés suivant la structure rutile sans aucun changement dans le paramètre de maille. La diffraction des rayons X pour des films de SnO₂:F déposés par spray pyrolyses à différentes températures, montre une orientation préférentielle (200) parallèles au substrat. Ces films ont généralement une haute mobilité (environ $25-50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$) que SnO₂ ou d'ATO [45]. Parmi les cellules solaires qui ont été étudiées par FTO sont : SnO₂ : F/Si(P) ; SnO₂ : F/Si(N)/Si(P).

II.6 Les hétérojonctions :

II.6.1 Cellule homojonction :

La cellule homojonction est la conversion d'énergie qui repose sur l'absorption des photons par un seul type de semi-conducteur. Ce semi-conducteur est subdivisé en deux zones : la zone p, dopée avec des éléments chimiques accepteurs d'électrons tels que le bore et la zone n, dopée avec des éléments chimiques donneurs d'électrons comme le phosphore. La cellule homojonction est une cellule conventionnelle, car elle n'est pas réalisable. C'est pour cela on s'est intéressé à l'étude de la cellule hétérojonction.

II.6.2 Cellule hétérojonction :

Une hétérojonction est une jonction formée entre deux matériaux semi-conducteurs différents cristallin ou non cristallin [46]. Tel que la conversion d'énergie repose sur l'absorption des photons par deux types de semi-conducteurs.

II.7 Contact métal/Semi-conducteur :

On appelle structure métal/semi-conducteur tout dispositif unipolaire, le plus simple, qui constitue la base d'un grand nombre de structures complexes. Il se produit des échanges d'électrons de façon à aligner les niveaux Fermi, lorsqu'on met en contact un métal et un semi-conducteur.

Les contacts métal/semi-conducteur peuvent avoir des comportements de redresseurs ou ohmiques (Tableu.II.1).

| Contact | Semi-conducteur de type n | Semi-conducteur de type P |
|------------|---------------------------|---------------------------|
| Redresseur | $\phi_M > \phi_{Sc}$ | $\phi_M < \phi_{Sc}$ |
| Ohmique | $\phi_M < \phi_{Sc}$ | $\phi_M > \phi_{Sc}$ |

Tableu.II.1 : Contact ohmique où redresseur selon les travaux de sortie de chaque élément.

ϕ_M : le travail de sortie du métal.

ϕ_{Sc} : le travail de sortie du semi-conducteur.

Le fonctionnement des cellules solaires repose sur le contact Schottky « redresseur » du type métal semi-conducteur.

II.7.1 Cas ou $\phi_m > \phi_S$:

Semi-conducteur type n :

Les électrons qui se trouvent dans les semi-conducteur de type n ont une énergie supérieure à ceux qui sont dans le métal. Dans le cas du contact, les électrons du semi-conducteur se diffusent vers le métal jusqu' à obtenir l'alignement des niveaux de Fermi. Les électrons qui sont diffusés depuis le semi-conducteur s'accumulent sur l'interface du métal jusqu' à alignement des niveaux de Fermi. Ce dernier est dû à l'abaissement des bandes de conduction et de valence d'une quantité de $e\phi_{bi}$ (contact redresseur).

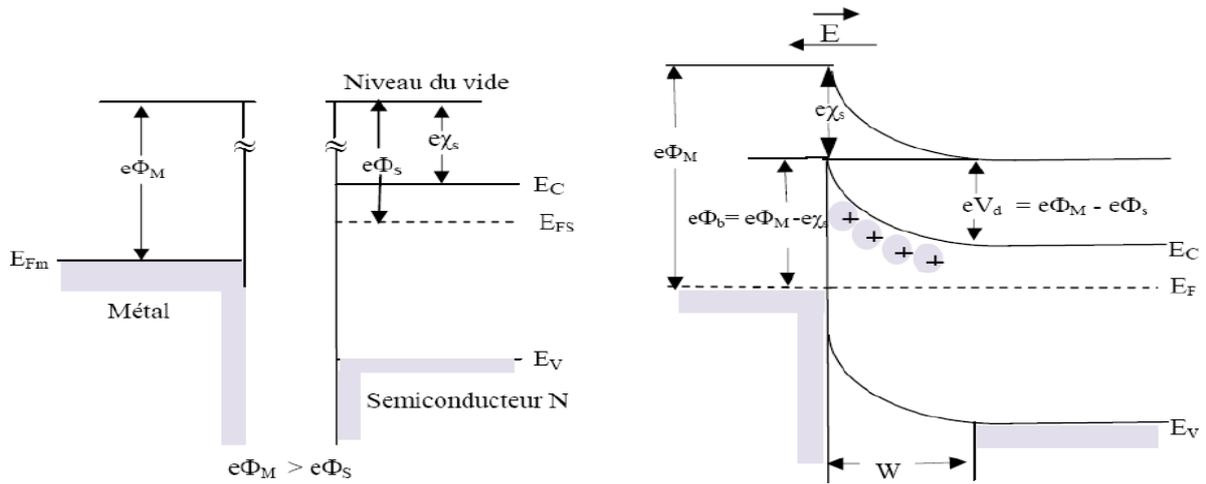


Figure.II.4 : Cas où le semi-conducteur est de type n.

II.7.2 Cas ou $\Phi_m < \Phi_s$:

Semi-conducteur type P :

Dans ce cas, l'énergie des électrons dans le métal est supérieure à celle des électrons du semi-conducteur. Puisque les énergies des électrons du métal et du semi-conducteur sont différents alors la diffusion des électrons se fait du métal vers le semi-conducteur, et ce, pour réaliser l'alignement de niveau de Fermi, qui est accompagné d'une courbure de bande d'énergie du semi-conducteur vers les basses énergies, et d'un déficit d'électron à l'interface du métal, et sur le côté du semi-conducteur. Se trouve une zone de charge d'espace négative. Les ions négatifs qui se trouvent dans le semi-conducteur de type vont être ionisé par les électrons provenant du métal ce qui en résulte une zone de charge d'espace du (ZCE) vide de porteur dans le semi-conducteur.

La tension de polarisation sera localisée au niveau de la (ZCE) du semi-conducteur dès la mise sous tension de la structure en question (contact redresseur).

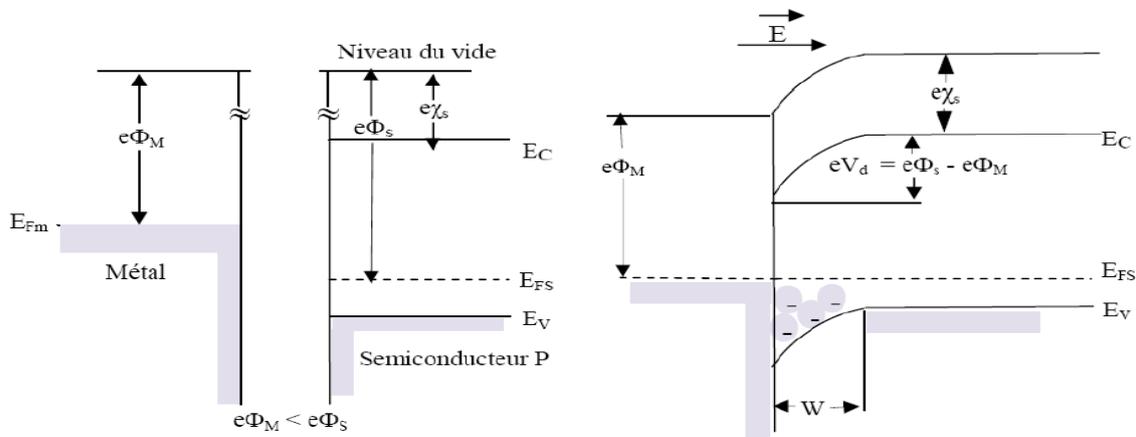


Figure.II.5 : Cas où le semi-conducteur est de type p.

Le courant électrique traversant le contact avec le courant thermoélectronique :

Si le semi-conducteur du type n est :

$$\Phi_B = \Phi_M + \chi_{SCn} \quad (\text{II.15})$$

Alors la barrière Schottky (V_d) entre le semi-conducteur et le métal est:

$$V_d = \Phi_M - \Phi_{SC} = \Phi_M - \chi - \frac{E_C - E_{Fn}}{q} \quad (\text{II.16})$$

Si le semi-conducteur du type p est :

$$\Phi_B = E_g + \chi_{SCp} - \Phi_M \quad (\text{II.17})$$

Alors la barrière Schottky (V_d) entre le semi-conducteur et le métal est:

$$V_d = \Phi_{SC} + \Phi_M = \chi + \frac{E_C + E_{Fp}}{q} - \Phi_M \quad (\text{II.18})$$

Φ_B : travail de sortie du métal.

χ_{SC} : affinité électronique du semi-conducteur.

E_C : niveau d'énergie de la bande de conduction.

E_{Fn} : niveau d'énergie du niveau de Fermi du semi-conducteur type n.

E_{Fp} : niveau d'énergie du niveau de Fermi du semi-conducteur type p.

A l'interface entre le métal et le semi-conducteur, il y a émission thermoélectronique par-dessus de la barrière de potentiel.

Le courant qui est dirigé du semi-conducteur vers le métal s'écrit :

$$J_{SC \rightarrow M} = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} T^2 e^{\left(\frac{-q\Phi_B}{KT}\right)} e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)}$$

$$J_{SC \rightarrow M} = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\Phi_B}{KT}\right)} e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)} \quad (\text{II.19})$$

T étant la température, K la constante de Boltzmann et $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$ la constante de Richardson, m^* est la masse effective d'un électron libre et h est la constante de Planck.

Le courant qui est dirigé du métal vers le semi-conducteur s'écrit :

$$J_{M \rightarrow SC} = -A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\Phi_B}{KT}\right)} \quad (\text{II.20})$$

Le courant thermoélectronique J_t est la somme des deux courants précédant selon la relation :

$$J_t = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\Phi_B}{KT}\right)} \left(e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)} - 1 \right)$$

$$J_t = J_s \left(e^{\left(\frac{qV}{KT}\right)} - 1 \right) \quad (\text{II.21})$$

Avec $J_s = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\Phi_B}{KT}\right)}$ est le courant de saturation.

La courbe de caractéristique $J(v)$ a la même allure que pour la jonction PN.

II.8 Dynamique des photo-porteurs :

Au cours de la conversion photovoltaïque dans une cellule solaire à hétérojonction il se produit le phénomène de la recombinaison de surface et la recombinaison volumique.

II.8.1 La recombinaison volumique :

Cette dernière se divise en trois recombinaisons à savoir :

II.8.1.1 La recombinaison radiative :

Dans une cellule solaire l'électron absorbe l'énergie du photon, puis passe de la bande de valence vers la bande de conduction, d'où création d'une pair électron-trous. La recombinaison radiative est le phénomène inverse de la génération par illumination où l'électron perd son énergie en revenant à la bande de valence pour libérer le photon. L'énergie du photon résultant de la recombinaison est égale à l'énergie du gap, qui peut participer à la génération d'électron-trou. Ce type de recombinaison est négligeable dans le silicium à gap indirect.

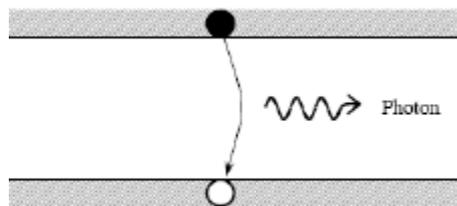


Figure.II.6 : Schéma représentant la recombinaison radiative.

II.8.1.2 La recombinaison Auger :

On dit qu'il y a une recombinaison Auger quand l'électron transmet son énergie à son voisin. Ce déficit d'énergie oblige l'électron à retomber en bande de valence mais l'électron qui vient de profiter de l'apport d'énergie l'emmagasine en tant qu'énergie potentielle. Il est présent principalement, dans les semi-conducteur fortement dopé, c'est-à-dire, il existe un grand nombre de porteurs dans la bande de conduction dans le semi-conducteur.

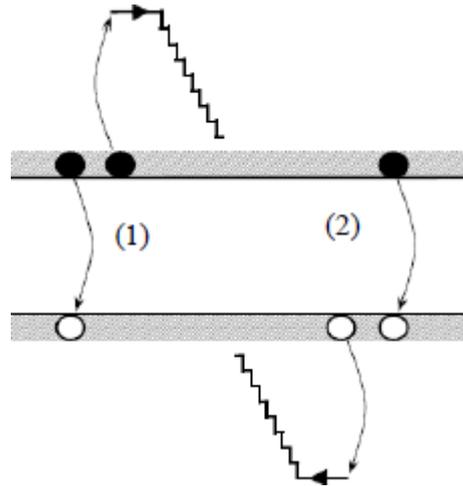


Figure.II.7 : Schéma représentant la recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron ou un trou.

