



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux

Modélisation des propriétés électriques d'une couche anti-réfléchissante ZnO(n) sur le silicium Si

Présenté par :

Lansana GASSAMA

Sous la direction du :

Pr Diouma KOBOR et Dr Moussa TOURE

Soutenu publiquement le 06/02/2021 devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
THIAME Moustapha	Maître de Conférences CAMES	Président de jury	UASZ
TINE Modou	Assistant	Examineur	UASZ
THIAO Serigne	Assistant	Examineur	UASZ
DIATTA Joseph Sambasene	Maître-Assistant	Rapporteur	UASZ
TOURE Moussa	Docteur	Co-directeur	UASZ
KOBOR Diouma	Professeur Titulaire	Directeur	UASZ

Année universitaire 2019-2020

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, pour leurs conseils, pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien.

À ma jumelle.

À l'ensemble de mes tuteurs de la 6^{ème} jusqu'à l'université. Soyez assuré de notre profonde gratitude.

À mes très chers frères : Abdoulaye et Bambo.

À mes très chères sœurs : Haby, Diakhomba, Sira et fily.

À ma femme Mariatou Diawara.

A tous mes enseignants du primaire jusqu'à l'université qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

À ma belle-famille.

À tous mes amis.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Je tiens à remercier ma mère Fanta Yattabaré que la terre lui soit légère et mon père Cheikhou qui m'ont toujours soutenu.

Ce travail a été réalisé sous la direction du **Professeur Diouma Kobor** à l'université Assane Seck de Ziguinchor, actuel directeur de l'école doctorale. Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et ses qualités humaines.

J'exprime mes sincères remerciements à mon co-encadrant **Dr Moussa Touré**, à l'université Assane Seck de Ziguinchor pour ses conseils éclairés qui m'ont été d'une aide très précieuse.

Je suis sensible à l'honneur que me fait **Dr Moustapha Thiame**, Maître de Conférences CAMES à l'université Assane Seck de Ziguinchor qui mérite un remerciement de ma part, en acceptant de présider ce jury.

Je tiens à remercier chaleureusement les **docteurs Modou Tine** et **Serigne Thiao**, Assistants à l'université Assane Seck de Ziguinchor de participer à ce jury en tant que examinateur.

Il m'est particulièrement agréable de remercier **Dr Joseph Sambasene Diatta**, Maître-Assistant à l'université Assane Seck de Ziguinchor en tant que rapporteur de ce jury. Vos remarques et vos suggestions me seront d'un grand intérêt.

Je remercie mes grands frères Bambo, Abdoulaye et mes grandes sœurs, Haby, Diakhomba, Sira, fily, ma lune brillante Mariatou Diawara ainsi que ma jumelle préférée Founé, pour leurs conseils et leurs soutiens.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des professeurs des départements de mathématique, physique, chimie et informatique pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à mon égard tout au long de mon cursus universitaire.

Je remercie sincèrement Monsieur Abraham Adiock Sambou pour son guide et Aba Gaye pour sa générosité et sa gentillesse.

J'exprime ma reconnaissance et ma sympathie à mes camarades de master, à mes frères, à mes tuteurs et à toute personne qui m'ont soutenu.

Je ne peux point terminer sans remercier aussi tous les docteurs, les doctorants et les doctorantes du département de physique pour leur générosité, leur gentillesse, leur soutien et leur conseil.

Résumé

Ce travail de mémoire a pour finalité la modélisation des propriétés électriques d'une cellule au silicium avec une couche antireflet texturée de forme pyramide inversée. Pour cela nous avons combinés les effets positifs à savoir la texturation et la passivation de la couche antireflet du ZnO(n). La cellule solaire est de type ZnO(n)/Si(n)/Si(p). Nous prenons en compte une large bande de longueurs d'ondes incidentes allant de 300,00 nm à 1200,00 nm, avec un éclairage incident constant de $0,10 \text{ W.cm}^{-2}$, sous la condition standard AM1.5G et avec une réflectance de 5 %. La simulation avec le logiciel PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel) montre que ce type de cellule solaire peut avoir un rendement théorique de 24,70 %, un facteur de forme de 85,49 % pour une épaisseur de 300,00 μm . Une bonne optimisation des paramètres fondamentaux comme le taux de dopage, l'angle de texturation du ZnO, la profondeur de texture du ZnO et l'épaisseur permettent d'améliorer les paramètres électriques de la cellule. En effet, la concentration optimale du silicium dopé P et N est respectivement de $7,72 \times 10^{16} \text{ at.cm}^{-3}$ et $1,39 \times 10^{17} \text{ at.cm}^{-3}$ alors qu'une forte concentration de $2,20 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$ est nécessaire pour la couche d'oxyde de zinc (ZnO). Une étude comparative de nos résultats avec ceux de la littérature montre que la couche antireflet joue un rôle fondamental pour l'amélioration des performances des dispositifs photovoltaïques. Dans la littérature une étude sans couche antireflet a été faite ; un rendement de 16,40 % a été obtenu. La simulation nous a permis d'obtenir un rendement de 24,70 % avec une couche antireflet pour une épaisseur de 0,015 μm du ZnO(n). Dans la littérature, nous avons trouvé un rendement de 19,04 % pour une épaisseur de 0,015 μm du ZnO(n). Les temps de recombinaisons des trous et des électrons étaient réglés respectivement à $\tau_p = 10^{-6} \mu\text{s}$; à $\tau_n = 10^{-3} \mu\text{s}$ et à 100 μs pour la région 1 et région (2, 3). Les paramètres résultants des cellules solaires ont été mesurés à 300 °K. **Mots-clés** : Simulation, PC1D, nanopyramides, cellule solaire, couche antireflet.

Abstract

This work of memory has for finality; modeling the electrical properties of a silicon cell with a textured antireflection layer in the shape of inverted pyramids. For this we have combined the positive effects, namely the texturing and the passivation of the ZnO (n) antireflection layer. The solar cell is of the ZnO (n)/Si (n)/Si (p) type. We take into account a wide band of incident wavelengths ranging from 300.00 nm to 1200.00 nm, with a constant incident illumination of 0.10 W.cm^{-2} , under the standard condition AM1.5G and with a reflectance of 5 %. The simulation with the PC1D software (Personal Computer One Dimension) shows that this type of solar cell can have a theoretical efficiency 24.70 %, a form factor of 85.49 % for a thickness of 300.00 μm . Good optimization of fundamental parameters such as doping rate, texturing angle of ZnO, texture depth of ZnO and thickness can improve the electrical parameters of the cell. Indeed, the optimal concentration of P and N doped silicon is respectively $7.72 \times 10^{16} \text{ at.cm}^{-3}$ and $1.39 \times 10^{17} \text{ at.cm}^{-3}$ while a high concentration of $2.20 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$ is required for the Zinc Oxide (ZnO) layer. A comparative study of our results with those of the literature shows that the anti-reflective layer plays a fundamental role in improving the performance of photovoltaic devices. In the literature, a study without an anti-reflective coating was carried out; a yield of 16.40 % was obtained. The simulation allowed us to obtain a yield of 24.70 % with an anti-reflective coating for a thickness of 0.015 μm of ZnO (n). In the literature, we have found a yield of 19.04 % for a thickness of 0.015 μm of ZnO (n). The times of recombination of the holes and of the electrons were set respectively at $\tau_p = 10^{-6} \mu\text{s}$; at $\tau_n = 10^{-3} \mu\text{s}$ and at 100 μs for region 1 and region (2, 3). The resulting parameters of the solar cells were measured at 300 °K.

Keywords: Simulation, PC1D, nanopyramides, Solar Cell, anti-reflecting layer.

LISTE ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

AM: Masse d'Air

CAR : Couche Antireflet

I_{cc} : Courant court-circuit (A)

J_{cc} : Densité de court-circuit (mA/cm²)

FF : Facteur de forme (%)

MgF₂ : di-Fluorure de Magnésium

SiN_x : Nitrure de Silicium

TiO₂ : Oxyde de Titane

SiO₂ : Oxyde de Silicium

In₂O₃ : Oxyde d'Indium

SnO₃ : Oxyde d'Etain

Cd₂SnO₂ : Oxyde d'Etain de Cadmium

In₂O₃ : Sn (ITO) : Oxide Indium dopé à l'Etain

In₂O₃ : F : Oxyde d'Indium dopé au Fluore

ZnO: Al : Oxyde de Zinc dopé à l'Aluminium

SnO₂ : Sb : Oxyde d'Etain dopé à l'Antimoine

SnO₂ : Cd : Oxyde d'Etain dopé au Cadmium

SnO₂ : F : Oxyde d'Etain dopé au Fluore

CdInO_x : Oxide de Cadmium et d'Indium

PC1D : Personnel Computer One Dimensionnel

P_{max} : Puissance maximale (Watt)

Liste des Acronymes et Abréviations

PV : photovoltaïque

η : Rendement de conversion (%)

ZnS : Sulfure de Zinc

TCO : Transparence Conductive Oxide

SnO₄ : Tétra-Oxyde d'Etain

V_{co} : Tension de circuit ouvert (V)

MEB : Microscope Electronique à Balayage ou (SEM) Scanning Electron Microscopy en anglais

ITO : Indium Tin Oxide en anglais ou oxyde d'indium dopé à l'étain

α_{pc} : Coefficient d'absorption des porteurs de charge

α : Coefficient d'absorption de la lumière incidente

R_s : Résistance série caractérisant les diverses contacts et connexion, en « Ω »

R_{sh} : Résistance shunt qui modélise les courants de fuites de la jonction, en « Ω »

Si(n) : Silicium dopé N

Si(p) : Silicium dopé P

ZnO(n) : l'oxyde de zinc dopé N

μ_n : la mobilité des électrons en $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

μ_p : la mobilité des trous en $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

n : la concentration des électrons en cm^{-3}

p : la concentration des trous en cm^{-3}

N_c : la densité d'état dans la bande de conduction $\text{at} \cdot \text{cm}^{-3}$

N_v : la densité d'état dans la bande de valence en $\text{at} \cdot \text{cm}^{-3}$

E_v : niveau d'énergie de la bande de valence

E_c : niveau d'énergie de la bande de conduction

E_f : niveau d'énergie de fermi à 0 ° K, elle est en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$

k_B : la constant de Boltzmann en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$

τ_n : le taux de recombinaison des électrons en μs

τ_p : le taux de recombinaison des trous en μs

Table des matières:

DÉDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
LISTE ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS	v
Table des matières:	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
Introduction générale.....	- 1 -
Chapitre I Généralités sur les couches antireflets et cellule solaire	- 2 -
I.1 Contexte des couches antireflets	- 2 -
I.1.1 Principe de fonctionnement des couches antireflets	- 3 -
I.1.2 Différentes couches antireflets	- 4 -
I.1.3 Caractéristiques des couches antireflets.....	- 4 -
I.1.4 Les TCO (Transparence Conductor Oxide).....	- 6 -
I.1.4.1 Le choix du ZnO	- 6 -
I.1.4.2 Dopage de l'oxyde zinc (ZnO)	- 6 -
I.2 Quelques propriétés de l'oxyde de zinc (ZnO)	- 8 -
I.2.1 Structure cristalline du ZnO	- 8 -
I.2.2 Propriétés électriques du ZnO.....	- 9 -
I.2.3 Propriétés optiques du ZnO	- 11 -
I.3 Quelques méthodes d'élaborations des couches antireflets	- 11 -
I.3.1 Dépôt chimique en phase vapeur	- 11 -
I.3.2 Pulvérisation cathodique	- 12 -
I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	- 13 -
I.5 Caractéristique d'une cellule solaire	- 14 -
I.6 Paramètres d'une cellule solaire	- 15 -
Conclusion.....	- 16 -
Chapitre II Modélisation d'une cellule solaire de type ZnO (n)\Si (n)\Si (p)	- 17 -
II.1 Présentation du logiciel PC1D.....	- 17 -
II.1.1 Fonctionnement du PC1D	- 18 -
II.1.2 Caractéristiques de PC1D.....	- 18 -

II.1.3 Représentation du logiciel SciDAVis.....	- 20 -
Conclusion.....	- 20 -
Chapitre III Résultats et discussions	- 21 -
III.1 Structure de la cellule solaire simulée.....	- 21 -
III.2 Caractéristique puissance et courant en fonction de la tension.....	- 22 -
III.3 Influence de l'épaisseur du Si(P) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p).....	- 23 -
III.4 Influence de l'épaisseur Si(n) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p).....	- 25 -
III.5 Influence de l'épaisseur ZnO(n) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p).....	- 26 -
III.6 Influence du dopage N_A de Si(p) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p).....	- 28 -
III.7 Influence du dopage N_D de Si(n) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p).....	- 30 -
III.8 Influence de l'angle de texturation de ZnO(n) sur les paramètres électriques ZnO(n)/Si(n)/Si(p).....	- 32 -
III.9 Influence de la profondeur du front de texturation de ZnO(n) sur les paramètres électriques ZnO(n) /Si(n)/Si(p).....	- 34 -
III.10 Paramètres optimisés de la cellule solaire.....	- 36 -
III.11 Influence des paramètres optimisés sur les caractéristiques électriques	- 37 -
III.12 Comparaison des résultats de la modélisation avec ceux de la littérature	- 38 -
Conclusion.....	- 39 -
Conclusion Générale	- 39 -
Références Bibliographiques:	- 41 -
Annexes.....	I

Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'une couche antireflet d'une cellule [6]	- 3 -
Figure 2 : Principe d'interférences destructives [7]	- 3 -
Figure 3 : Schéma de texturation d'une surface [4]	- 5 -
Figure 4 : Substitution du zinc (Zn) par l'atome d'aluminium (Al) dans la structure de wurtzite [14]	- 8 -
Figure 5 : Différentes structures du ZnO [15].....	- 9 -
Figure 6 : Dépôt chimique phase en vapeur [4]	- 12 -
Figure 7 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique [8]	- 13 -
Figure 8 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].....	- 14 -
Figure 9 : Caractéristique $J_{cc}(V)$ d'une cellule solaire à l'obscurité (diode), sous éclairement et la valeur de la résistance série, shunt (R_s et R_{sh}) [14]	- 14 -
Figure 10 : Présentation de la cellule solaire étudiée	- 22 -
Figure 11 : La Puissance et le courant en fonction de la tension	- 22 -
Figure 12 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'épaisseur de Si(p) en micromètre.....	- 24 -
Figure 13 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'épaisseur du Si(n) en micromètre	- 26 -
Figure 14 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'épaisseur du ZnO(n) en micromètre	- 28 -
Figure 15 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction du taux de dopage du Si(p)	- 30 -
Figure 16 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction du taux de dopage de Si(n).....	- 32 -
Figure 17 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'angle de texturation ($^\circ$).....	- 34 -
Figure 18 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de la profondeur de texturation	- 36 -
Figure 19 : Caractéristique puissance et courant en fonction de la tension de la cellule ZnO(n)\Si(n)\Si(p).....	- 38 -
Figure 20 : Fenêtre du logiciel PC1D.....	I
Figure 21 : Fenêtre du logiciel SciDAVis	II

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristique puissance et courant en fonction de la tension **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2 : Variation des paramètres électriques ZnO(n)/Si(n)/Si(p) en fonction de l'épaisseur de Si(p) **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 3 : Variation des paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p) en fonction de l'épaisseur de Si(n)des **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 4 : Variations des paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p) en fonction de l'épaisseur de ZnO(n) **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 5 : Variation des paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p) en fonction du taux de dopage NA (accepteur) **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 6: Impact du dopage N_D de ZnO(n) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p) **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 7 : Impact de l'angle de texturation de ZnO(n) sur les paramètres électriques ZnO(n)/Si(n)/Si(p) **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 8 : Impact de la profondeur du front de texturation de ZnO(n) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p) - 36 -

Tableau 9 : Les paramètres optimisés de la cellule solaire ZnO(n)\Si(n)\Si(p) - 36 -

Tableau 10 : Variation des paramètres de la cellule solaire ZnO(n)\Si(n)\Si(p) - 37 -

Tableau 11 : Caractéristiques Puissance et courant en fonction de la tension - 38 -

Tableau 12 : Les paramètres obtenus après optimisation de la cellule solaire - 38 -

Tableau 13 : Influence de la couche antireflet ZnO - 39 -

Introduction générale

Ce travail de mémoire est basé sur la modélisation des propriétés électriques de la couche antireflet ZnO(n) déposée sur le silicium. Pour cela les effets positifs des deux techniques d'augmentation de l'absorption optique sont combinés à savoir la texturation de la surface et la passivation. La passivation permet d'améliorer la qualité électronique de la surface en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. La cellule solaire modélisée est à base de silicium (Si). L'objectif de notre travail est d'étudier les effets de l'oxyde de zinc utilisé comme couche antireflet et quelques paramètres du silicium sur les propriétés électriques de la cellule solaire à hétérojonction. Pour cela la simulation de la jonction PN a été faite au silicium avec en premier lieu une couche antireflet ZnO (n) texturée et passivée suivie d'une couche de silicium dopée N puis celle dopée P. La couche antireflet est texturée en face avant de façon pyramidale. L'épaisseur de la couche antireflet a été fait varier pour essayer de voir son impact sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n) /Si(n)/Si(p). En effet l'épaisseur des différentes couches joue un rôle très important sur les paramètres de la cellule. Une couche antireflet issue d'oxyde de zinc a été utilisé afin de contribuer à l'augmentation du courant I_{cc} , de la tension V_{co} en diminuant la réflexion de la cellule solaire par conséquent améliorée la performance et la capacité de conversion. Un procédé a été utilisé pour l'entretien de l'environnement en remplaçant l'énergie fossile par le renouvelable en particulier le photovoltaïque. Le document s'articule en trois parties, d'abord le chapitre1 dans lequel les généralités sur les couches antireflets et cellule solaire a été relaté ensuite nous allons entamer le chapitre 2 dans lequel le logiciel de simulation PC1D a été présenté et en fin le chapitre 3 dans lequel une discussion des résultats obtenus a été faite.

Chapitre I Généralités sur les couches antireflets et cellule solaire

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière. Il vient du nom Alexandre volta « voltaïque » qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de la lumière [1]. Le processus de conversion est appelé effet photovoltaïque et a été remarqué pour la première fois par Antoine Becquerel [2] et son fils Alexandre Becquerel présenté à l'académie des sciences en 1839. Antoine Becquerel fut le premier à remarquer qu'un courant électrique est généré en illuminant des électrodes de platine et d'oxyde de cuivre introduisent dans une solution d'acides. En 1877 Adams et R. Day ont trouvé ce qui n'était pas connu, l'effet photovoltaïque du sélénium. Il a fallu attendre en 1954 pour que les chercheurs D. Chapin et G. Prince placent au sein des laboratoires de la compagnie de Bell, la première cellule photovoltaïque au silicium possédant un rendement de 6 %. Parallèlement d'autres technologies issues du Cu_x/CdS ont eu des rendements similaires. En revanche, les problèmes liés à l'énergie dans le monde sont multiples. En effet les réserves des énergies fossiles sont épuisables. Ces nombreuses raisons donnent un intérêt au développement et à l'exploitation des énergies renouvelables sous ces différentes formes : le photovoltaïque, l'éolienne, l'hydraulique, la biomasse... [3]. Les cellules photovoltaïques issues du silicium cristallin massif sont employées pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ce matériau a un taux d'absorption faible. L'utilisation des matériaux nanostructurés peut permettre d'absorber le maximum du spectre solaire [4].

Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche anti-réfléchissante est utilisée avec deux diélectriques différents. Différentes CAR (Couche Anti-Reflet) sont utilisées en photovoltaïque tels que TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x .

I.1 Contexte des couches antireflets

Le traitement des verres commença au XIX^e siècle lorsque Lord John William Strutt Rayleigh remarqua en 1887 que les vieilles plaques de verre furent moins réfléchives que les nouvelles. Harold Dennis Taylor expert en optique, Thomas Cooke et Sons of York sont des fabricants de télescopes de York. Ils découvrirent pareillement en 1886 que des lentilles ternies anciennes par le temps eurent une grande transmission que des lentilles polies récents. Harold Dennis Taylor en déduisit que l'indice de réfraction de la surface terne dut être moins grand que celui du verre de la lentille. C'est la raison pour laquelle nous avons une diminution du coefficient de réflexion donc une croissance de la transmission [5].

I.1.1 Principe de fonctionnement des couches antireflets

Le principe de fonctionnement des couches antireflets s'appuie sur l'interférence destructive des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Différentes CAR (Couche Anti-Reflet) sont utilisées en photovoltaïque tels que TiO_2 , SiO_2 , ZnO etc. L'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{\text{CAR}} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{\text{CAR}}} \quad (1) \text{ avec } N = 1, 2, 3, \dots$$

Le rayon incident est partiellement réfléchi sur l'interface air et la couche antireflet déposée, partiellement réfléchi sur l'interface de la couche antireflet (indice n_{CAR}) et le substrat (indice n_2) voir figure (1) [6]. Nous obtiendrons l'annulation des deux faisceaux réfléchis en opposition de phase, même intensité et même amplitude maximale sur l'interface air/CAR et l'interface CAR/semi-conducteur [7] voir figure (2).

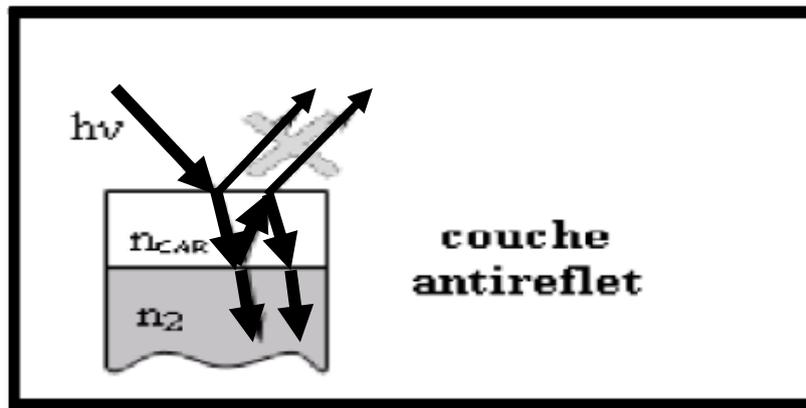


Figure 1 : Schéma d'une couche antireflet d'une cellule [6]

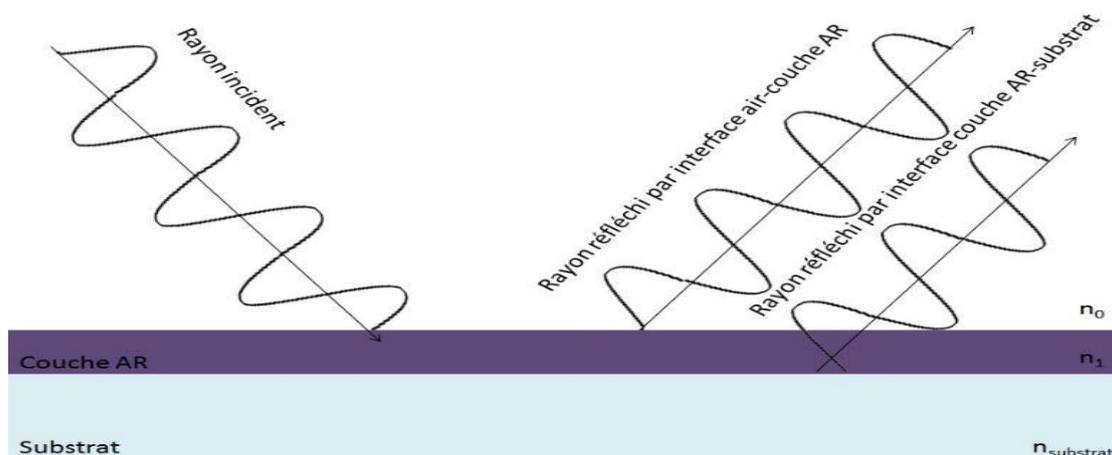


Figure 2 : Principe d'interférences destructives [7]

Pour avoir une interférence destructive, les rayons doivent être émis par la même source lumineuse, les rayons doivent être synchrones (même fréquence f), cohérente (même déphasage), de même amplitude, en opposition de phase et de même intensité. L'égalité des

amplitudes de deux rayons réfléchis, implique que la fraction des indices de réfraction entre chaque interface doit être égale [8].

$$\frac{n_o}{n_1} = \frac{n_1}{n_s} \quad \Rightarrow \quad n_1 = \sqrt{n_o * n_s} \quad (2)$$

I.1.2 Différentes couches antireflets

Au niveau de la surface de la cellule solaire, nous avons une quantité énorme de perte par réflexion. Nous avons 34 % de réflexion à la surface d'une cellule au silicium pour les longueurs d'ondes grandes 1,1 μm et au moins 54 % de réflexion dans les courtes longueurs d'ondes 0,4 μm . Les méthodes utilisées pour réduire la réflexion sont la texturation de la surface et l'utilisation des couches antireflets [9]. La couche antireflet est une couverture de diélectrique mince d'indice de réfraction très faible. Son principe est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux. Nous pouvons faire la texturation seule ou poser une couche antireflet texturée.

Tableau 1: Différent couches antireflets et leurs indices de réfractons [9]

fluorure de magnésium (MgF_2)	1,38
dioxyde de silicium (SiO_2)	1,46
trioxyde d'aluminium (Al_2O_3)	1,76
tétranitride de silicium (SiN_4)	2,05
penta oxyde de tantalique (Ta_2O_5)	2,2
sulfure de zinc (ZnS),	2,36
oxyde de silicium (SiO_x)	1,8-1,9
oxyde de titane (TiO_2)	2,62

I.1.3 Caractéristiques des couches antireflets

❖ Couches antireflets et texturation de surface

La texturation de la couche antireflet permet la réduction de la réflectance de la face avant de la cellule solaire. Cette opération consiste à transformer la surface de la couche antireflet en dent de scie de profondeur micrométrique. La morphologie est en générale pyramidale. Les dimensions des structures ainsi réalisées sont supérieures à la longueur d'onde de la lumière incidente. Les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. Le front présente une suite de réflexion successive due à la texturation [4]. Le relief de la surface provoque une forte diminution de la réflexion ; les faisceaux lumineux tapent perpendiculairement au plan de la cellule seront réfléchis en premier lieu sur la pyramide (face numéro 1) et la seconde réflexion

sera fait sur la pyramide adjacente (voir figure 3), cette double réflexion sur les pyramides provoque la décroissance du coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2 . D'une part, un rayon lumineux incident sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . La trajectoire du rayon lumineux au sein du silicium sera augmentée d'un facteur $1/\sin(\theta)$ par rapport au cas où la surface plane est perpendiculaire à l'éclairement. Ce qui va entraîner une augmentation de la quantité de photons absorbés par le matériau. En effet, la texturation de la surface entraîne le piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule solaire [4]. Sur la face avant de la cellule, nous avons un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel si nous dépassons cette valeur, le rayon lumineux est totalement réfléchi, diminuant aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, nous trouvons que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène peut être renforcé par une texturation de la face avant et/ou une couche antireflet [10]. Le taux considérable en défaut (les liaisons pendantes, les impuretés, etc) provoque des pertes non négligeables au niveau de la surface d'un semi-conducteur liées à la recombinaison en surface. La passivation permet l'amélioration de la qualité électronique de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Différentes couches de passivation sont employées en photovoltaïque tels que l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium d'hydrogène ($\text{SiN}_x : \text{H}$) [8].

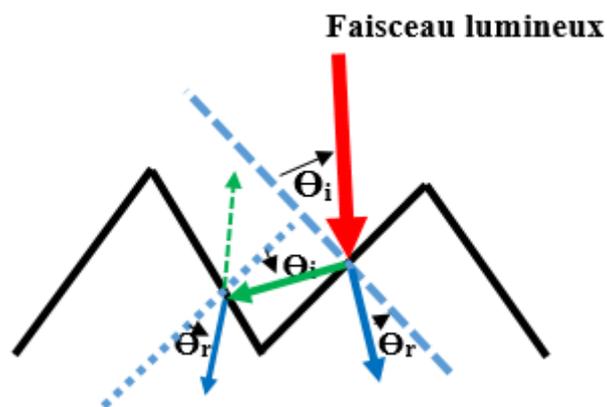


Figure 3 : Schéma de texturation de la surface [4]

La réflectance est l'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente. Elle est donnée par la relation (3) [4] :

$$R = \frac{(n_{ct} - n_{ci})^2}{(n_{ct} + n_{ci})^2} \quad (3)$$

n_{ci} : est l'indice du milieu d'incidence de la lumière et n_{ct} : est l'indice du milieu de transmission.

I.1.4 Les TCO (Transparence Conductor Oxide)

La découverte des TCO a été faite au début du vingtième siècle par Bädeker. Ce dernier a constaté que les couches minces d'oxyde de cadmium (CdO), déposées à l'intérieur d'une chambre à décharge luminescente, étaient à la fois conductrices et transparentes [10]. Le dopage des TCO s'effectue souvent avec des dopants de type N grâce à son aspect dégénéré de ce type de matériaux. J.M.Mochel est la première à faire le dopage en 1947 d'un TCO qui est un matériau dont son aspect est dégénéré. J.M.Mochel a dopé l'oxyde d'étain par l'antimoine (Sb). Les années passées certains travaux de recherche se sont orientés vers l'étude des TCO dopés P [8]. De nombreux matériaux TCO sont apparus tels que In_2O_3 , SnO_2 , ZnO , SnO_4 , CdSnO_2 , $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$ (ITO), $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{F}$, $\text{ZnO} : \text{Al}$, $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$, $\text{SnO}_2 : \text{Cd}$, $\text{SnO}_2 : \text{F}$, etc [11].

I.1.4.1 Le choix du ZnO

L'oxyde de zinc fait partie de la famille Oxyde Transparent Conducteur TCO qui présente les propriétés suivantes : une bonne conductivité électrique avec une bonne transparence optique, ainsi qu'un bon facteur de mérite. Ce dernier est une corrélation entre les propriétés optiques et électriques des TCO [10]. Dans le cas de l'application en couche dans les cellules de type Cu (In, Ga) Se_2 , il est important d'avoir un semi-conducteur de type N. Pendant longtemps, l'ITO (Indium Tin Oxide) a été utilisé comme un matériau de couche antireflet. Cependant du fait de la faible disponibilité de l'indium dans la croûte terrestre, un troisième type de TCO est de plus en plus utilisé, à savoir l'oxyde de zinc ZnO. Le zinc est très abondant sur terre et son coût de production peut être fortement réduit. En outre, le zinc a l'avantage de ne pas être toxique [10]. Le facteur de mérite est défini comme étant la fraction entre la transmission moyenne T dans le domaine du visible et la résistance carrée R_c , ρ est la résistivité et d est l'épaisseur de la couche d'oxyde. Il est donné par la formule suivante :

$$Q = \frac{T}{R_c} \text{ avec } R_c = \frac{\rho}{d} \quad (4)$$

I.1.4.2 Dopage de l'oxyde zinc (ZnO)

L'oxyde de zinc présente une grande importance pour les applications optoélectroniques à courte longueur d'onde. Le dopage de l'oxyde de zinc de type N ou P est indispensable pour améliorer la conductivité de la cellule. Le nitrure de galium (GaN) et les semi-conducteurs composés du groupe II-VI, ZnO, ZnS et ZnSe sont facile à doper de type N par contre ne sont pas faciles à doper P. Néanmoins, le ZnTe est facilement dopé P et n'est pas facile à doper de type N [12].

❖ Dopage de type P

La soustraction entre le rayon ionique qui existe entre le cation Zn^{2+} ($r = 0,60 \text{ \AA}$) et l'anion, O^{2-} ($r = 1,38 \text{ \AA}$) qui composent la structure, montre l'existence d'un espace vide entre les atomes. Il apparaît ainsi qu'environ 55 % du volume du cristal demeure inoccupé. Cette structure que nous pouvons qualifier de lacunaire est propice à l'insertion en position interstitielle d'atomes de zinc ou d'impuretés.

Les semi-conducteurs de large bande interdite présentent des difficultés de dopage de type P. La profondeur des niveaux des impuretés dû à un problème de dopage, entraînant une résistance importante au niveau accepteur à la surface. Les éléments du groupe I comme le lithium Li, le sodium Na, le potassium K, le cuivre Cu et l'argent Ag, lacune de zinc sont reconnus en tant que donneurs et les éléments du groupe V sont reconnus comme des dopants accepteurs. Les niveaux accepteurs profonds ont été formés par un grand nombre d'éléments de ce fait, ils ne participent pas à la conduction du ZnO. Les éléments les plus utilisés lors du dopage du ZnO de type P sont les éléments du groupe V. En effet, les éléments du groupe I sont disponibles pour se placer dans les sites interstitiels. Les éléments du groupe I possèdent des rayons atomiques faibles c'est la raison pour laquelle ils peuvent être insérés dans les sites interstitiels [12].

❖ **Dopage de type N**

Ce type de dopage se fait par le remplacement des atomes du métal. Le dopage dépend de la taille du dopant et de sa solubilité dans le réseau de l'oxyde transparent conducteur. Quant à l'oxyde de zinc, il est dopé généralement par le bore B, le germanium Ge, l'aluminium Al ; le gallium Ga et de l'indium In [13]. La forme cristalline de wurtzite du ZnO est un semi-conducteur dont la déviation est causée par des défauts intrinsèques comme les lacunes d'oxygène (V_o) et le zinc en sites interstitiels (Zn_i). Il a été démontré expérimentalement que le ZnO est dopé de type N. Les deux défauts naturels ne montrent pas les caractéristiques d'un donneur en surface de concentration élevée. Le zinc en site interstitiel est un donneur superficiel important avec une énergie d'ionisation entre 30 et 50 meV. L'action de l'hydrogène est montrée comme donneur sur la surface, avec une énergie d'ionisation de l'ordre de 30 meV. Le dépôt de l'oxyde de zinc dopé N n'est pas difficile comparé au type P [12]. Les éléments de substitutions de Zn tels que l'aluminium Al, le gallium Ga et l'indium In sont les éléments du groupe III. Les éléments de substitution pour l'oxygène tels que le chlore Cl et l'iode I sont du groupe VII. Une couche de ZnO dopé au gallium Ga déposée par CVD a une résistivité de l'ordre de $1,2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$. Une couche de ZnO dopée au Ga est déposée sur le substrat de nitrure de gallium GaN par la méthode de MBE.

Pour augmenter la conductivité, il est indispensable de faire le dopage du matériau en incorporant des impuretés. Les dopants sont du groupe III ou IV du tableau périodique comme le bore B, l'aluminium Al, le gallium Ga, l'indium In, le germanium Ge, etc. Le dopage de type N est substitutionnel, où l'atome du dopant remplace l'atome de zinc dans le réseau du ZnO figure (6). Pour les éléments de la colonne III qui possèdent 3 électrons dans leur couche périphérique ou de valence. Les 2 électrons serviront pour la liaison ionique avec les atomes d'oxygène, tandis que le 3^{ème} électron se déplacera librement dans le cristal et sera cédé dans la bande de conduction. Ce qui va entraîner une augmentation de la concentration d'électrons dans le cristal et provoquer l'augmentation de la conductivité de la couche mince. Cette substitution d'atome change aussi la structure de la maille car chaque atome possède un diamètre différent de celui des autres, par conséquent une modification de certaines propriétés du matériau dopé [14].

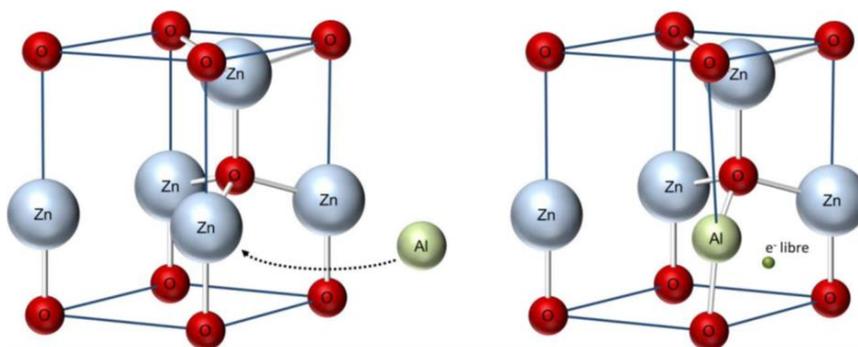


Figure 4 : Substitution du zinc (Zn) par l'atome d'aluminium (Al) dans la structure de wurtzite [14]

I.2 Quelques propriétés de l'oxyde de zinc (ZnO)

I.2.1 Structure cristalline du ZnO

Le principal atout du ZnO est dû à ses composants non toxiques de façon contraire à l'indium dans ITO (Indium Tin Oxide). L'oxyde de zinc est très abondant sur terre [13]. Il se cristallise sous différentes structures tels que le zinc blende $6*(ZnO)$ figure (5), la structure de wurtzite $2*(ZnO)$ figure (4) etc. Plusieurs zinc-blendes conducteurs du groupe II-VI se cristallisent sous forme de cubique de zinc ou bien hexagonale de wurtzite. Dans cette dernière chaque anion est entouré de quatre cations situés aux coins d'un tétraèdre et vice versa. L'oxyde de zinc fait partie des semi-conducteurs du groupe II-VI et a pour caractère ionique situé dans l'interface de semi-conducteur covalent et ionique. La structure blende n'est stable que par croissance sur des substrats cubiques. La structure de wurtzite a une maille élémentaire avec deux paramètres $a = 325 \text{ nm}$ et $c = 520 \text{ nm}$ dont la fraction $c/a = 1,6$ [9]. Ce composé possède deux autres formes allotropiques telles que la structure de type blende et la structure de type rocksalt (NaCl). La

structure de type blende qui ne peut être stabilisée que par une croissance sur des substrats cubiques. La structure de type rocksalt (NaCl) qui ne peut être obtenue qu'à des pressions relativement élevées. Ces deux dernières ne nous concerneront pas dans la suite de ce manuscrit [15].