II.8.1.3 La recombinaison de Shockley-Read-Hall (SRH):

Quand il y a des défauts dans le matériau on a, une recombinaison SRH. Ces défauts occasionnent des niveaux d'énergie parasites à se constituer à l'intérieur du gap du semi-conducteur. Au cours du transport de porteur de charge de la bande de valence à la bande de conduction, les niveaux d'énergie parasites piègent momentanément, les porteurs de charge.

Pour un seul niveau énergétique de défauts [47] :

$$R^{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n(p + p_1) + \tau_p(n + n_1)} \quad (II.22)$$

n_1 et p_1 sont donnés par la statistique de Fermi pour le niveau d'énergie du piège considère :

$$n_1 = n_i e^{\frac{E_t}{kT}} \quad p_1 = n_i e^{\frac{-E_t}{kT}}$$

E_t la position énergétique d'état de piège et n_i est la concentration intrinsèque.

τ_p et τ_n sont respectivement la durée de vie pour les trous et les électrons.

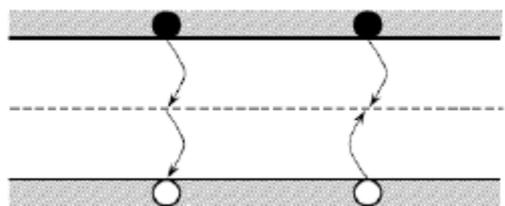


Figure.II.8 : Schéma représentant la recombinaison SRH.

II.8.2 La recombinaison de surface :

La discontinuité du réseau cristallin du silicium dans l'endroit de la recombinaison de surface génère une densité élevée de centres de recombinaison. La plupart de ces recombinaisons de surface est du genre SRH.

Le taux de recombinaison Shockley-Read-Hall en surface est donné par l'expression :

$$R_{Surf}^{SRH} = \frac{S_n S_p (np - n_i^2)}{S_p (p + p_1) + S_n (n + n_1)} \quad (II.23)$$

S_n , S_p sont respectivement la vitesse de recombinaison en surface pour les électrons et les trous.

II.9 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque du type Métal-Semi-conducteur :

L'effet photoélectrique, ou la capacité des photons à créer des porteurs de charge est à la base de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Outre l'absorption des photons par le semi-conducteur ils transmettent leur énergie aux électrons par collision, et ce dans le cas d'une homojonction. La création des paires d'électrons-trous dans la zone de déplétion par arrachement des électrons se fait lorsque l'énergie transmise par les photons est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur. Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent ; sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone ; ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PN et une différence de potentiel.

Selon l'énergie du photon il peut se produire deux processus lorsque l'hétérostructure métal/semi-conducteur est éclairée :

- Il y a création d'une paire électron-trou, si l'énergie du photon est supérieure au gap du semi-conducteur. Cette paire sera séparée par le champ électrique interne lorsqu'elle est créée dans la jonction ou proche de celle-ci.
- Les électrons du métal passent du côté semi-conducteur si l'énergie du photon est plus grande que celle de la hauteur de barrière métal semi-conducteur ϕ_B .

II.10 Cellule solaire hétérojonction type $\text{SnO}_2/\text{Si(P)}$:

Les convertisseurs photovoltaïques à faible coût avec un rendement supérieur à 10% résultent des hétérostructures à base de matériau conducteur transparent en contact avec un semi-conducteur à faible bande interdite tel que le silicium [48][49].

Dans notre étude, on s'est basé sur les cellules solaires à hétérojonction, car elles présentent un coût de fabrication faible à l'élimination des étapes à hautes températures de la fabrication de la jonction et ces dernières ne nécessitent pas de dépôt d'une couche antireflet contrairement aux cellules solaires à homojonction PN. Le rendement théorique des cellules en question ($\text{SnO}_2/\text{Si(P)}$) a atteint l'ordre de 20%. Mais sur le plan expérimental il n'y a en que 9% de rendement [50] [51].

La bande d'énergie de la cellule solaire SnO₂/Si(P) est représentée par le diagramme ci-dessous dans la Figure.II.9.

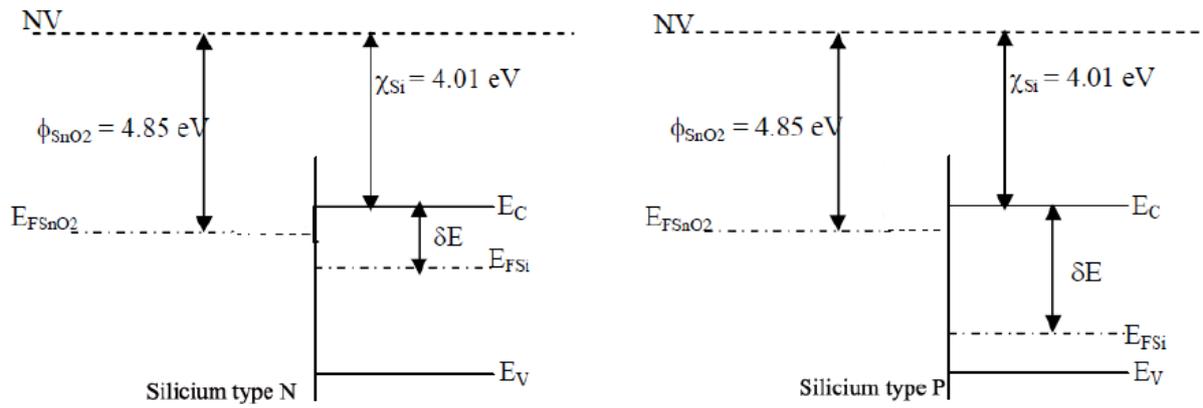


Figure.II.9 : Le diagramme de bande d'énergie d'hétérostructure du type SnO₂/Si.

Chapiter III
Résultats et
discussion

III.1 INTRODUCTION :

Dans cette partie on va présenter les résultats de notre travail de simulation numérique des cellules solaires à hétérojonctions du type TCO/Si. La simulation numérique a été faite par le logiciel PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel). Le but de cette étude est d'étudier et de déterminer les paramètres optimale donnant lieu les meilleures performances d'une cellule solaire photovoltaïques ensuite on va étudier l'influence des paramètres de la cellule sur les performances de la cellule photovoltaïques tels que l'épaisseur de couche d'oxyde transparent conducteur, le dopage ainsi que de la réflexion sur les paramètres photovoltaïques de ces cellules.

III.2 Présentation du logiciel PC1D :

Le logiciel PC1D, a été développé au centre de recherche de microélectronique de l'université de New South Wales en Australie. C'est l'un des simulateurs largement répandu pour la modélisation des cellules photovoltaïque [52].

Le PC1D est un logiciel qui résout les équations non linéaires de transport quasi-unidimensionnel des électrons et des trous dans dispositifs à semi-conducteur, notamment dans les dispositifs photovoltaïques à une dimension par l'utilisation de la méthode de éléments finis [53][54].

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 au photocourant engendrant une baisse du rendement.

L'exploitation de la partie linéaire de la courbe $\ln(I) = f(V)$ donne la valeur du facteur du qualité de la structure. Ce facteur traduit l'écart par rapport à une diode, ou la conduction se fait uniquement par diffusion, il traduit aussi l'existence des défauts cristallographiques.

Le rendement quantique interne $IQE(\lambda)$: 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 λ .

Longueur de diffusion des porteurs minoritaires : Sous l'effet de l'éclairement il se produit une diffusion des porteurs minoritaires qui vont se déplacer vers les régions où leurs concentrations

sont plus faibles .Ainsi le PC1D permet de tracer la longueur de diffusion des porteurs minoritaires en fonction de la position.

Densité de courant : La variation de la densité de courant (Ampère par centimètre carré) des électrons et des trous est tracée en fonction de la position. Ainsi, on peut déduire la densité de courant total qui est la somme du courant des électrons et les trous [55].

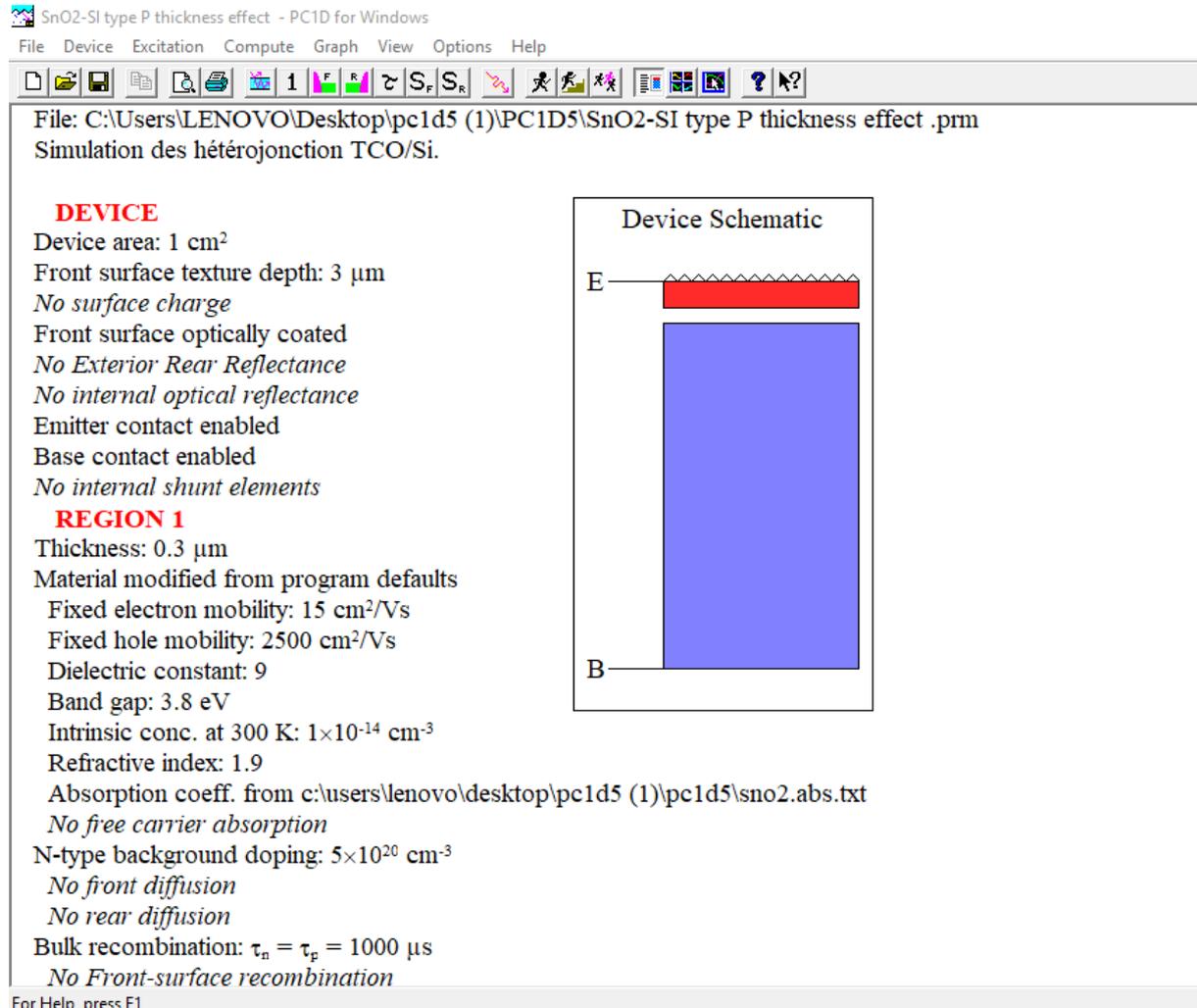


Figure.III.1 : Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique.

III.3 La structure de la cellule solaire simulée :

Dans notre travail on a fait une simulation sur trois types des cellules :

1-Si (N+)-Si(P) : Cellules solaires constituées silicium type N déposée sur du silicium de type P munies d'électrodes collectrices, en face avant et arrière, permettant leur connexion au circuit électrique extérieur.

2-SnO₂-Si(P) : Cellules solaires constituées d'une couche d'oxyde d'étain SnO₂ déposée sur du silicium de type P munies d'électrodes collectrices, en face avant et arrière, permettant leur

connexion au circuit électrique extérieur. La couche de SnO_2 , en sa qualité de TCO, est une couche antireflet.

3- SnO_2 -Si(N⁺)-Si(P) : Cellules solaires constituées d'une couche d'oxyde d'étain SnO_2 déposée sur la cellule Si (N⁺)-Si(P).