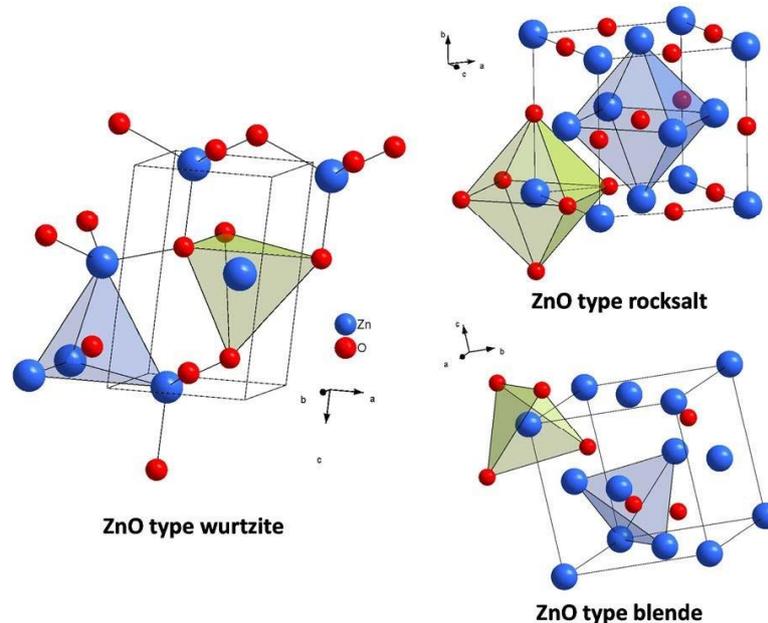


Figure 5 : Différentes structures du ZnO [15]

I.2.2 Propriétés électriques du ZnO

L'oxyde de zinc (ZnO) a été utilisé comme électrode transparente dans la cellule solaire. L'oxyde de zinc possède une bonne conductivité électrique combinée à une bonne transparence sur toute l'étendue du spectre du visible et du proche infrarouge. Ce qui permet son utilisation comme couche antireflet [15, 16]. Il est du groupe des oxydes semi-conducteurs transparents et présente une absorption et une diffusion élevées des rayonnements ultraviolets. Sous l'action d'un faisceau lumineux de haute énergie ($E > 3,4$ eV) ou d'un bombardement d'électrons, l'oxyde de zinc émet des photons. Ce phénomène correspond à la luminescence. Dépendant des conditions d'élaboration et des traitements ultérieurs, différentes bandes de photoluminescence ont été observées. Elles vont du proche UV ($\lambda = 350$ nm), au visible rayonnement de couleur verte de longueur d'onde proche de $\lambda = 550$ nm [4].

L'oxyde de zinc a une énergie de première ionisation très supérieure à celle des autres matériaux semi-conducteurs. Nous pouvons citer ZnS (20 meV), GaN (21 meV) [16], Si (14,7 meV), GaAs (4,2 meV) [17], ce qui le rend très prometteur pour les applications dans le domaine des lasers [6]. La présence des défauts dans la structure cristalline influe sur les propriétés électriques. Une des paramètres de l'oxyde de zinc est la résistivité, c'est un

paramètre caractéristique intrinsèque du matériau [6]. Elle est indépendante de l'épaisseur de la couche (μm). Cependant elle dépend de la mobilité (μ), la charge élémentaire q et la concentration (N) des porteurs de charges (les électrons sont majoritaires dans notre structure), qui ont pour unités respectives Ωcm , cm^2/Vs , Coulomb et $\text{at}\cdot\text{cm}^{-3}$. Ces deux paramètres (μ et N) sont les composants de ρ , avec lesquels ils sont liés par l'équation :

$$\rho = \frac{1}{q \times \mu \times N} = \frac{1}{q(\mu_p \times N + \mu_n \times P)} \quad (5)$$

Avec n et p respectivement les concentrations en électrons et en trous. μ_n et μ_p les mobilités respectives des électrons et des trous [18]. Avec ρ la résistivité en $\Omega\text{ cm}$ qui peut être abaissée en augmentant μ et N . Augmenter N signifie également augmenter l'absorption optique des porteurs de charges qui se situent dans le proche infrarouge (IR). L'augmentation de N permet de diminuer la transparence de la couche du ZnO dans la zone spectrale. C'est la raison pour laquelle il est plus judicieux d'augmenter la mobilité μ afin de ne pas dégrader les propriétés optiques des couches du ZnO, ce qui permet d'améliorer les propriétés électriques [9]. La concentration élevée en électron conduit à la déviation par rapport à la stœchiométrie et à des défauts dans la structure cristalline. Le gap a une valeur de 3,37 eV à la température ambiante. Les électrons ont une mobilité de l'ordre de 20 à 30 cm^2/Vs dans les couches minces du ZnO. Le ZnO présente un gap direct. C'est la raison pour laquelle le maximum de la bande valence et le minimum de la bande de conduction sont sur le même point de l'espace de k (k étant le vecteur d'onde dans la zone de Brillouin). L'équation de synthèse entraînant la formation de l'oxyde de zinc est [9] :



Avec Zn^{2+} est l'oxydant et ZnO le réducteur. La conductivité électrique de l'oxyde de zinc est causée par la présence des atomes de zinc dans des sites interstitiels ainsi qu'aux lacunes d'oxygènes. En effet, le ZnO dans sa proportion stœchiométrique est un isolant [8]. Les densités d'électrons n et de trous p sont respectivement définies en fonction de la température T par la relation:

$$n = N_C \times e^{-\frac{E_C - E_F}{KT}} \quad \text{et} \quad p = N_V \times e^{-\frac{E_F - E_V}{KT}} \quad (6)$$

avec N_C et N_V respectivement les densités d'état dans la bande de conduction et dans la bande de valence, E_C , E_F et E_V les niveaux d'énergie de la bande de conduction, le niveau de Fermi et le niveau d'énergie de la bande de valence et $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ la constante de Boltzmann [19].

I.2.3 Propriétés optiques du ZnO

Le ZnO est un matériau transparent dont l'indice de réfraction sous la forme massive est égal à 2 [3]. Sous forme de couche mince, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaborations. L'indice de réfraction a une valeur qui varie entre 1,90 et 2,20. L'amélioration de la stœchiométrie du ZnO provoque une diminution du coefficient d'absorption et une augmentation de l'énergie de la bande interdite. L'oxyde de zinc dopé appartient à la classe des oxydes transparents conducteurs dit TCO [20]. Il présente une absorption et une diffusion élevées des rayonnements ultraviolets [17]. En revanche, il est transparent dans le spectre du visible et le proche infrarouge. Le coefficient d'absorption de la lumière incidente (α) relatif au gap direct des couches minces utilisées est donné comme suit:

$$\alpha = \sqrt{hv - E_g} \quad (7)$$

hv : énergie du photon incident avec h , v et E_g sont respectivement la constante de Planck, la fréquence du photon incident et l'énergie du gap. Le coefficient d'absorption des porteurs de charges α_{pc} qui est extrait du logiciel :

$$\alpha_{pc} = K_1 n \lambda^a + K_2 p \lambda^b \quad (8)$$

Dans ces équations K_1 , K_2 , a et b sont des constantes déterminées empiriquement et sont relatives aux matériaux utilisés ; avec n , p la concentration respective en électron et trou, λ la longueur d'onde. Cette base mathématique s'étend jusqu'à la détermination des paramètres électriques macroscopiques [21]. Une autre propriété importante du ZnO est sa forte liaison excitonique de l'ordre de 60 meV.

I.3 Quelques méthodes d'élaborations des couches antireflets

I.3.1 Dépôt chimique en phase vapeur

Le principe de dépôt chimique en phase vapeur CVD (Chemical Vapor Deposition en anglais) est un procédé permettant de déposer une couche mince sur un substrat. La taille de ce substrat est de quelques nanomètres jusqu'à plusieurs micromètres d'épaisseur, à partir des réactions chimiques. Ces réactions chimiques sont à l'origine ou bien qui vont causer la formation des précurseurs gazeux composant des éléments du dépôt. Nous plaçons le substrat dans un four pour permettre de contrôler la température et de faciliter le dépôt. La diffusion du gaz est une étape indispensable permettant de faciliter le dépôt dans une goutte métallique. Nous avons une adsorption au niveau de l'interface métal-matériau. Dans l'industrie des semi-conducteurs, la méthode la plus utilisée est la technique de dépôt CVD. Ce dernier permet le dépôt des couches minces de matériau solide de haute performance et de grande pureté. Cette technique

est utilisée pour la synthèse des nanostructures de silicium tels que les nanofils, les nanopyramides etc [9]. Le dépôt chimique en phase vapeur est le plus employé pour l'élaboration des couches antireflets (CAR) à indice de réfraction variable pentaoxyde de tantalique Ta_2O_5 , nitrure de silicium Si_xN_y , dioxyde de silicium SiO_2 et oxyde de silicium SiO_x . Dans cette méthode, le substrat est couvert par un revêtement solide qui a été produit par la réaction gazeux. La réaction gazeux a eu lieu sur le substrat ensuite sur le matériau à déposer. Nous activons la réaction de façon thermique par faisceau de photons ou bien par une décharge électrique. La méthode de CVD permet le dépôt d'une couche anti-réfléchissante de meilleures qualités [7] voir figure (6).

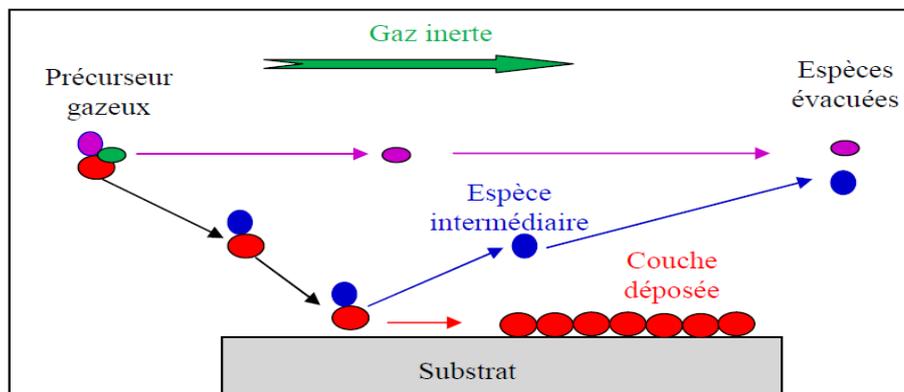


Figure 6 : Dépôt chimique phase en vapeur [4]

I.3.2 Pulvérisation cathodique

La pulvérisation est le phénomène par quoi le matériau est enlevé sous une forme atomique ; suite à un bombardement par des atomes énergétiquement accélérés par un champ électrique intense. Un schéma de principe de la pulvérisation est représenté sur la figure (7) où la cible est polarisée négativement (la cathode), l'anode est le support du substrat. Après avoir réalisé un vide poussé 10^{-3} torr dans l'enceinte, un gaz généralement de l'argon, xénon ou krypton est introduit dans l'enceinte afin de créer un plasma [22]. L'enceinte se trouve sous la pression réduite d'argon environ 10^{-3} torr en générale. Des différences de potentiel de 3 à 5 kV provoquent la décharge (l'ionisation) du gaz d'argon, et accélèrent les ions vers la cible. Cette dernière subit une série de collisions des ions accélérés, qui s'achèvera par une éjection de ses atomes. L'intérêt de cette méthode est la possibilité d'un meilleur contrôle de contenu en hydrogène dans la couche en faisant varier la pression partielle du gaz. La pulvérisation permet la création d'un plasma stable. Celle-ci est entraînée par un équilibre entre l'ionisation du gaz par impacts électroniques et la création d'électrons secondaires [1].

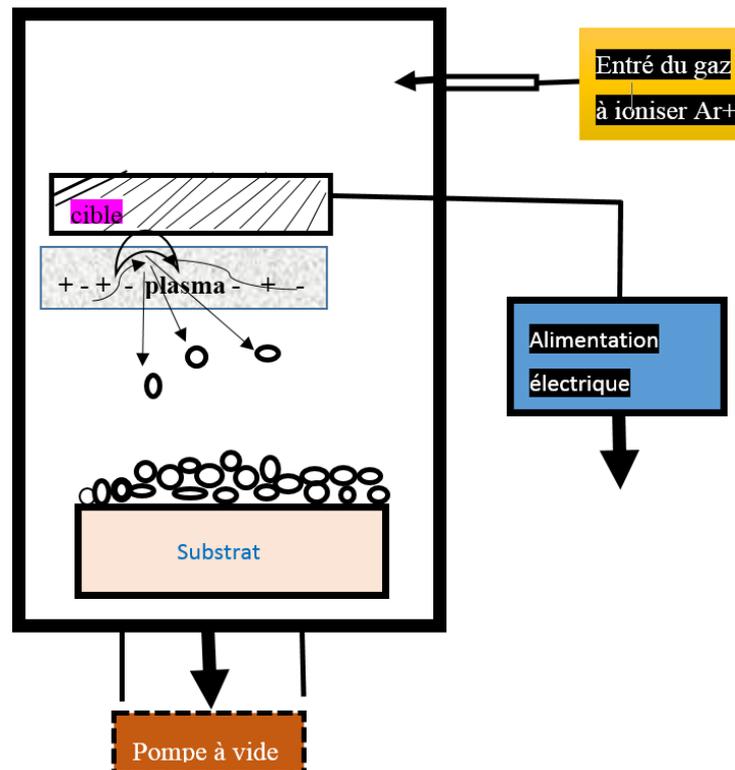


Figure 7 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique [8]

I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Nous allons vous présenter les caractéristiques électriques et optiques d'une cellule photovoltaïque, avant de parler comment elle fonctionne. La cellule solaire transforme les photons absorbés par le semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électron et trou). Cette création de charges va mettre en place une différence de potentiel aux bornes des électrodes et d'un courant électrique aux niveaux de ces électrodes [6]. Une cellule photovoltaïque est comparable à une diode, la mise en évidence de son fonctionnement est accentuée par les propriétés des matériaux semi-conducteurs et s'appuie sur l'effet photovoltaïque. En effet, une cellule solaire est constituée essentiellement d'une jonction PN, elle est dopée différemment : Pour la couche N, apport d'électrons périphériques ; Pour la couche P, manque d'électrons et apport de trous. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est représenté sur la figure (8).

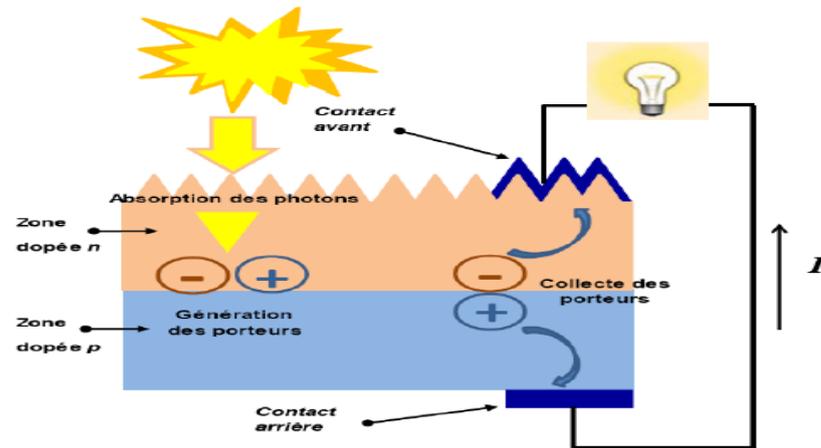


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4]

L'objectif actuel des recherches dans le domaine du photovoltaïque, est d'augmenter le rendement de conversion, tout en réduisant le coût de fabrication pour la rendre accessible aux populations [4].

I.5 Caractéristique d'une cellule solaire

Les deux paramètres indispensables pour caractériser une cellule solaire sont donnés dans la courbe caractéristique courant-tension sous illumination la tension V_{co} et le courant I_{cc} .

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-métal voir figure (9). Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente ($1/b$) au point V_{co} , avec b la pente. La résistance shunt traduit la présence de courants de fuite dans la diode. Le courant de fuite est dû à la recombinaison des porteurs de proximité des sites de dissociation des charges à l'interface diode et les électrodes. Le courant de fuite est dû à la possibilité d'existence de fuite initiée par des inhomogénéités géométriques des couches. La valeur de la résistance shunt R_{sh} est égale à l'inverse de la pente ($1/c$) de la caractéristique au point de court-circuit I_{cc} , avec c la pente ($V = 0$) [14].

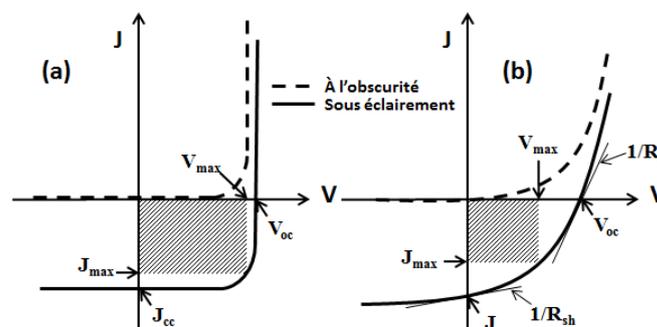


Figure 9 : Caractéristique $J_{cc}(V)$ d'une cellule solaire à l'obscurité (diode), sous éclairage et la valeur de la résistance série, shunt (R_s et R_{sh}) [14]

Sous l'obscurité, la jonction PN se comporte comme une diode ; la barrière de potentiel correspond à la tension de seuil d'une diode. C'est-à-dire la jonction doit être soumise à une certaine tension afin que le courant puisse passer. Les électrons dans la bande de conduction circulent du semi-conducteur de type N vers le semi-conducteur du type P et inversement pour les trous dans la bande de valence [13]. Pour la cellule solaire sous éclairement, la caractéristique $I(V)$ ne passe pas par l'origine, et le produit $V \times I$ est inférieur à zéro donc la cellule fournit de l'énergie [6]. Sous l'éclairement l'équation de la diode est donnée dans la relation (9).

$$I_D = I_s \times \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (9)$$

Avec I_{ph} est le photocourant crée par la cellule ; I_s le courant de saturation sous polarisation inverse ; T la température de la jonction, la tension de polarisation V . Le coefficient d'idéalité n de la jonction PN qui vaudra 1 lors qu'il n'y a aucune recombinaison dans la zone de déplétion et vaudra 2 si toutes les recombinaisons se déroulent dans la zone déplétion [6].

I.6 Les paramètres d'une cellule solaire

❖ Le courant de court-circuit I_{cc}

La mobilité est liée directement à la conductivité électrique du matériau et au nombre d'impuretés présentes dans ce matériau. Pour les porteurs dominants, la conductivité électrique est proportionnelle à la mobilité de ces porteurs de charges. La densité de courant vectorielle est reliée à la vitesse des porteurs de charges par la relation suivante :

$$\vec{j} = qn\vec{v} \text{ est en cm}^2/\text{Vs} \quad (10)$$

Avec q la charge élémentaire, n la densité d'électron, \vec{v} la vitesse des électrons et \vec{j} le vecteur densité de courant. Le courant de court-circuit I_{cc} est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans la figure 9) [14]. Il augmente progressivement en étant linéaire avec l'intensité d'illumination de la cellule.

❖ La tension de circuit ouvert V_{co}

La tension de circuit ouvert est obtenue lorsque le courant qui traverse à la borne de la cellule photovoltaïque est nul. Elle est fonction du courant de saturation I_s , du courant de court-circuit I_{cc} , de la charge des porteurs q , la constante de Boltzmann k_B et la température T (voir relation 11). Elle croît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [12]. En outre, elle dépend de l'éclairement de la cellule. Nous pouvons facilement avoir l'expression de V_{co} dans le cas d'un courant nul $I_D = 0$, avec I_{ph} le photo courant, I_s le courant de saturation.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \times \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} - 1 \right) \quad (11)$$

❖ Le facteur de forme FF

Le facteur de forme caractérise la performance de la cellule solaire [22]. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qui est théoriquement obtenue (puissance optimale). Il est donné par la formule suivante :

$$FF = \frac{I_m V_m}{V_{co} I_{cc}} \times 100 \quad (12)$$

La puissance maximale (P_{max} en Watt) pour une cellule solaire idéale correspond au produit du facteur de forme FF, de la tension de circuit ouvert V_{co} et du courant de court-circuit I_{cc} .

$$P_m = I_m \times V_m = FF \times V_{co} \times I_{cc} \quad (13)$$

❖ Le rendement de conversion η

Le rendement est l'efficacité énergétique externe de conversion d'une cellule solaire. Il est donné par la relation (14) [17] :

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{inc}} = FF \frac{I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{inc}} \times 100 \quad (14)$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer la capacité de conversion de la cellule [6].

Conclusion

Dans le premier chapitre les généralités sur les couches antireflets et cellule solaire a été donné. Des approches utilisées pour la réalisation des couches antireflets de dimension nano jusqu'à micrométriques ont été parlé. Cette partie nous a permis d'avoir une idée sur la cellule au silicium et la couche antireflet. Elle nous a permis d'avoir un bon aperçu sur la modélisation des propriétés électriques et optiques de la cellule solaire. Ajoutons que dans le chapitre qui va suivre nous allons donner les informations essentielles sur le logiciel PC1D que nous utilisons dans notre travail.

Chapitre II Modélisation d'une cellule solaire de type ZnO (n)\Si (n)\Si (p)

La qualité de structure de la cellule solaire a entraîné des améliorations ces dernières années à cause de l'application des logiciels de simulation. La performance des cellules solaires à base de silicium est issue de l'amélioration de leurs structures.

La texturation a pour rôle de piéger les rayons lumineux. La passivation de la surface ou de l'interface ZnO(n)/Si(n)/Si(p) entraîne une réduction de la vitesse de recombinaison en surface.

La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant sur le rendement de la structure photovoltaïque [17]. La simulation numérique est fréquemment utilisée pour l'optimisation des cellules solaires. Dans ce travail, le logiciel PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel) a été utilisé, qui est un logiciel de simulation dédié plus particulièrement à la recherche internationale de la cellule photovoltaïque. Il est développé dans l'université de « New South Wales » de Sydney en Australie. Le point central de ce travail est donc la simulation numérique de la cellule solaire de type ZnO(n)/Si(n)/Si(p). Elle permet de savoir les influences des paramètres du dispositif (épaisseur, l'angle de texture, la profondeur de texture, le taux de dopage) sur les paramètres électriques de la cellule photovoltaïque. Le but de cette étude est de déterminer les paramètres optimaux de la couche antireflet ZnO et du silicium donnant lieux aux meilleures performances [6].

II.1 Présentation du logiciel PC1D

Le Personnel Computer One Dimensionnel est un simulateur solaire unidimensionnel pour Window, créé initialement au laboratoire de Sandia National par le docteur Paul Basore et son équipe en 1984. La première version a été publiée en décembre 1985 et la dernière version en février 2008. Le programme est devenu populaire grâce à son interface simple, ce qui le rend facile à utiliser. Durant son exécution, seul le fichier PC1D.EXE est nécessaire pour les calculs. La base des données du PC1D contient un fichier help PC1D.HLP et quelques fichiers additionnels des paramètres physiques de quelques matériaux [6]. Nous avons dans cette base le silicium(Si), le germanium(Ge), le phosphore d'indium (InP) et l'arséniure de galium (GaAs). Il contient aussi les spectres solaires standards terrestres, globaux et diffus (AM0, AM1.5G et AM1.5D). Typiquement, le PC1D est utilisé pour modéliser les cellules solaires à base de silicium (Si) et les semi-conducteurs III-V. Son succès est basé sur sa vitesse d'exécution, son interface utilisateur et ses mises à jour continues [6]. Nous avons utilisé la dernière version 5.9. Nous pouvons simuler une structure photovoltaïque en introduisant ses paramètres (géométrie, dopages, paramètres électriques et optiques, etc). La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la figure 21 à l'annexe. Le logiciel se compose de quatre parties. Les

trois premières parties sont consacrées à la modélisation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne la visualisation des résultats de la simulation. Les fichiers du spectre solaire sont aussi disponibles dans ce logiciel, essentiellement les spectres (AM0, AM1.5). Dans la fenêtre du logiciel PC1D, il faut introduire les données en relation avec le dispositif ; les paramètres de la région et de l'excitation de la cellule solaire [6].

II.1.1 Fonctionnement du PC1D

L'interface proposée par le simulateur permet de présenter la géométrie de la cellule étudiée qui peut avoir différentes couches. Après avoir mis les paramètres indispensables aux matériaux, le PC1D peut commencer à fonctionner. Un schéma du dispositif de la structure étudiée est généré systématiquement du côté droit du panneau principal du simulateur. Pour focaliser l'étude à faire sous PC1D, nous avons deux fichiers externes qui sont nécessaires pour l'exécution. Ces fichiers focalisent l'étude à effectuer, soit en obscurité (Dark-IV.EXC), soit sous l'éclairement (One-Sun.EXC, Scan-Qe.EXC). Le fichier (One-Sun.EXC) permet le calcul des caractéristiques (I-V, P-V), le rendement η et le facteur de forme par contre (Scan-Qe.EXC) permet de calculer la réponse spectrale [6].

Paramètres d'entrés

Device

Surface de la cellule, profondeur de texturation, charge surfacique, réflectance externe de la face avant.

REGION

Epaisseur du matériau, constante diélectrique, bande de interdite, concentration intrinsèque, indice de réfraction, type de dopage, temps de recombinaison.

Excitation

Mode d'excitation, mode d'équilibre, le temps et la longueur du pas, la température, la tension, la constante lumineuse $0,1\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ et spectre AM1.5g.

Paramètres de sorties

Résultat

Le courant de court-circuit, la puissance maximale, la tension de circuit ouvert ...