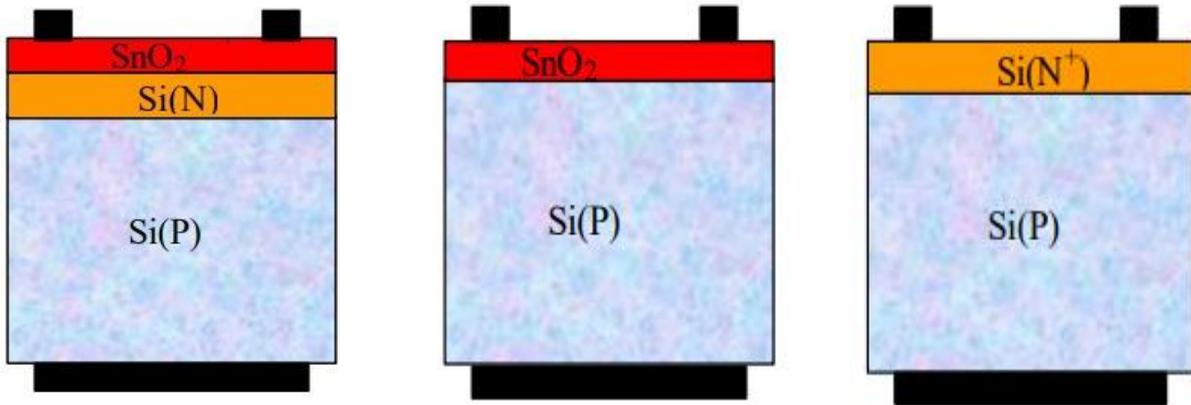


Figure.III.2 : Cellules solaires simulées sous PC1D.

III.4 Paramètres de simulation :

Les simulations ont été effectuées sous un spectre solaire AM.1.5 avec $P = 1000 \text{ W/m}^2$. Le tableau suivant regroupe les principaux paramètres des couches de silicium et de SnO_2 utilisés dans la simulation.

| | |
|--|--|
| Superficiel du dispositif | 1 cm^2 |
| 1^{ère} région du dispositif SnO_2 | |
| Epaisseur | $0.3 \mu\text{m}$ |
| Mobilité des électrons | $15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ |
| Mobilité des trous | $2500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ |
| Constante diélectrique | 9 |
| Energie de gap | 3.8 eV |
| Concentration intrinsèque des porteurs à 300K | 10^{-14} cm^{-3} |
| Indice de réfraction | 1.9 |
| Coefficient d'absorption | $\text{SnO}_2.\text{abs}$ (courbe expérimentale) |
| Dopage type n | 5×10^{20} |
| Recombinaison dans le volume | $\mu_n = 1000 \mu\text{s}$; $\mu_p = 1000 \mu\text{s}$ |
| 2^{ème} région du dispositif $\text{Si(N}^+)/\text{Si(P)}$ | |

| | |
|---|--|
| Epaisseur | 350 μm |
| Mobilité des électrons | A partir du modèle interne pour le Silicium |
| Mobilité des trous | |
| Constante diélectrique | 11.9 |
| Energie de gap | 1.124 eV |
| Concentration intrinsèque des porteurs à 300K | 10^{10} cm^{-3} |
| Indice de réfraction | 1.9 |
| Coefficient d'absorption | A partir du modèle interne pour Si du PC1D |
| Free carrier absorption | A partir du modèle interne pour Si du PC1D |
| Dopage du substrat type p | $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ |
| Dopage du substrat type n | $1.85 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ |
| Recombinaison dans le volume | $\mu_n = 1000 \mu\text{s}$; $\mu_p = 100 \mu\text{s}$ |

Tableau.III.1 : Paramètres de simulation.

III.5 Résultats de simulation :

III.5.1 Cellule de type : Si (N+)-Si(P) :

III.5.1.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire :

La caractéristique I-V de la cellule solaire Si(N)/Si(P) simulée sous PC1D est représentée sur la Figure.III.3.

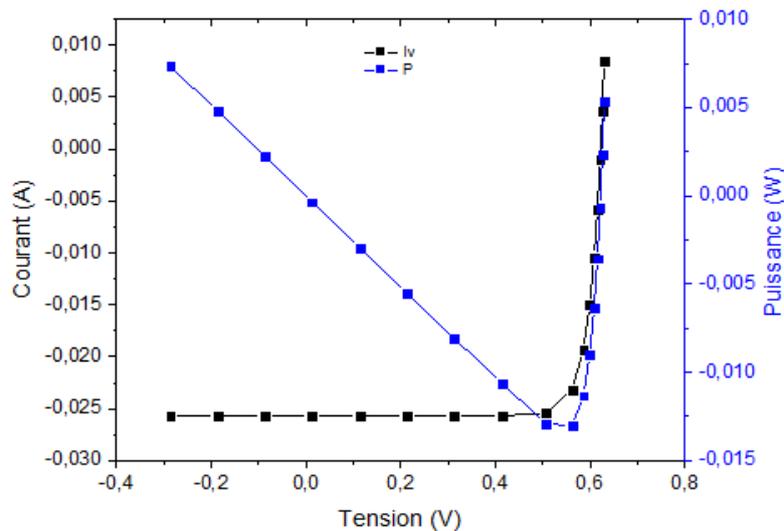


Figure.III.3 : La caractéristique I(V) de Si(N)-Si(P) sous PC1D.

La caractéristique I(V) de la jonction Si(N)-Si(P), sous un éclairement à AM_{1,5} (1000W/m²) nous donne un courant de court-circuit I_{cc} =25,7 mA, une tension de circuit ouvert V_{co} = 622.4 mV, un facteur de forme FF=0.825 et un rendement photovoltaïque η= 13.2%.

III.5.1.2 Influence des Paramètres sur les performances de cellule solaire :

a. Influence de la réflexion du Si (N+) :

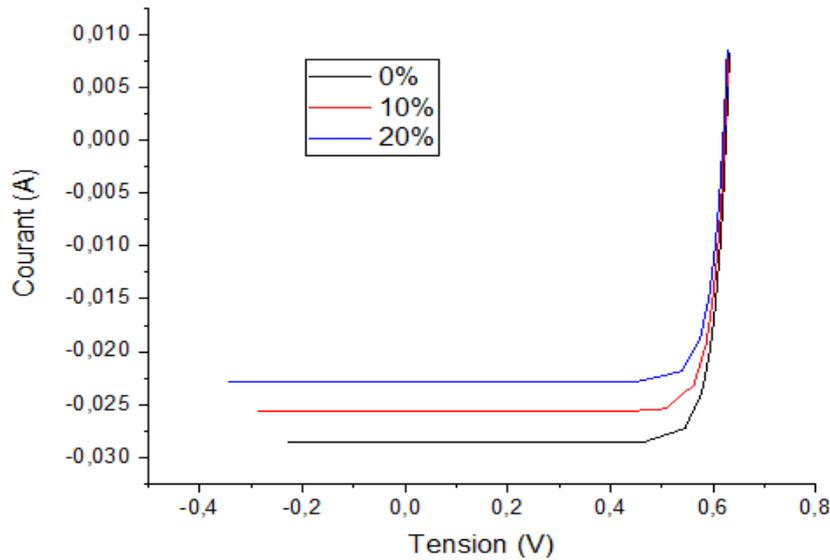


Figure.III.4 : Influence de la réflexion sur la caractéristique I(V) du Si(N+)-Si(P).

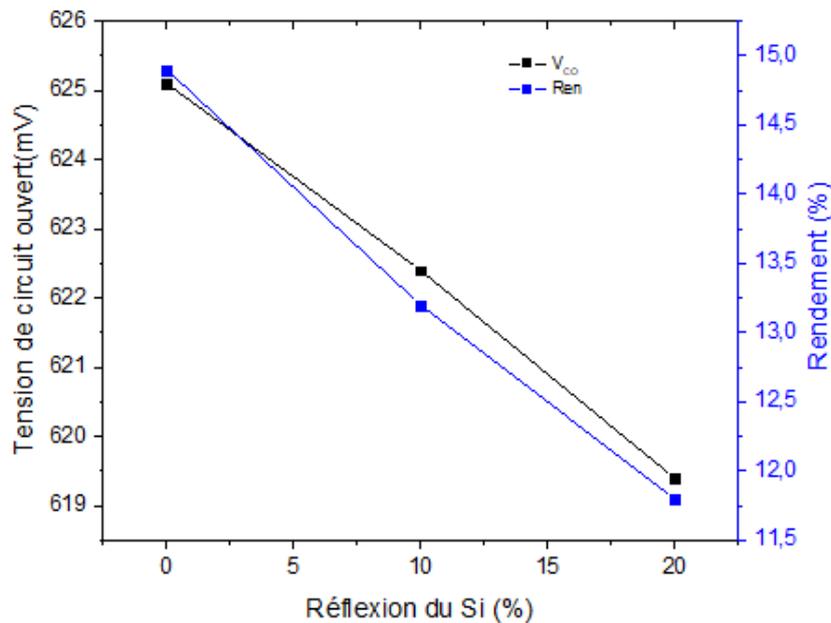


Figure.III.5 : Variations de V_{co} et η en fonction de la réflexion du Si(N+).

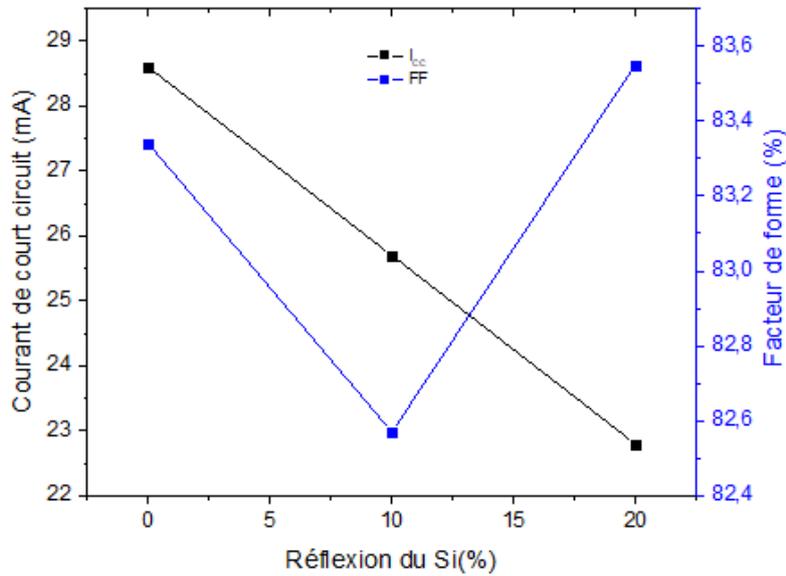


Figure III.6 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de la réflexion du Si(N+).

D'après les résultats représentés sur les Figures (III.4) ;(III.5) ;(III.6) on remarque qu'à chaque fois la réflexion augmente la tension du circuit ouvert et du courant de court-circuit diminue, et par suite le rendement diminue. Ceci s'explique par l'état du silicium qui réfléchit plus de 35% de la propagation lumineuse produite [27]. La mauvaise absorption dans le silicium revient au gap qui donne une influence considérable sur la performance des cellules photovoltaïques ; tout en augmentant la réflexion le rendement diminue.

Pour améliorer la compétence (performance) des cellules solaires, il est préférable d'utiliser SnO_2 comme couche opposante à la réflexion.

b. Influence de l'épaisseur du silicium :

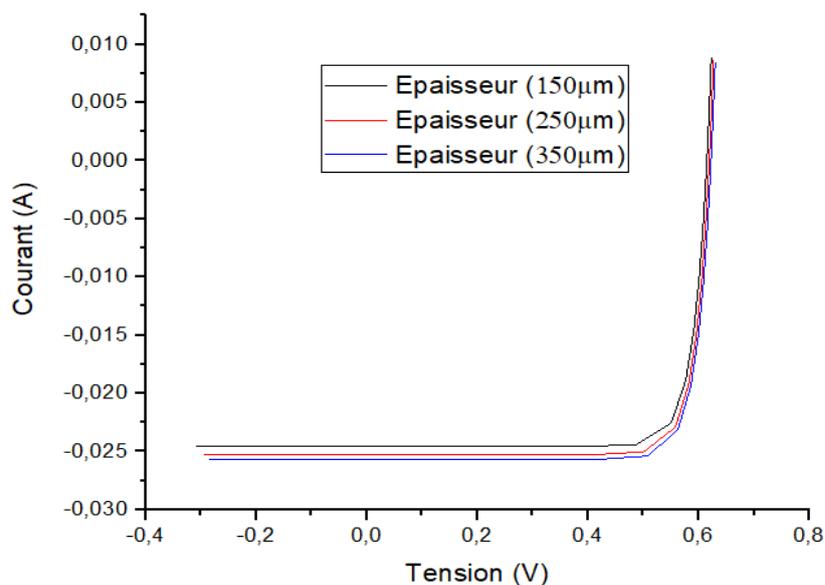


Figure III.7 : Influence de l'épaisseur sur la caractéristique $I(V)$ du Si (N+)-Si(P).