II.1.2 Caractéristiques de PC1D

II.1.2.1 Paramètres du dispositif (Device)

Les paramètres du dispositif sont la surface du dispositif, la texturation, la densité de charge surfacique, la couche de passivation, la réflectance externe, la réflectance interne, les

résistances séries internes, les résistances shunt internes. L'aire du dispositif est très importante car elle influe sur le photocourant d'une manière appréciable. Nous pouvons choisir une surface entre x (valeurs sur le logiciel) et y (valeurs sur le logiciel) donnent une superficie de $x.y \text{ cm}^2$. Nous avons choisi une surface de 1 cm^2 . Les surfaces texturées (voir figure 10) utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées des micro-pyramides inversées de profondeur maximale $0,3 \mu\text{m}$ et d'angle facial de $54,74^\circ$. La texturisation permet de minimiser les pertes par réflexion du rayonnement solaire incident et maximiser l'absorption. Nous pouvons texturer seulement la face avant, si l'autre face est considérée être sous l'obscurité [4]. Les deux faces sont considérées comme neutres ; du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de barrière de potentiel en surfaces. La couche mince est à base d'oxyde de zinc (ZnO). Elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donnés dans le logiciel sous forme de fichiers. Par défaut, l'émetteur et la base sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté [6].

II.1.2.2 Paramètres des régions

Nous pouvons introduire plusieurs régions selon la forme et les propriétés structurales de la cellule. Ces paramètres de régions sont l'épaisseur du matériau utilisé, les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat). Ils sont fournis par le logiciel contenant les matériaux les plus utilisés tels que le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Les paramètres qui sont placés dans ce fichier sont : les mobilités des porteurs de charges, la constante diélectrique ou permittivité électrique, l'énergie du gap en eV, l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque en at.cm^{-3} , le coefficient d'absorption optique en cm^{-1} , l'absorption des porteurs libres, le type et la concentration du dopant, les durées de vie des porteurs minoritaires en μs , les vitesses de recombinaison des porteurs dans chaque région en cm.s^{-1} [11].

II.1.2.3 Fichiers utilisé durant l'exécution du PC1D

Pour faire la simulation sous PC1D, le simulateur utilise l'ensemble des fichiers comme suit

❖ Fichier (*.prm)

Ce fichier contient les informations concernant le design du matériau comme l'épaisseur des couches, les profils de dopage, la durée de vie des porteurs de charges et la vitesse de recombinaison [19].

❖ Fichier (*.mat)

En ce qui concerne ce fichier, il contient les informations indiquant les propriétés électroniques du matériau comme le gap, l'affinité électronique, la constante diélectrique et la mobilité.

❖ Fichiers des paramètres optiques

Pendant la simulation d'une cellule solaire, deux types de fichier sont indispensables ; le fichier du coefficient d'absorption (*.abs) et le fichier de l'indice de réfraction (*.inr). Ces deux fichiers sont liés au fichier (*.mat), ils contiennent les informations du coefficient d'absorption et l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde incidente.

II.1.2.4 Paramètres d'excitations

Le logiciel contient deux fichiers intégrés : le fichier « Scan-Qe.EXC » et le fichier « One-Sun.EXC » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil) permettent de simuler différentes caractéristiques (courant-tension et puissance-tension). Le fichier « Scan-Qe.EXC » (intensité de chaque longueur du spectre) permet la simulation de la réponse spectrale. Il y a trois modes d'excitation, le mode équilibre, le mode stationnaire et le mode transitoire. Il y'a aussi la température, la tension, l'éclairement (intensité, air masse) [11].

II.1.2.5 Visualisation des résultats

Les résultats visualisés sont tout à fait en bas de la page lorsque nous utilisons le fichier « One-Sun.EXC » comme excitation. Ces résultats sont : la valeur du courant de court-circuit, la valeur de la tension de circuit ouvert, la valeur de la puissance maximale. Ceux obtenus avec le fichier « Scan-Qe.EXC » sont : les paramètres électriques au-dessus et le rendement, le rendement quantique externe et interne [11].

II.1.3 Représentation du logiciel SciDAVis

C'est un logiciel qui nous a permis de tracer les courbes durant notre modélisation nommé SciDAVis dont l'interface graphique se trouve dans l'annexe. Dans ce logiciel SciDAVis nous avons les coordonnées x et y, les données extraites du PC1D seront insérées dans le logiciel SciDAVis, afin de tracer les courbes.

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons fait une présentation des logiciels. Cette partie permet de connaître ses principes de fonctionnement surtout le PC1D et de modéliser la cellule solaire de type ZnO(n)/Si(n)/Si(p). Le SciDAVis a permis de tracer les courbes. Ce logiciel du nom de PC1D sur lequel nous avons fait nos modélisations a une interface graphique simple. Le SciDAVis permet de tracer les courbes. Ce chapitre permet de comprendre le logiciel PC1D de modélisation ensuite nous allons par la suite entamer le chapitre 3 dans lequel nous allons persuer nos résultats.

Chapitre III Résultats et discussions

Dans ce travail, nous utilisons le logiciel PC1D qui a été développé pour la recherche dans le domaine du photovoltaïque. En pratique, il permet de simuler toute structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles dans le fichier data. En jouant sur les paramètres variables (l'épaisseur, l'angle de texturation, la profondeur de texturation, le dopage, etc), en respectant une structure à une dimension de préférence monocristallin ; ceci nous a permis d'obtenir les résultats. La plupart des perfectionnements concernant les cellules solaires à base de silicium ont pour origine l'amélioration de leurs structures et leurs performances [11].

Les surfaces texturisées permettront de piéger la lumière. Une passivation de ces surfaces ou interface (ZnO/Si) permettra de réduire la vitesse de recombinaison et une amélioration de la qualité électronique de la surface. Ce qui va neutraliser les effets de ces défauts électriquement actifs. La passivation permet d'augmenter la durée de vie des porteurs minoritaires et leurs longueurs de diffusions. Le cœur de ce travail est donc la simulation numérique de la cellule solaire de type ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p). Cela permet d'étudier l'influence des paramètres (l'épaisseur, le dopage, l'angle de texture, la profondeur de texturation) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque. Le but de cette étude est de déterminer les paramètres optimaux de la couche ZnO(n+), Si(n+) et Si(p) donnant lieux aux meilleures performances [4, 7].

III.1 Structure de la cellule solaire simulée

Le ZnO a été utilisé comme couche antireflet d'épaisseur très faible 0,015 μm dopé de type N+ dans la région 1 qui a été déposé sur le silicium dopé N+ d'épaisseur 0,5 μm dans la région 2 suivi de silicium dopé P d'épaisseur 160 μm dans la région 3. Dans toutes nos modélisations la cellule solaire fonctionne en mode redresseur. Cela explique le signe négatif du courant de court-circuit I_{cc} voir la figure (10). Lors de la simulation, nous choisissons un modèle typique de cellule solaire ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p). La figure (10) montre le schéma du modèle de la cellule solaire. Il s'agit d'une cellule solaire de type ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p) de 1,00 cm^2 , qui comprend un émetteur diffus peu profond qui a été texturée de manière pyramidale. La face avant a une réflectance de 5,00 % du spectre solaire. Le tableau 1 montre les paramètres de la caractéristique courant tension et puissance tension de la cellule solaire ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p). Lors de la simulation, nous pouvons définir la condition de test réelle de la cellule solaire. Nous prenons en compte une large bande de longueurs d'ondes incidentes allant de 300,00 nm à 1200,00 nm, avec un éclairement incident constant de 0,10 W.cm^{-2} , sous la condition standard AM1.5G et à la température 300 ° K.

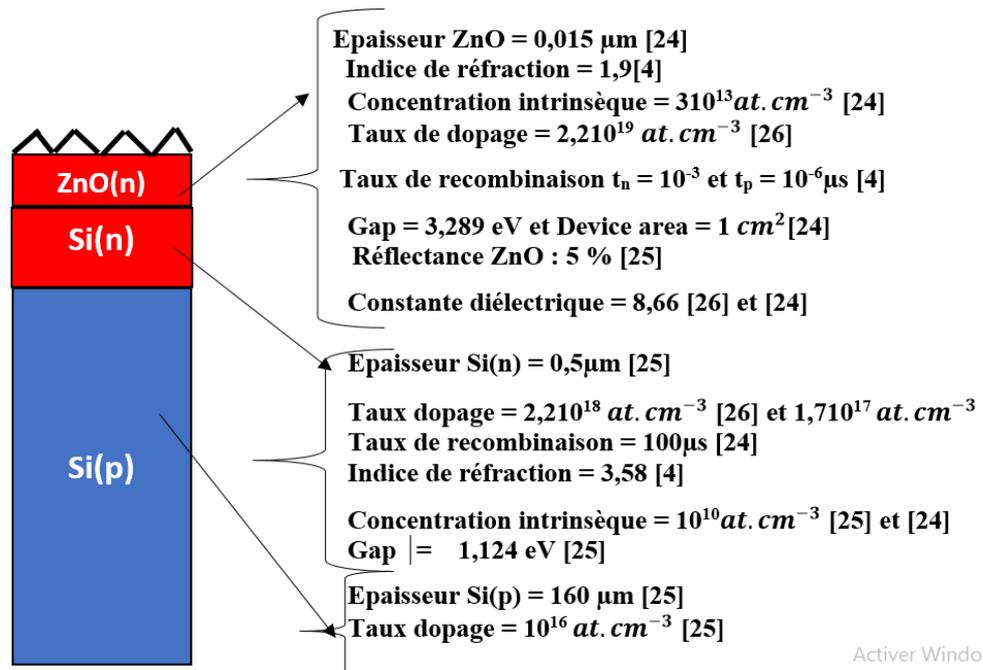


Figure 10 : Présentation de la cellule solaire étudiée

III.2 Caractéristique puissance et courant en fonction de la tension

Ces courbes ont été modélisées lorsque l'aire du dispositif vaut 1 cm^2 . La figure (11) nous a permis d'obtenir le rendement de conversion de la cellule solaire. Nous avons plusieurs paramètres électriques permettant de juger la performance et la capacité de conversion d'une cellule solaire. Ces paramètres électriques sont le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF.

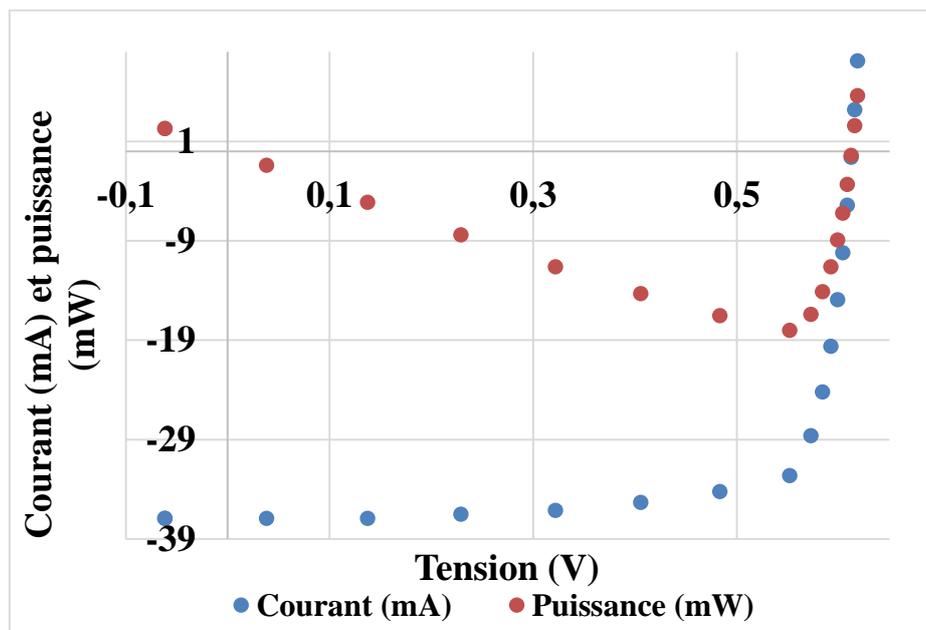


Figure 11 : La puissance et le courant en fonction de la tension

Dans le tableau suivant, nous avons les données de la figure précédente, il représente la caractéristique courant tension et puissance tension. D'après ces caractéristiques nous avons la relation de la puissance maximale et le courant maximal comme suit (15) et (16) :

$$P_{\max} = I_m * V_m \quad (15)$$

$$I_m = \frac{P_{\max}}{V_m} \quad (16)$$

D'après les courbes I(V) et P(V) obtenues à la figure (11), nous avons extrait les paramètres électriques caractérisant la cellule solaire à savoir, le courant de court-circuit I_{cc} (A), la tension de circuit-ouvert V_{co} (V), la puissance maximale P_m (W) = -18,00 mW (Voir tableau 1). La ligne représentée en verte est la puissance maximale.

III.3 Influence de l'épaisseur du Si(P) en fonction des paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si (n)/Si (p)

Le dopage de ZnO (n+) étant fixé à $2,20 \times 10^{19}$ at.cm⁻³, son épaisseur à 0,015 µm pour la région 1. En ce qui concerne la région 2, l'épaisseur est fixée à 0,5 µm et le dopage à $2,20 \times 10^{18}$ at.cm⁻³. Dans la région 3, le taux dopage est fixé à $1,00 \times 10^{16}$ at.cm⁻³. Ces courbes ont été modélisées lorsque l'aire du dispositif vaut 1,00 cm². Nous constatons que le courant de court-circuit I_{cc} croît en valeur absolue en fonction de l'épaisseur sur la courbe 12A; ceci peut être expliqué par l'augmentation de l'absorption des photons dans le substrat de silicium dopé P (voir la courbe 12A). Cette augmentation du courant de court-circuit est confirmée dans la littérature [27]. L'épaisseur est optimisée à 100,00 µm qui donne un courant I_{cc} de 0,036 mA. Nous avons sur la courbe 12B, la variation de la tension V_{co} en fonction de l'épaisseur du silicium. Nous remarquons que, plus l'épaisseur du substrat augmente, plus la tension V_{co} croit jusqu'à une épaisseur égale à 100,00 µm. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de l'absorption des photons dans le substrat [4]. C'est la raison pour laquelle l'épaisseur du substrat de la cellule solaire est un paramètre important pour l'absorption des photons. Cette élévation de la tension V_{co} peut être explicitée par le fait que le nombre de porteurs minoritaires photocréés est proportionnel aux flux lumineux transmis. En effet, l'augmentation du flux transmis fait croître le nombre de porteurs photocréés confirmé par la littérature [29]. Le nombre de porteurs minoritaires stockés dans la jonction PN augmente induisant une augmentation de la tension V_{co} . Nous observons qu'après une valeur de 100,00 µm de l'épaisseur si(p), nous avons une diminution de la tension V_{co} . Cette décroissance peut être due à une chute du nombre de porteurs minoritaires stockés dans la jonction PN. Celle-ci a été nettement confirmée par la littérature [27]. Nous remarquons que sur la courbe 12C, il y a une augmentation progressive de la puissance maximale (P_{\max}) en fonction de l'épaisseur du substrat de silicium Si(p).

L'augmentation de cette puissance peut être due par la croissance du flux lumineux transmis. Ce dernier fait croître l'absorption des photons dans le substrat entraînant une élévation du courant et de la tension ; ce qui augmente la puissance. Sur la courbe 12D, nous remarquons que le facteur de forme décroît en fonction de l'épaisseur du silicium. Au-delà 500,00 μm nous constatons une diminution du facteur de forme. La valeur optimale de ce dernier est 74,150 % pour une épaisseur de 100,00 μm , à partir de cette valeur la variation est très faible. Cette chute du facteur de forme à partir 100,00 μm est due au fait que la cellule perd sa performance [21, 23, 25, 26, 27]. La perte de la performance et de l'efficacité de conversion de la cellule solaire à partir d'une épaisseur de 100,00 μm est provoquée par la recombinaison des porteurs de charges dans le substrat de silicium [24]. La courbe 12E représente la variation du rendement en fonction de l'épaisseur du silicium. Le rendement a subi une élévation progressive, pour être maximale à une épaisseur de 100,00 μm du Si(p), à partir de cette valeur la variation est très faible. Cette allure du rendement est due à une augmentation de la performance causée par l'absorption des photons dans le substrat.

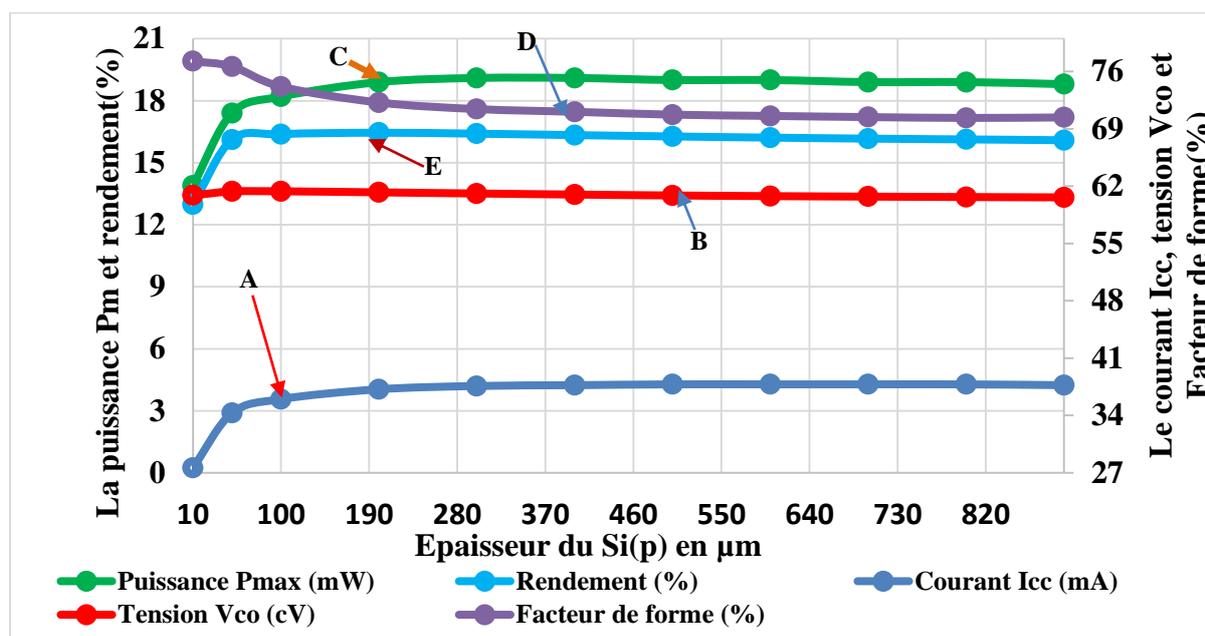


Figure 12 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'épaisseur de Si(p) en micromètre

Les valeurs extraites de ces courbes sont données dans le tableau (11) ci-dessous. Le tableau qui suit donne la variation des paramètres I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF, η en fonction de l'épaisseur du Si(p). Les valeurs optimales sont obtenues à 300 μm pour une tension 61,1cV, un courant de court-circuit de 28,64 mA, un facteur de forme de 71,408%, un rendement de 16,405%.

III.4 Influence de l'épaisseur Si(n) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p)

Le taux dopage de ZnO(n+) est fixé à $2,20 \times 10^{19}$ at.cm⁻³, son épaisseur à 0,015 µm pour la région 1. Pour la région 2, $1,39 \times 10^{17}$ at.cm⁻³ a été utilisé. Pour la région 3, le dopage est de $1,00 \times 10^{16}$ at.cm⁻³ et l'épaisseur 160,00 µm. Sur la figure 13A, la variation du courant I_{cc} en valeur absolue en fonction de l'épaisseur de Si(n+) a été constatée. Le courant de court-circuit I_{cc} en valeur absolue est constant de 0,10 jusqu'à 1 µm, à partir de cette valeur nous remarquons une diminution progressive. Cette dernière est provoquée par la recombinaison des porteurs de charges. La diminution du courant de court-circuit peut être élucidée par une décroissance du nombre de porteurs stockés dans jonction PN [18, 20, 21, 27]. La figure 13B donne la variation de la tension V_{co} en fonction de l'épaisseur Si(n+). La tension V_{co} augmente progressivement pour atteindre le maximum à une épaisseur de 10 à 15 µm. L'augmentation de la tension V_{co} peut être explicitée par une croissance de l'intensité du flux lumineux transmis qui provoque une élévation du nombre de porteurs photocréés dans la jonction PN. Cette élévation a été confirmée par la littérature [28]. Nous observons une diminution de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur du Si(n+) sur la figure 13C. Cette diminution peut être expliquée par la chute du nombre de porteurs photocréés. Nous avons remarqué que lorsque l'épaisseur du Si(n) augmente, la distance parcourue par les porteurs photocréés augmente aussi. Les porteurs ayant une faible énergie ont une durée de vie courte. Ce qui ne leur permet pas de traverser la jonction, ils se recombinent et par conséquent une décroissance du nombre de porteurs. Ce qui entraîne une décroissance de la puissance et de la tension V_{co} à partir de 15,00 µm. Cette diminution a été confirmée dans la littérature [28]. La figure 13D représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur du Si(n+). Le facteur de forme augmente de façon progressive pour atteindre le maximum, à une épaisseur égale à 20,00 µm. Cela peut être expliqué par le fait que l'augmentation de l'épaisseur induit une augmentation de la performance de la cellule. Une baisse légère du rendement en fonction de l'épaisseur du Si(n+) de 0,10 jusqu'à 5,00 µm sur la figure 13E a été constaté. Celle-ci est due à une augmentation de la vitesse de recombinaison [15, 17, 21]. Ensuite nous notons un pic à 10,00 µm, ceci montre que 10,00 µm est une épaisseur idéale pour l'augmentation de la capacité de conversion. La meilleure performance et la capacité de conversion de la cellule sont respectivement obtenues à 72,61 % et à 16,42 %.

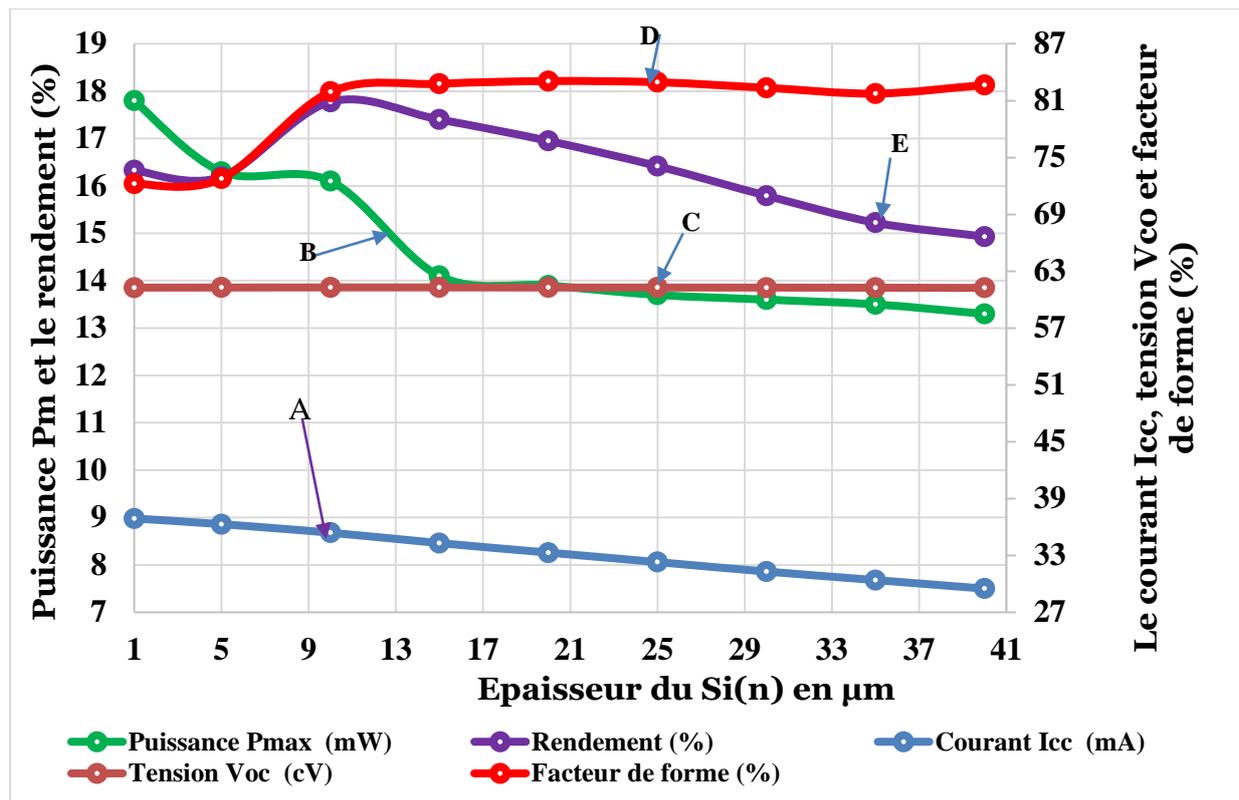


Figure 13 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'épaisseur du Si(n+) en micromètre

La Valeurs optimale de l'épaisseur de Si(n+) est fixée donnant un courant court-circuit 36,9 mA, la tension 61,27 cV, le facteur de forme 72,561 % et un rendement de 16,405%.

III.5 Influence de l'épaisseur ZnO(n+) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n)/Si(n)/Si(p)

Le dopage de ZnO(n+) est fixé à $2,20 \times 10^{19}$ at.cm⁻³, son épaisseur à 0,015 μm pour la région 1, celui de Si(n+) est $2,20 \times 10^{18}$ at.cm⁻³ avec une épaisseur de 0,50 μm pour la région 2. Un dopage de $1,00 \times 10^{16}$ at.cm⁻³ avec une épaisseur de 160,00 μm est utilisé dans la région 3. La courbe 14C représente la variation de la tension de V_{co} en fonction de l'épaisseur du ZnO(n+).