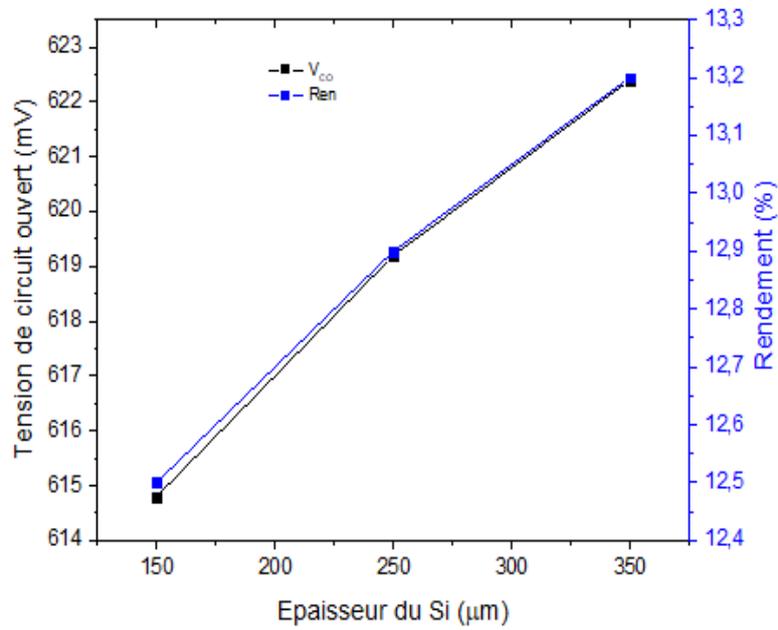


Figure.III.8 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du Si.

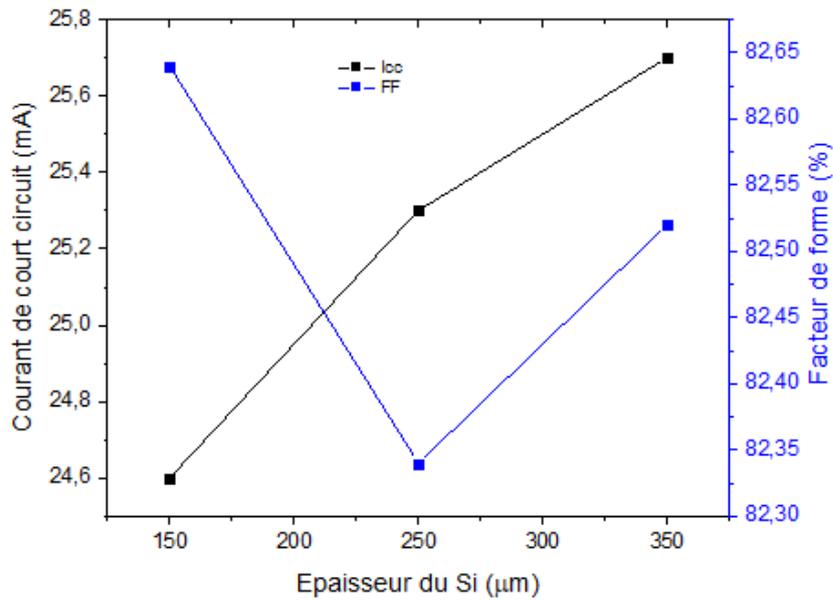


Figure.III.9 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du Si.

En augmentant l'épaisseur du silicium, chacun de la tension de circuit ouvert et du courant de court-circuit augmente, ce qui améliore la performance de transformation des cellules d'énergie solaire. L'augmentation de substrat s'explique par une absorption meilleure de telle sorte que les photons se produisent beaucoup plus en paires électron-trous générés.

III.5.2 Cellule de type SnO₂-Si(P) :

III.5.2.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire :

La caractéristique I-V de la cellule solaire SnO₂-Si(P) simulée sous PC1D est représentée sur la Figure.III.10.

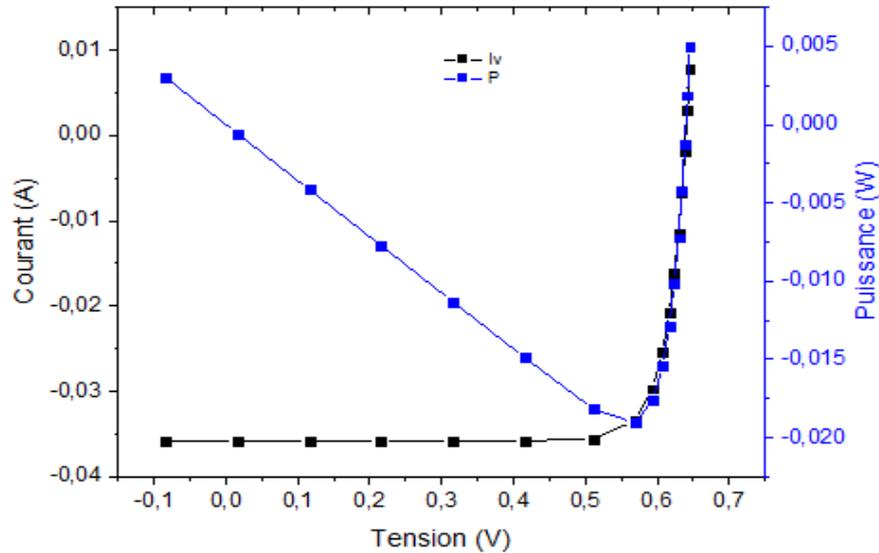


Figure.III.10 : La caractéristique I(V) de SnO₂-Si(P) sous PC1D.

La caractéristique I(V) de la jonction SnO₂-Si(P), sous un éclairage de AM_{1,5} (1000W/m²) nous donne un courant de court-circuit I_{cc}=35.8 mA, une tension de circuit ouvert V_{co} = 639.9 mV, un facteur de forme FF=0.832 et un rendement photovoltaïque η= 19%.

III.5.2.2 Influence des Paramètres sur les performances de la cellule solaire :

a.Influence de la réflexion du SnO₂ :

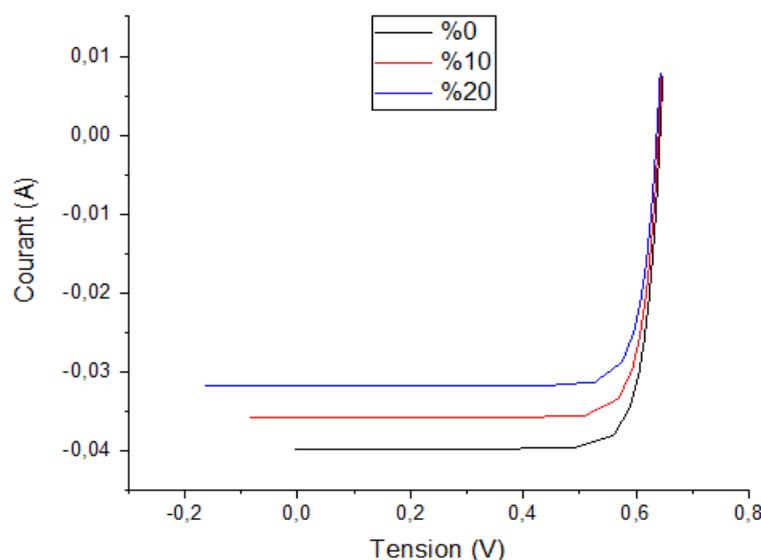


Figure.III.11 : Influence de la réflexion sur la caractéristique I(V) du SnO₂-Si(P).

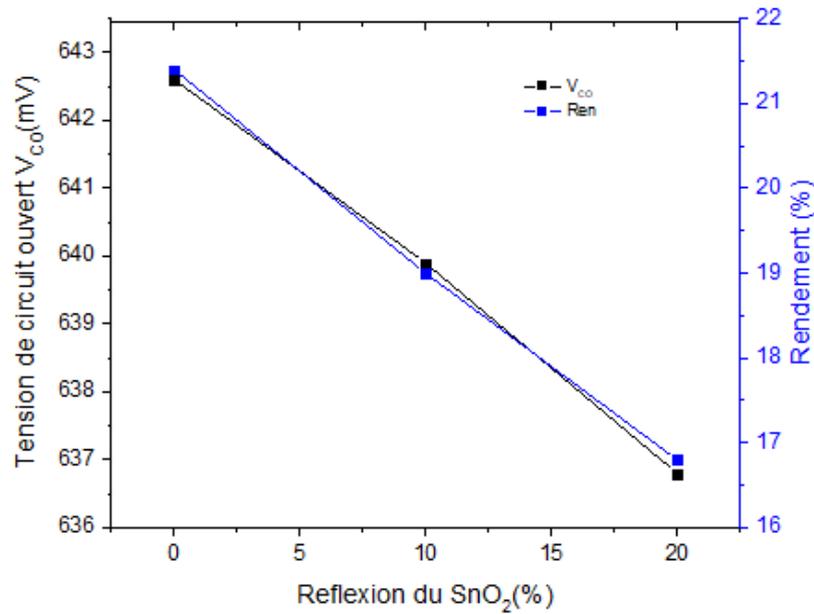


Figure.III.12 : Variations de V_{co} et η en fonction de la réflexion du SnO₂.

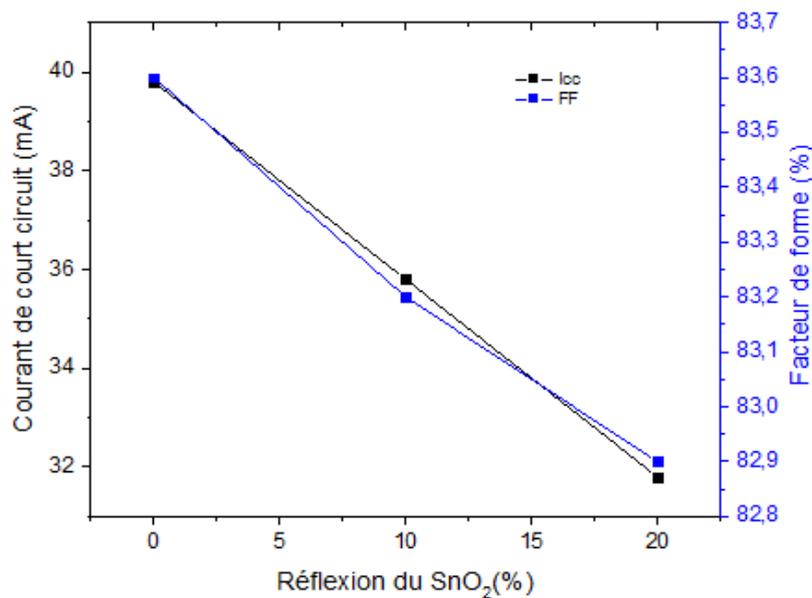


Figure.III.13 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de la réflexion du SnO₂.

Pour avoir un bon rendement photovoltaïque dans l'hétérojonction SnO₂/Si(P), il faut transmettre le maximum de rayonnement lumineux à travers la couche du TCO vers la couche active, et donc réduire la réflexion du TCO.

En augmentant la réflexion, chacun des I_{cc} ; V_{co} ; FF diminue, d'où le rendement de transformation des cellules d'énergie solaires diminue. Ceci s'explique par le fait que lorsque la concentration de l'électron libre dans la couche TCO augmente entraîne une variation de l'indice de réfraction, ce qui provoque l'augmentation de la réflexion, et donc la diminution de

la transmission des couches de TCO. Ce qui peut expliquer la diminution de V_{co} , I_{cc} et le rendement photovoltaïque lorsque la réflexion du TCO augmente.

b. Influence de l'épaisseur de silicium :

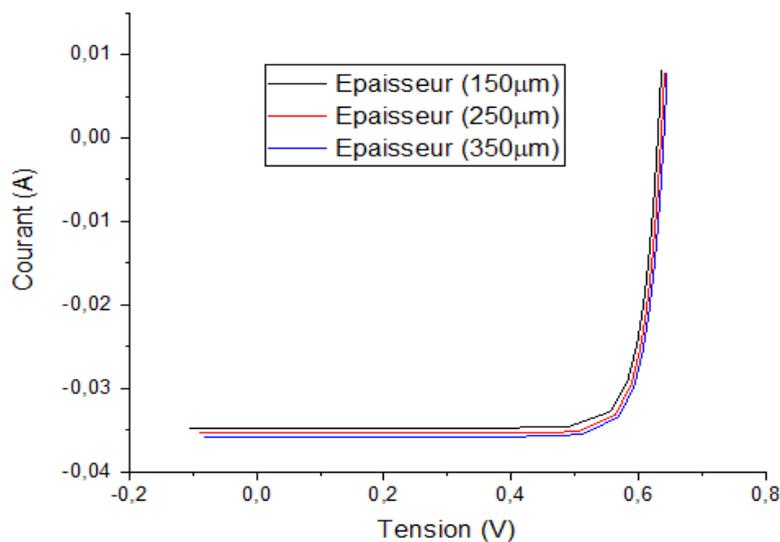


Figure.III.14 : Influence de l'épaisseur du Si sur la caractéristique $I(V)$ du $SnO_2-Si(P)$.

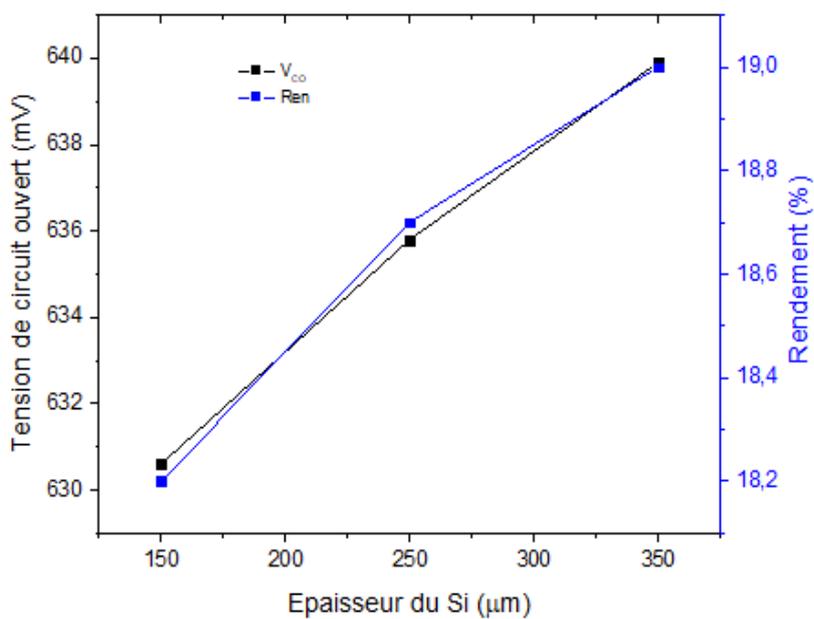


Figure.III.15 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du Si.

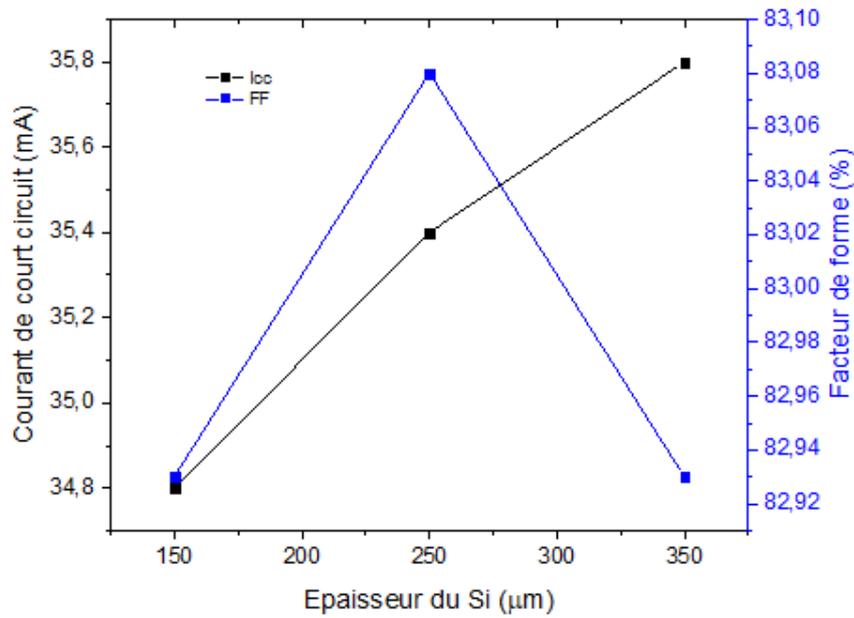


Figure.III.16 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du Si.

Lorsque l'épaisseur du substrat augmente, le rendement de la cellule solaire augmente. Ceci revient à l'augmentation du circuit ouvert et du courant du court-circuit, de telle sorte que lorsque l'épaisseur du substrat augmente l'absorption des photons augmente d'où l'augmentation dans les paires électron-trous générés.

c. Influence du dopage de silicium :

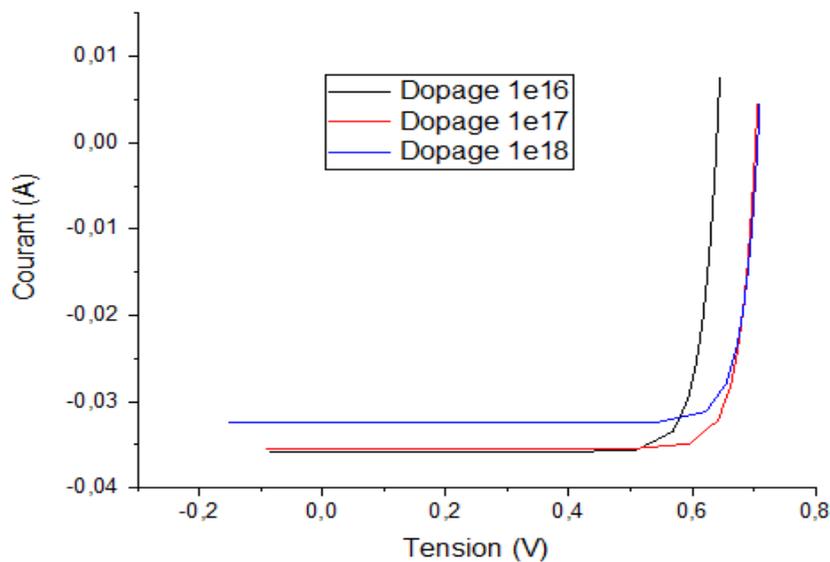


Figure.III.17 : Influence de dopage sur la caractéristique $I(V)$ du $SnO_2-Si(P)$.

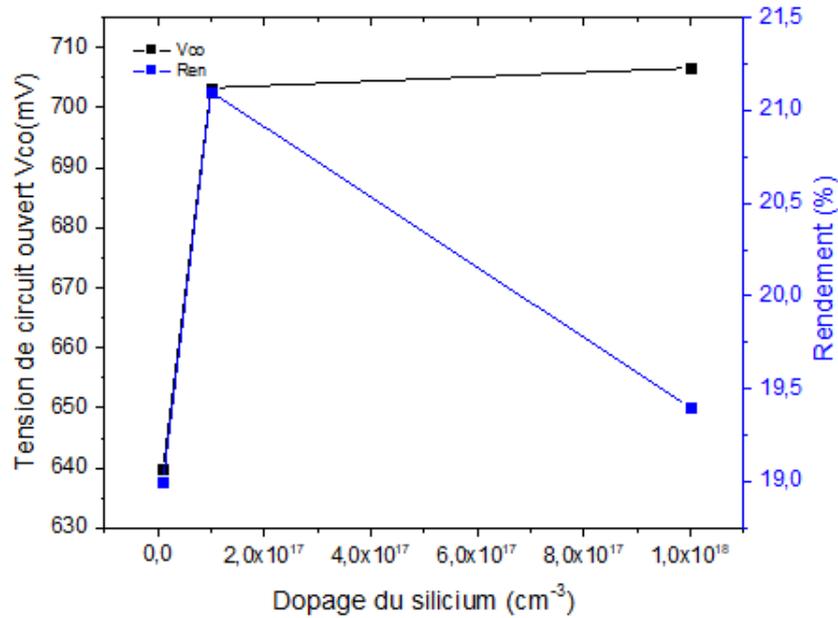


Figure.III.18 : Variations de V_{co} et η en fonction de dopage du Si.

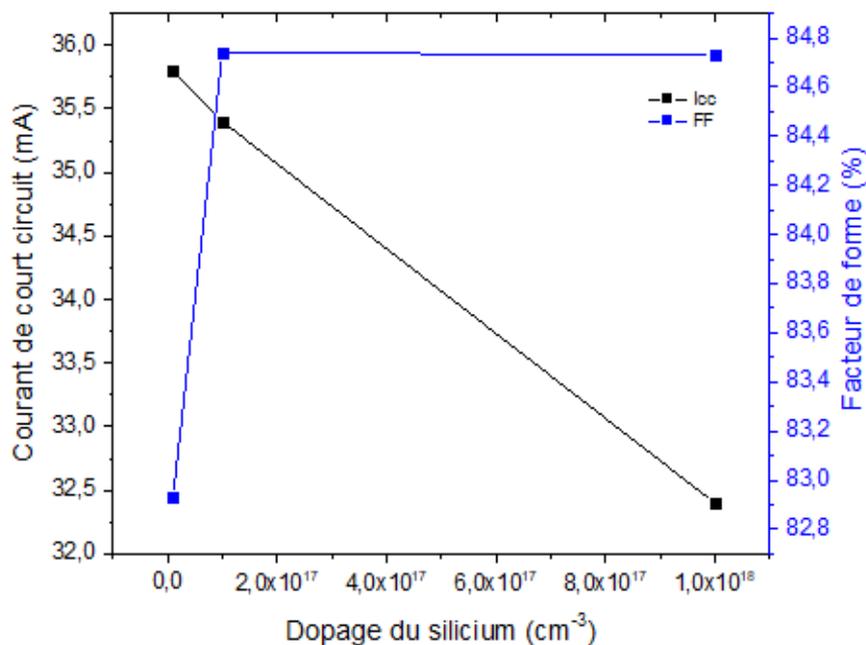


Figure.III.19 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de dopage du Si.

On observe qu'au de dessous du taux de dopage 10^{17} une augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} ainsi que le rendement. Par contre le courant de court-circuit I_{cc} diminue.

On explique l'augmentation de rendement et la tension par l'augmentation des porteurs de charge jusqu'il atteint la valeur 10^{17} .

Au-dessus de la valeur 10^{17} du taux de dopage on observe une diminution du rendement cela s'explique par la dégénérescence du semi-conducteur.

Les faibles dopages du silicium type p permettent l'augmentation de la barrière de potentiel entre le semi-conducteur et le TCO. La relation illustre la dépendance de la barrière de potentiel

avec le dopage du silicium (travail de sortie). Plus le travail de sortie du silicium est élevé, plus la barrière de potentiel est importante.

$$V_d = \phi_M - \phi_{Sc} = \chi + \frac{E_c + E_{F,P}}{q} - \phi_M$$

d. Influence de l'épaisseur de la couche antireflet (SnO₂) :

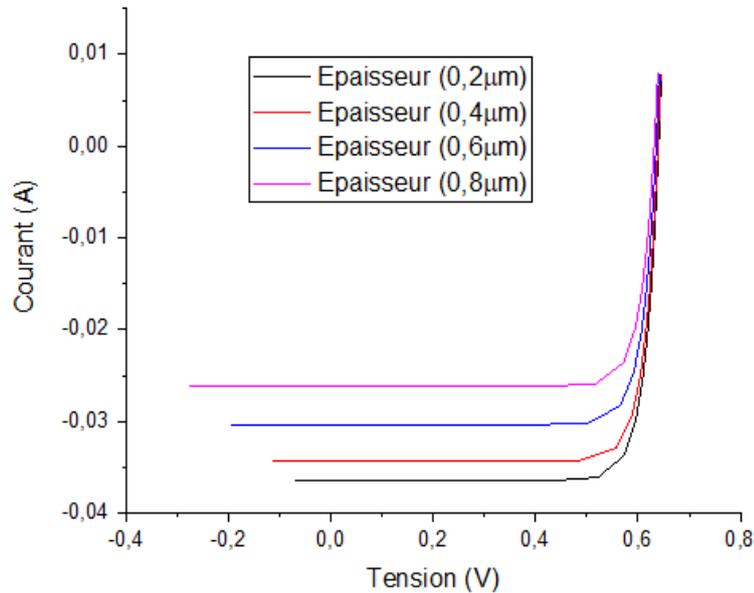


Figure.III.20 : Influence de l'épaisseur du SnO₂ sur la caractéristique I(V) du SnO₂-Si(P).

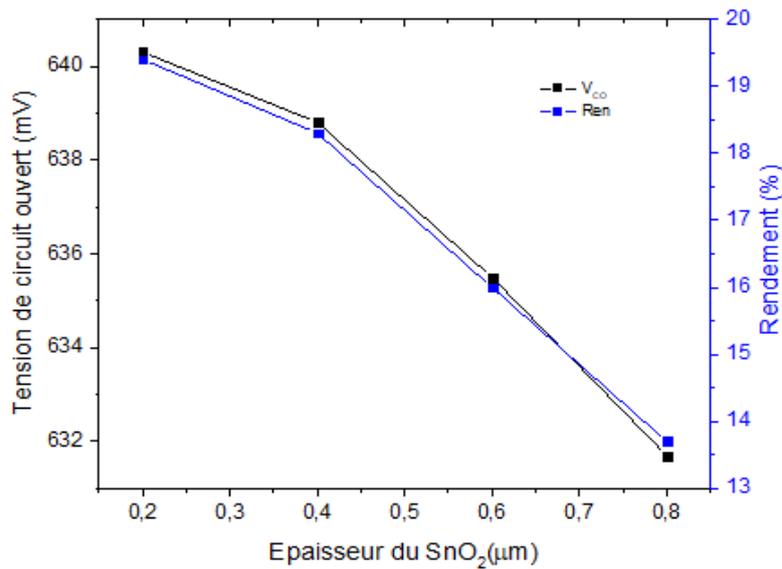


Figure.III.21 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du SnO₂.

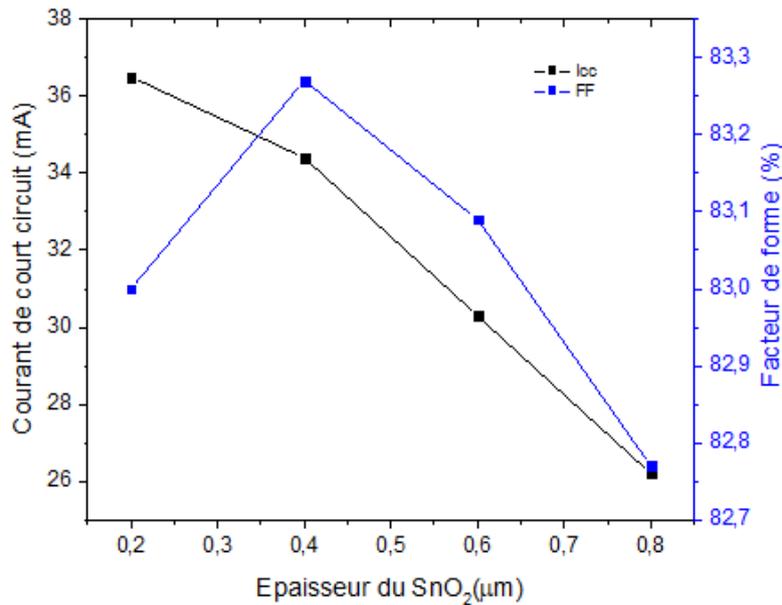


Figure.III.22 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du SnO₂.

Lorsque l'épaisseur de la couche antireflet augmente on remarque une diminution de I_{cc} ; V_{co} ; FF de telle sorte que l'influence de l'augmentation de l'épaisseur de la couche antireflet (SnO₂) soit négative sur les caractéristiques de la cellule solaire. Cela s'explique par l'augmentation de l'absorption du surplus avant d'arriver à la couche active. Aussi le dépassement d'intervalle spécifique de l'épaisseur peut rendre le TCO impénétrable par la lumière.

III.5.3 Cellule de type SnO₂-Si (N⁺)-Si(P) :

III.5.3.1 Caractéristique courant-tension de la cellule solaire :

La caractéristique I-V de la cellule solaire SnO₂-Si(N)-Si(P) simulée sous PC1D est représentée sur la Figure.III.23.

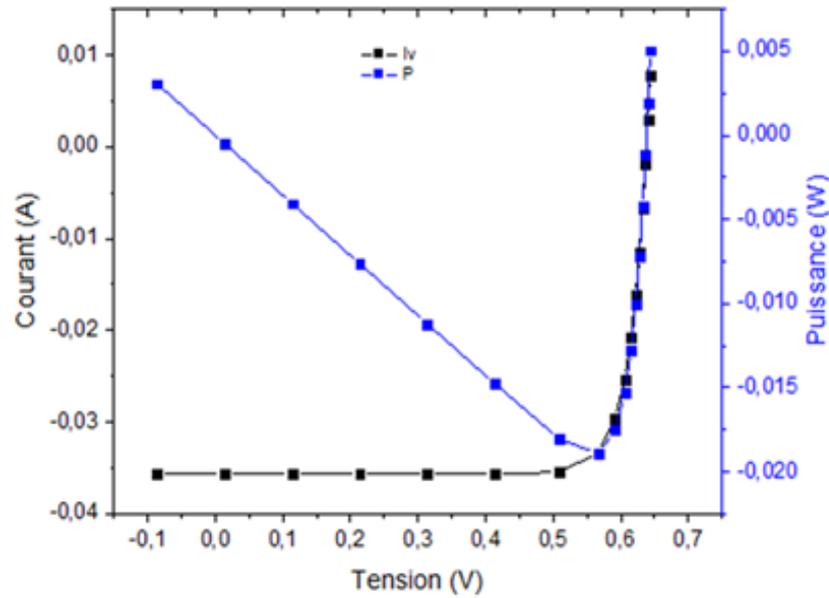


Figure.III.23 : La caractéristique I(V) de SnO₂-Si(N⁺)-Si(P) sous PCID.

La caractéristique I(V) de la jonction SnO₂-Si (N⁺)-Si(P), sous un éclairage de AM_{1,5} (1000W/m²) nous donne un courant de court-circuit I_{cc} = 35.7 mA, une tension de circuit ouvert V_{co} = 638.1 mV et facteur de forme FF = 0.832 et un rendement photovoltaïque η = 18.9%.

III.5.3.2 Influence des Paramètres sur les performances de la cellule solaire :

a. Influence de la réflexion du TCO :

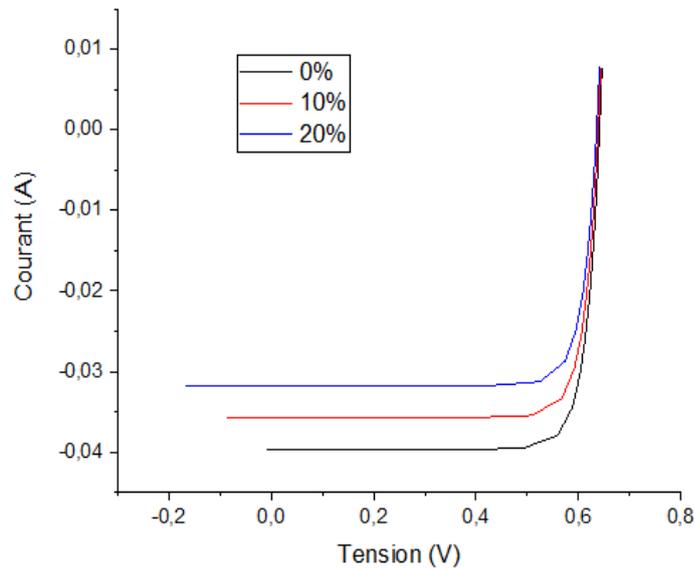


Figure.III.24 : Influence de la réflexion sur la caractéristique I(V) du SnO₂-Si(N⁺)-Si(P).

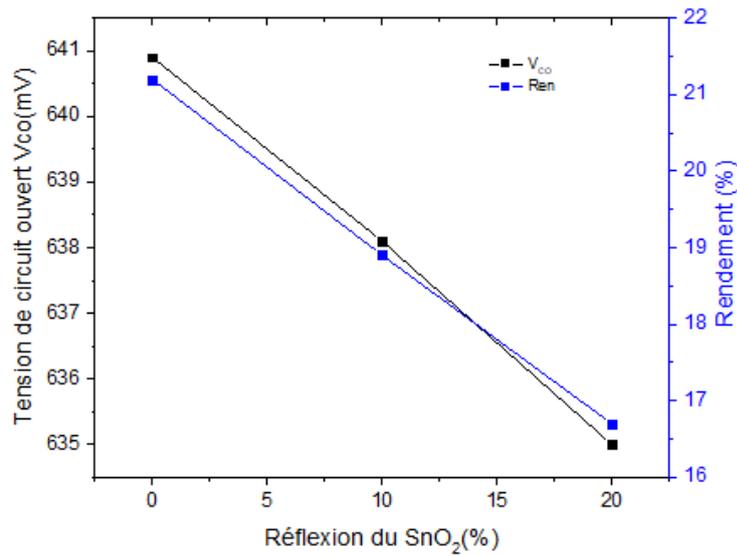


Figure.III.25 : Variations de V_{co} et η en fonction de la réflexion du SnO₂.

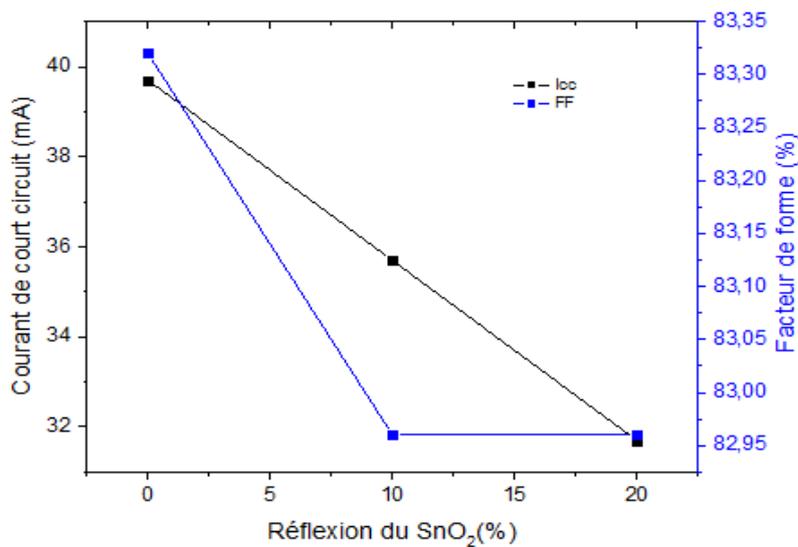


Figure.III.26 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de la réflexion du SnO₂.

Les résultats de la simulation de l'effet de la réflexion de la couche antireflet sur le rendement de la cellule montre qu'on augmentant la réflexion le rendement diminue. Lorsque la réflexion augmente les paramètres de la cellule solaire diminuent, mais le rendement reste meilleur que la cellule Si(N⁺)-Si(P), tant que la couche (SnO₂) participe beaucoup plus à faire transmise des photons.

b. Influence de l'épaisseur du silicium :

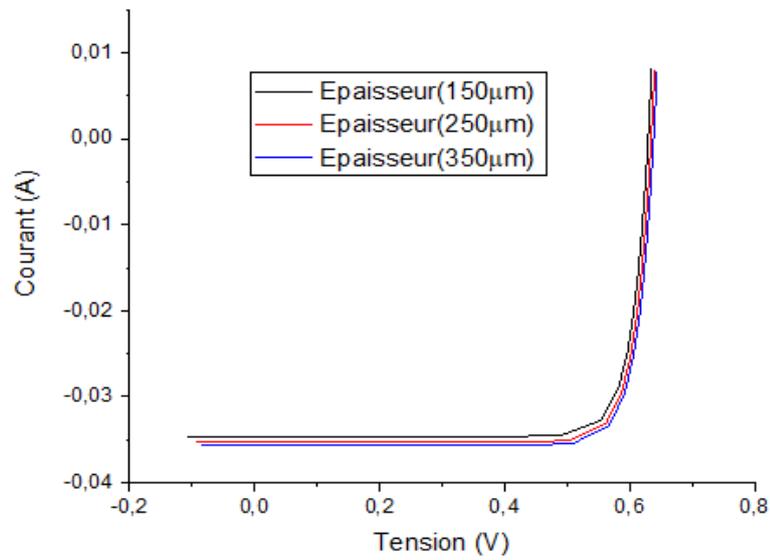


Figure.III.27 : Influence de l'épaisseur du Si sur la caractéristique I(V) du SnO₂-Si(N⁺)-Si(P).

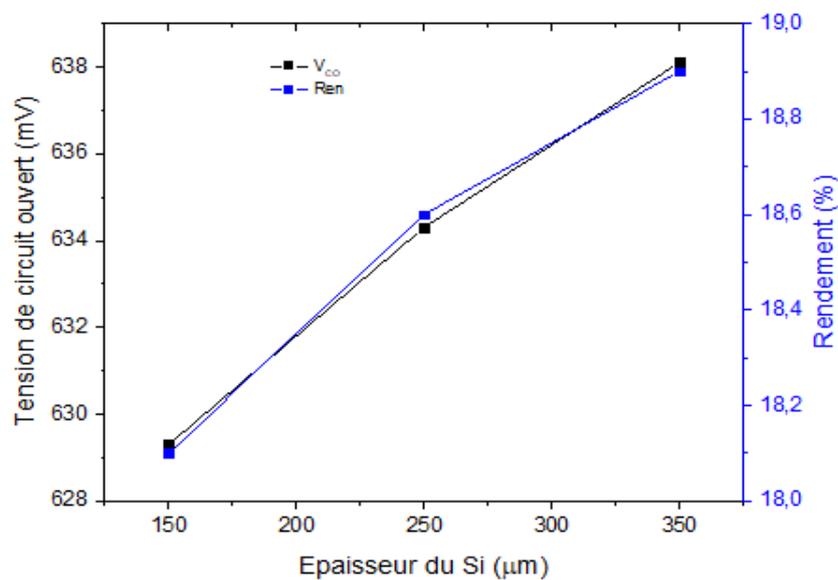


Figure.III.28 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du Si.

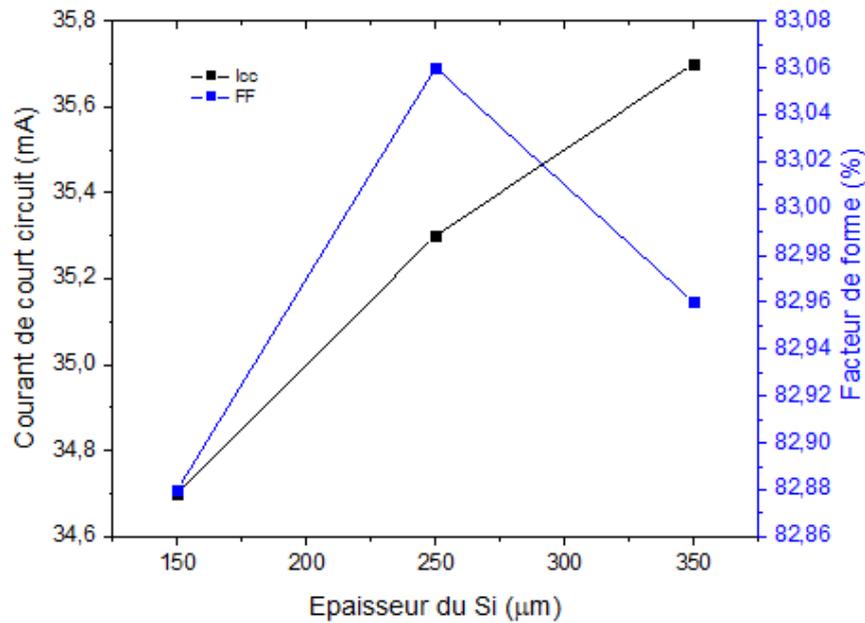


Figure.III.29 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du Si.

Quand l'épaisseur de substrat augmente le rendement des cellules solaires s'améliorent. Cela s'explique par l'augmentation des défauts du réseau, ce qui en résulte une augmentation de porteurs de charges ; d'où une augmentation du courant de court-circuit I_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} .

c. Influence de dopage du silicium :

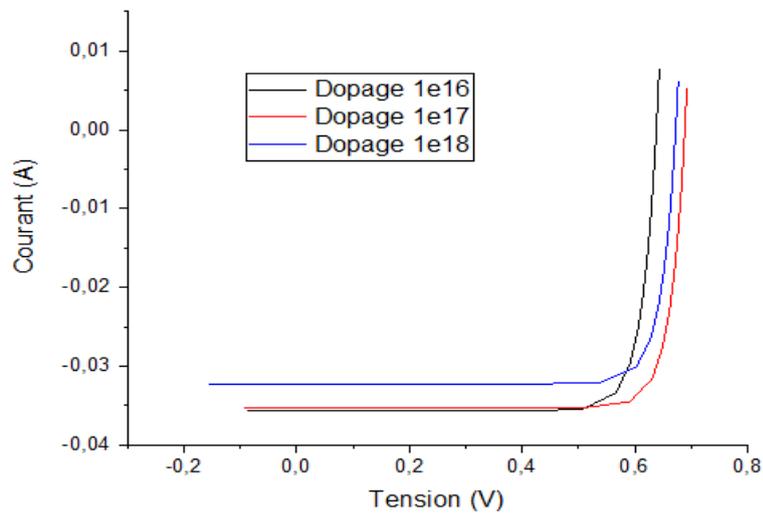


Figure.III.30 : Influence de dopage sur la caractéristique $I(V)$ du $SnO_2-Si(N^+)-Si(P)$.

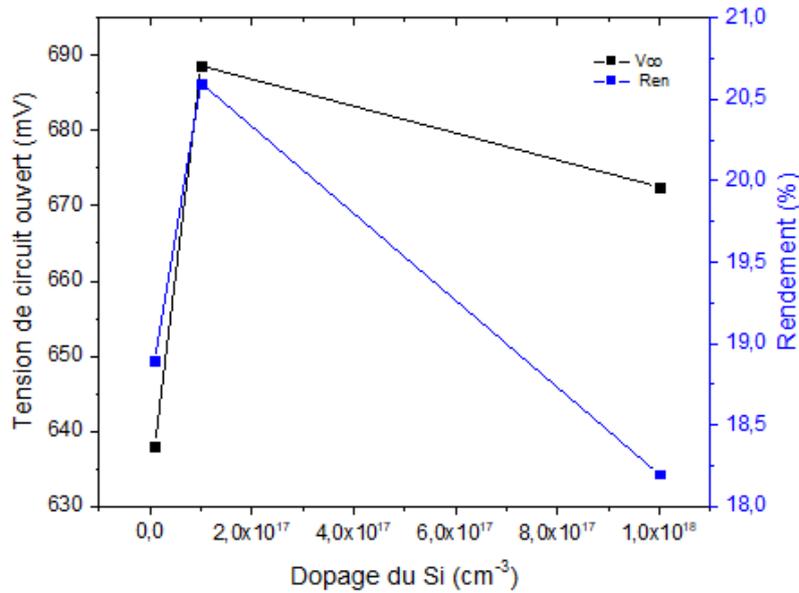


Figure.III.31 : Variations de V_{co} et η en fonction de dopage du Si.

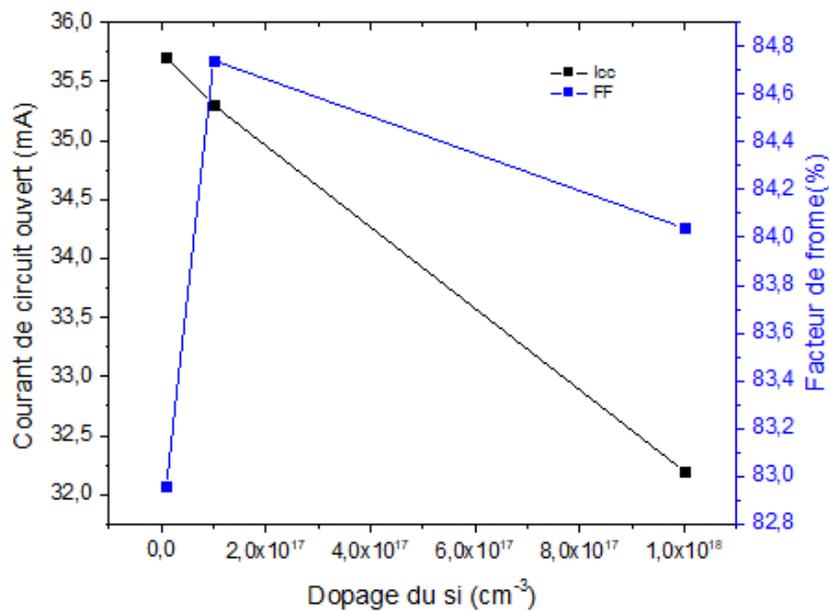


Figure.III.32 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de dopage du Si.

Lorsqu'on augmente le dopage du substrat, la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit augmente et par conséquent le rendement croit grâce à l'augmentation de la mobilité des électrons et de la durée de vie des porteurs de charges, ces résultats sont obtenus pour des dopages moyens alors que pour les forts dopages le rendement de la cellule diminue à cause de la croissance des recombinaisons Auger.

d. Influence de l'épaisseur de la couche antireflet (SnO_2) :

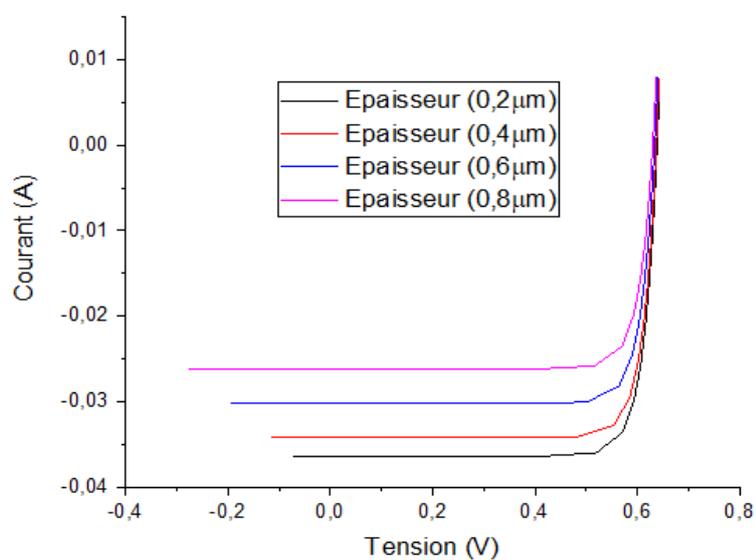


Figure.III.33 : Influence de l'épaisseur du SnO_2 sur la caractéristique $I(V)$ du $\text{SnO}_2\text{-Si}(N^+)\text{-Si}(P)$.

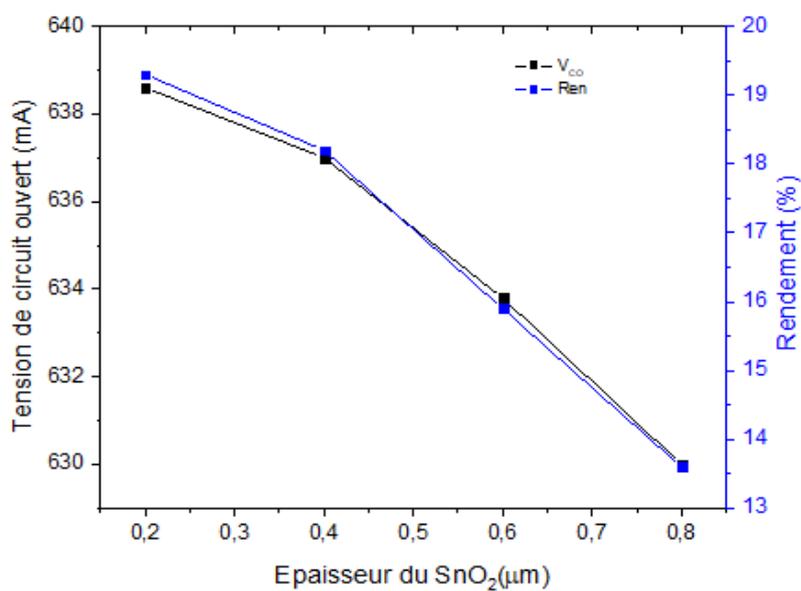


Figure.III.34 : Variations de V_{co} et η en fonction de l'épaisseur du SnO_2 .

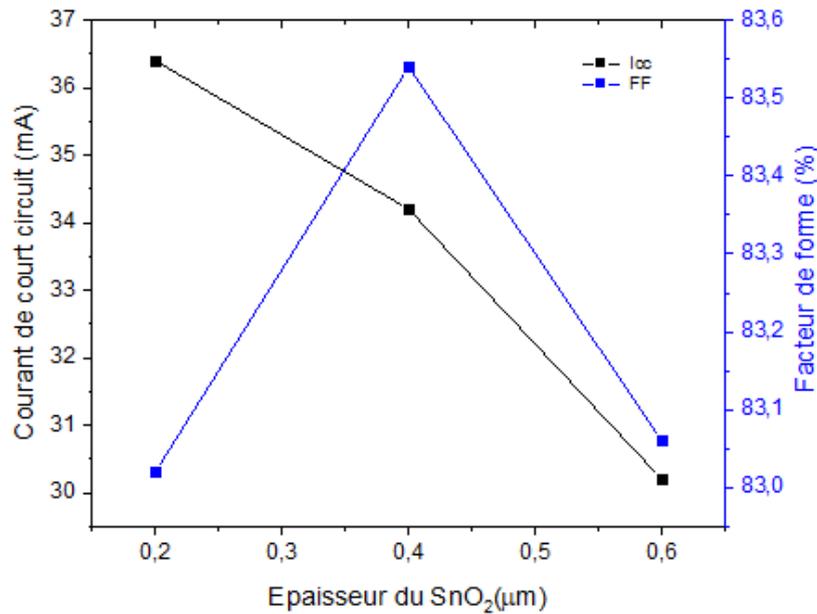


Figure.III.35 : Variations de I_{cc} et FF en fonction de l'épaisseur du SnO₂.

Comme on peut le voir sur les Figures (III.33 ; III.34 ; III.35), l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne la décroissance de la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit et par suite le rendement. L'explication de ce résultat est que la couche d'émetteur doit faire passer toute l'intensité de la lumière qu'elle reçoit à la base ce qui empêche ce passage lorsqu'elle sera épaisse.

III.6 Comparaisons des résultats obtenus :

| Cellule solaire | Rendement η | V _{co} | I _{cc} | FF |
|---------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------|
| Si(N+)-Si(P) | 13.2% | 622.4mV | 25.7mA | 0.825 |
| SnO ₂ - Si(N+)-Si(P) | 18.9% | 638.1mV | 35.7mA | 0.829 |
| SnO ₂ - Si(P) | 19% | 639.9mV | 35.8mA | 0.832 |

Tableau.III.2 : Comparaisons des résultats.

Après lecture des résultats récapitulés dans le tableau ci-dessus, on remarque que l'adjonction de l'oxyde d'étain comme fenêtre optique a amélioré le rendement de plus de 5% en augmentant le courant de court-circuit I_{cc} de 10 mA et la tension à circuit ouvert V_{co} de 15.7mV par rapport à une jonction classique du silicium. Ces résultats expliquent le rôle que joue la couche antireflet sur le rendement de la cellule en minimisant de plus en plus la réflexion du flux incident afin de laisser passer la totalité de ce flux vers la couche active.

Néanmoins, on constate que l'effet de SnO₂ est bien plus important comme dans les hétérostructures simples sur un substrat de silicium de type P avec une tension de circuit ouvert

qui dépasse les 639 mV. Par contre ce type d'hétérostructure présente une grande instabilité. D'où son rejet dans les procédés technologiques [56].

*Conclusion
Générale*

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons fait une simulation de trois types de cellules solaires : Si(N+)/Si(P), SnO₂/Si(P) et SnO₂/ Si(N+)/Si(P) en utilisant le programme de la simulation numérique PC1D (Personnel computer in one dimensionnel). 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.

Cette étude nous a permis de faire une comparaison entre les résultats de simulation des trois cellules qu'on a simulé. Cette comparaison montre que la cellule de faible production (rendement) est celle qui est dépourvue de la couche antireflet (TCO), puisque la couche antireflet transmet le maximum de radiation lumineuse au silicium. Elle participe à la réduction de la réflexion dans le but d'améliorer les paramètres des cellules solaires. Quand on a procédé à l'analyse de l'influence (la réflexion du silicium et de la couche antireflet, l'épaisseur du substrat, le dopage de silicium, et la réflexion) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire (Facteur de forme FF, Tension de circuit ouvert V_{co} , Courant de court-circuit I_{cc} , rendement η), les résultats de simulation ont montré que ces paramètres ont un rôle fondamental sur les performances de la cellule. D'autre part, les résultats de la simulation étaient satisfaisants puis qu'il est arrivé le meilleur rendement à la cellule SnO₂/Si(P) de 19% et le courant de court-circuit $I_{cc} = 35.8$ mA, la tension de circuit ouvert $V_{co} = 639.9$ mV et le facteur de forme $FF = 0.832$. Ce travail ouvre une voie à de points de vue riche dans le domaine des cellules photovoltaïques à travers l'utilisation d'un autre TCO, ou bien l'intégration d'une autre couche de TCO dans l'intersection hétérojonction dans le but d'augmenter l'amélioration de la production des cellules solaires.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Smil V. Energy resources and uses: a global primer for the twenty-first century. *Current History* 101(653):126-132., 2002.
- [2] Honsberg C, Bowden S. **PVCDROM**. Disponible sur <http://pvcdrom.pveducation.org/index.html>, 2009.
- [3] m.a. Green, « Solar Cells », s Ed. Prentice Hall (1982).
- [4] S. Mohamed Ait-cheikh « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [5] American Society for Testing ASTM & Materials. *Solar, spectral irradiance : Air mass 1.5*. 2017. [www](http://www.)
- [6] 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.
- [7] LA Lamont, History of Photovoltaics, in *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, Volume 1 (2012) 31 - 45.
- [8] <http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com/historique.html>
- [9] www.pvresources.com
- [10] Adolf Goetzberger and al, *Crystalline Silicon Solar Cells*, John Wiley & Sons, 1997
- [11] S.Quoizola, Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium monocristallin pour report sur Substrats économiques et application photovoltaïque bas cout, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatisme, L'institut National des Sciences appliquées de Lyon, N d'ordre :(03ISAL0078) 2003.
- [12] J. F. Lelievre, « Elaboration de SiNx : H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour application photovoltaïques ». Thèse de Doctorat, Institut National des Science Appliquées de Lyon, (2007).
- [13] A.Birane «Caractérisation et tri de cellules solaires par leur temps de recouvrement inverse » Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [14] M. LASLAD, simulation numérique des cellules solaires troisième génération pour des applications spatiales, thèse de magister, université de Sétif, 2014.
- [15] HANDBOOK OF SEMICONDUCTOR WAFER CLINING TECHNOLOGY (Science, Technology, and Applications); Werner Kren; NOYES PUBLICATIONS; Westwood New Jersey, U.S.
- [16] N. BANDADLA, optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires conventionnelles à base de mc_si, mémoire de magister, université de Tlemcen, 2012.

Références bibliographiques

- [17] EPIA (European Photovoltaic Industry Association). Global market outlook for photovoltaics until 2013. Disponible sur <http://www.epia.org/publications/epiapublications.html>, 2009.
- [18] 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.
- [19] M. BELARBI, Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.
- [20] M. C. ABDELLI, Etude des cellules photovoltaïques organiques, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.
- [21] F. NEMMAR BELHOCINE, Etude et réalisation de cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques, thèse de doctorat, université de Tizi-Ouzou.
- [22] M. Boussaid, mémoire magister, «Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules photovoltaïques», Université de Tlemcen, (2012).
- [23] Haynos J, Allison J, Arndt R, Meulenberg A. The Comsat non-reflective silicon solar cell: a second generation improved cell. International Conference on Photovoltaic Power Generation, Hamburg, pages 487-490, 1974.
- [24] T. Desrues. " Développement des cellules solaires à hétérojonctions " N° d'ordre 2009ISAL0084
- [25] F. Ynineb, « Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO) », Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, (2010).
- [26] M. Purica, E. Budianu, E. Rusu, M. Danila and R. Gavrila; Thin Solid Films (2002).
- [27] S. Ponce-Alcántara, C. del Cañizo and A. Luque, «Integration of silicon nitride layers in multicrystalline silicon solar cell processes», 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, (2006).
- [28] S. BENSALÉM, Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, thèse de magister, université de Stéif, 2011.
- [29] : D.S.Ginley, J.D.Perkins, Handbook of Transparent Conductors, 9 (2010).
- [30] Baedeker K Uber die elektrische Leitfähigkeit und die thermoelektrische Kraft einiger Schwermetallverbindungen. Ann Phys 22(1907)749–766. 3
- [31] D. Vaufrey, «Réalisation d'OLED à émission par la surface : Optimisation de structures ITO / semiconducteurs organiques », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, (2003).
- [32] H. Kawazoe, M. Yasukawa, H. Hyodo, M. Kurita, H. Yanagi, and H. Hosono. « P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO₂ ». Nature, 389(1-2) :939, 1997.

Références bibliographiques

- [33] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono. « Thin-film transistor fabricated in single-crystalline transparent oxide semiconductor ». *Science*, 300(5623) :1269–1272, 2003.
- [34] : R. Tala-Ighil et al., *Solar Energy Materials Solar Cells*, 90 (2006), 1797-1814.
- [35] : P. Drude, *Ann. Phys.*, 3(1900), 369.
- [36] : T.J. Coutts, D.L. Young, and X. Li, *MRS Bulletin*, 25(8), (2000), 58-65
- [37] G.A. Niklasson and C.G. Granqvist, *Journal of Materials Chemistry*, 17(2), p. 127156, (2007).
- [38] I. Saadeddin, “Preparation and characterization of now transparent conducting oxides based on SnO₂ and In₂O₃: ceramics and thin films”, thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, (2007).
- [39] Kohnke E.E, *Phys. Chem. Solids*, 23, 1557-1562, (1962).
- [40] K. Reimann and M., Steube, *Solid State Commun.*, 105, 649-652, (1998).
- [41] K. LAGHA- Menouer, « Etude et réalisation d’une cellule solaire multicouches du type Si-SiO₂-SnO₂-ZnO par APCVD ». Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2011).
- [42] M. Gaidi « Films minces de SnO₂ dopés au platine ou au palladium et utilisés pour la détection des gaz polluants : analyses in-situ des corrélations entre la réponse électrique et le comportement des agrégats métalliques », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, (1999).
- [43] L. Gupta, A. Mansingh and P. K. Srivastava, *Thin Solid Films*, 176, 33, (1989).
- [44] : K. Daoudi, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard-Lyon 1, 2002.
- [45] J. C. Manificier, L. Szepessy, J. F. Bresse, M. perotin and R. Stuck, *Mater. Res. Bull*, 14, 163, (1979).
- [46] A. Solhi. «Modélisation numérique de la conduction électrique dans l’hétérojonction émetteur-base d’un transistor bipolaire a émetteur en silicium amorphe hydrogéné» Thèse de Doctorat, Universté de Renne I, 1993.
- [47] R. N. Hall, “Electron-Hole Recombination in Germanium,” *Phys. Rev.*, vol. 87, no. 2, pp. 387–387, juillet 1952.
- [48] : H. Cachet, A. Messad, M. Froment and J. Bruneaux, in: A. Hugot Le Goff, C.G.Granqvist and C.M. Lampert, *Proc. SPIE*, 1729 (1992), 114-123.
- [49] : T. Feng, A.K. Ghosh and C. Fishman, *Appl. Phys. Lett.* 35 (1979) 266.
- [50] : A.K Gosh et al., *Journal of Applied Physics*, 49 6(1978), 3490-3498
- [51] : H. Cachet et al., *Solar Energy Materials and Solar cells*, 46 (1997), 101- 114

Références bibliographiques

- [52] Paul A. Basore and Donald A. Clugston, IEEE Photovoltaic Specialists Conf., May 1996.
- [53] Donald A. Clugston and Paul A. Basore, IEEE Photovoltaic Specialists Conf., October 1997.
- [54] F. Bechiri, L. Zighed, M. Remram, Etude d'une structure de cellule solaire à base de silicium.
- [55] 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.
- [56] G. K. Bhagavat and K. B. Sundaram; "electrical and photovoltaic properties of tin oxide-silicon heterojunctions" ; Thin Solid Films, 63 (1979) 197-201.

Résumé :

Dans ce travail nous avons fait une étude de simulation sur les cellules solaires photovoltaïques de type Si(N+)/Si(P), SnO₂/Si(P), SnO₂/Si(N+)/Si(P) en utilisant le logiciel PC1D. Un calcul du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert et enfin le facteur de forme à été fait. Puis nous avons étudié l'influence des paramètres des cellules sur la performance de ces cellules. Les résultats de la simulation nous ont montré que ce type de cellules solaires à hétérojonction peut avoir un rendement théorique d'un rapport de 19%, et ce, lorsqu'on choisit les paramètres de la couche antireflet d'une manière parfaite.

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

Abstract :

In this work, we made a simulation study on Si (N+) / Si (P), SnO₂ / Si (P), SnO₂ / Si (N+) / Si (P) photovoltaic solar cells using PC1D software. A calculation of the efficiency, the short circuit current and the open circuit voltage and finally the form factor has been made. Then we studied the influence of cell parameters on the performance of these cells. The simulation results showed us that this type of heterojunction solar cell can have a theoretical efficiency of a ratio of 19%, and this, when we choose the parameters of the anti-reflective layer in a perfect way.

Keywords : Photovoltaic, solar cells, anti-reflective coating, TCO, PC1D.

ملخص:

في هذا العمل، أجرينا دراسة محاكاة على الخلايا الشمسية الكهروضوئية Si (N+) / Si (P) و SnO₂ / Si (P) و SnO₂ / Si (N+) / Si (P) باستخدام برنامج PC1D. تم حساب الكفاءة وتيار الدائرة القصيرة وتوتر الدائرة المفتوحة وأخيراً عامل الشكل. ثم درسنا تأثير معلمات الخلية على أداء هذه الخلايا. أظهرت نتائج المحاكاة أن هذا النوع من الخلايا الشمسية غير المتجانسة يمكن أن يكون له كفاءة نظرية بنسبة 19%، وهذا عندما نختار معلمات الطبقة المضادة للانعكاس بطريقة مثالية.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، الخلايا الشمسية، الطلاء المضاد للانعكاس، TCO، PC1D