L'augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} est provoquée par une élévation du flux lumineux transmis sur la courbe 14C. Le nombre de porteurs photocréés croît. Le flux transmis augmente ce qui provoque une croissance des porteurs de charges photocréés. La durée de vie des porteurs minoritaires ne leur permet pas de traverser la jonction PN, ils sont stockés à la jonction ; due à une croissance de V_{co} . Au-delà de 5,00 μm , nous constatons que la tension reste constante. Ce nombre de porteurs minoritaires reste constant.

Nous constatons une décroissance du courant de court-circuit (A) en valeur absolue en fonction de l'épaisseur du ZnO sur la courbe 14D. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que

lorsque l'épaisseur du ZnO(n+) augmente, nous avons une croissance de la distance parcourue par les porteurs de charges. Les porteurs de charges ayant une faible énergie ne peuvent pas traverser la jonction, ils se recombinent [19, 21, 22, 27]. Ce qui entraîne la diminution du nombre de porteurs minoritaires collectés. Celle-ci entraîne une diminution du courant de court-circuit, confirmé dans la littérature [28]. La courbe 14E représente la variation de la puissance en fonction de l'épaisseur du ZnO. Nous constatons que lorsque l'épaisseur du ZnO croît, nous avons une diminution de la puissance maximale. Cette décroissance de la puissance peut être due à une diminution des porteurs majoritaires dans la jonction PN à cause de la recombinaison.

La figure 14A représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche anti-réfléchissante ZnO(n+). Nous remarquons que lorsque l'épaisseur de la couche ZnO augmente, ceci provoque une augmentation de l'amélioration de la performance de la cellule solaire.

Nous notons une croissance du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet ZnO(n+) de 0,015 jusqu'à 5,00 μm sur la figure 14B. Le rendement baisse progressivement au-delà de cette dernière valeur. L'épaisseur du ZnO est un paramètre qui augmente le flux transmis entraînant une augmentation de la tension V_{co} , dû à une croissance du rendement de 0,015 à 5,00 μm [16, 19, 21]. Au-delà de cette dernière valeur nous avons atteint l'épaisseur idéale (5 μm) du ZnO qui constitue un frein à la diffusion des longueurs d'ondes incidentes des photons. Ce qui diminue la capacité énergétique de conversion de la cellule solaire.

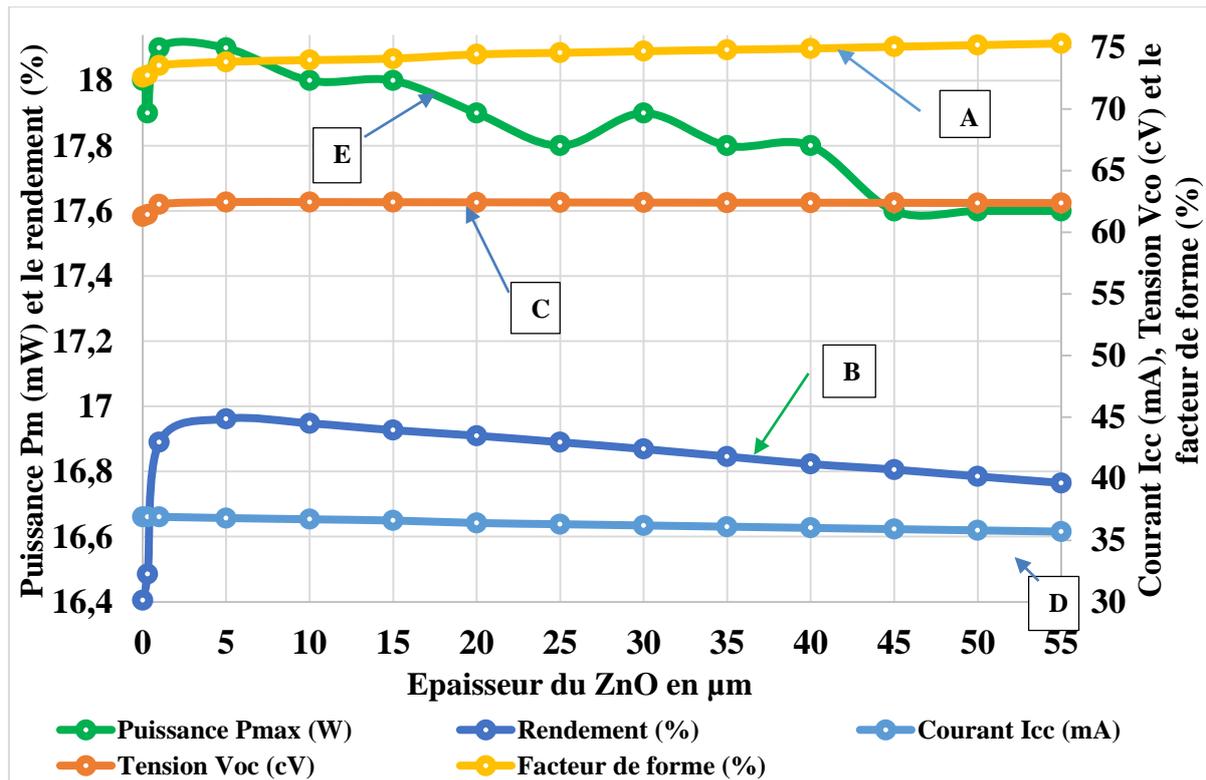


Figure 14 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'épaisseur du ZnO(n+) en micromètre

La valeur optimale de l'épaisseur du ZnO est de 0,3 μm permettant d'obtenir un courant de court-circuit 36,9 mA, une tension de 61,44 cV, un facteur de forme de 72,561 % et rendement de 16,485 %.

III.6 Influence du dopage N_A de Si(p) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p)

Le dopage de ZnO(n+) est fixé à $2,20 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$, son épaisseur à 0,015 μm pour la région 1, celui de Si(n) à $1,70 \times 10^{17} \text{ at.cm}^{-3}$ avec une épaisseur de 0,50 μm pour la région 2. Nous avons une épaisseur de 160,00 μm . Nous avons fait varier le taux de dopage du Si(p) en laissant les autres paramètres fixent.

La variation de la tension V_{co} en fonction du taux de dopage est donnée sur la figure 15B. Une décroissance de la tension V_{co} a été observée lorsque le taux de dopage de Si(p) augmente. L'augmentation du taux de dopage du substrat entraîne une élévation du nombre de porteurs, provoquant une croissance de la recombinaison du nombre de porteurs de charges due la baisse de la tension V_{co} .

La figure 15C représente la variation du courant de court-circuit en valeur absolue en fonction du taux de dopage. Plus le dopage Si(p) augmente, plus le courant de court-circuit I_{cc} décroît

ceci est dû aux défauts dans le cristal confirmé dans la littérature [21, 27]. Nous avons une augmentation de la recombinaison et les pertes résistives qui provoquent la réduction de l'absorption des photons dans le substrat de silicium ; ce qui entraîne une baisse du courant de court-circuit I_{cc} .

Une décroissance de la puissance maximale P_{max} en fonction du taux de dopage de Si(p) sur la figure 15A a été constatée. L'augmentation du taux de dopage entraîne une croissance de nombre de défauts dans le cristal du substrat de silicium. Ces impuretés entraînent la recombinaison des porteurs de charges, réduisant ainsi le nombre de porteurs.

En effet, l'élévation du taux de dopage N_D entraîne une diminution de l'énergie de la bande interdite et une augmentation de l'absorption optique. Celles-ci vont entraîner une croissance de la vitesse de recombinaison des porteurs injectés photocrés dans le substrat [4, 21].

La formule du facteur de forme est donnée dans la relation 17 en fonction du courant maximal I_m (mA), de la tension maximale V_m (mV), de la tension de circuit ouvert V_{co} (V) et le courant de court-circuit I_{cc} (A).

$$FF = \frac{I_m V_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (17)$$

Le facteur de forme est le paramètre sensible au taux de dopage N_D du silicium. Plus le taux de dopage augmente plus le facteur de forme décroît, ceci est due aux défauts dans le cristal de silicium ; ce qui fait que la cellule perd ses performances d'après la littérature [4]. Les paramètres électriques décroissent de $7,72 \times 10^{16}$ à $1,00 \times 10^{20}$ at.cm^{-3} . Les meilleures valeurs optimisés pour les paramètres sont $I_{cc} = 36,80$ mA, $V_{co} = 0,62$ volt pour un taux de dopage de $7,72 \times 10^{16}$ at.cm^{-3} .

La figure 15E présente la variation du rendement en fonction du taux de dopage du substrat Si(p). Le rendement est influencé par le taux de dopage N_D du silicium. Ce dernier provoque la baisse du rendement. Cela est entraîné par une dégradation des performances de la cellule causée par des défauts dans le substrat de Si(p). Les paramètres électriques décroissent.

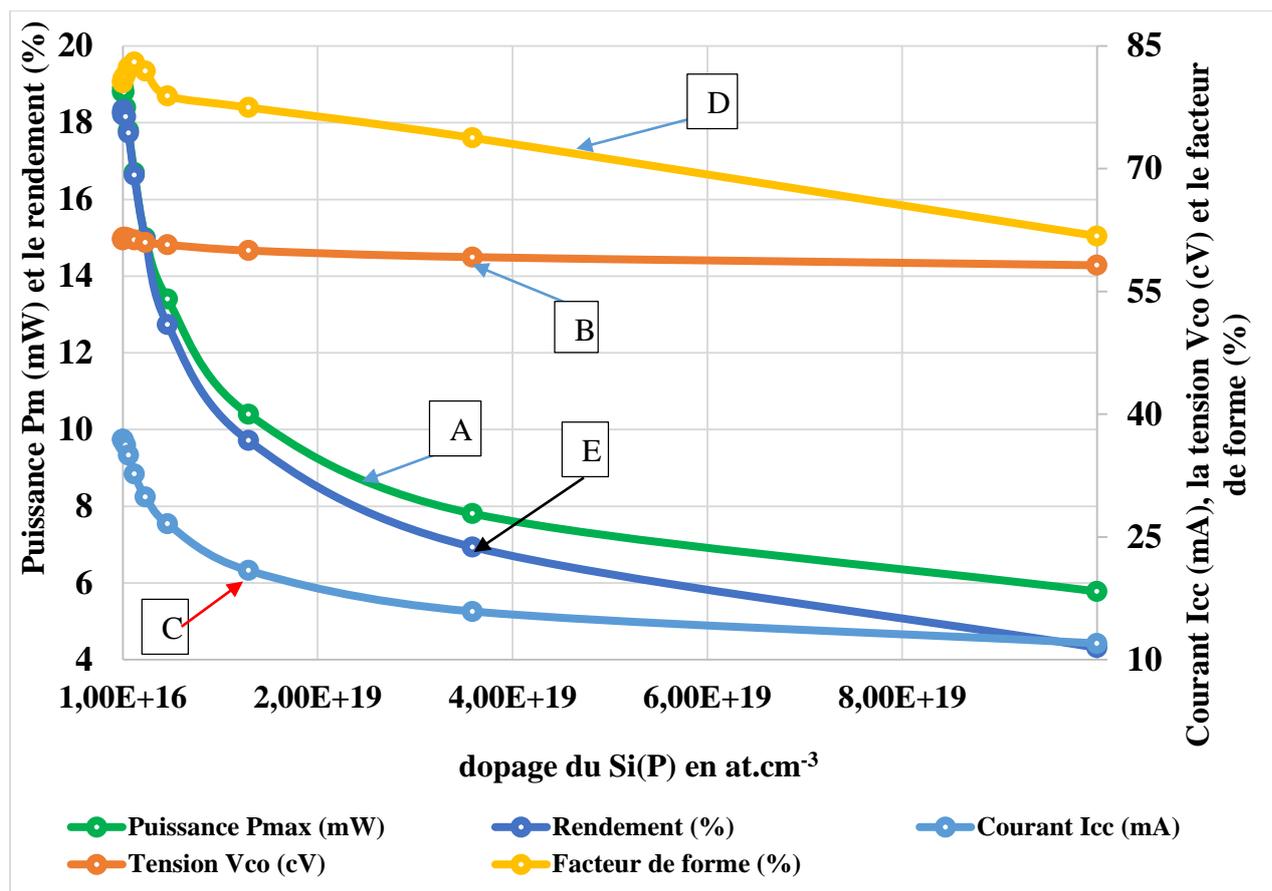


Figure 15 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction du taux de dopage du Si(p)

La valeur optimale est $7,7210^{16}$ at.cm^{-3} , permettant d'obtenir un courant de court-circuit 36,8 mA, une tension de 61,6 cV, un facteur de forme de 80,929, un rendement de 18,343.

III.7 Influence du dopage N_D de Si(n+) sur les paramètres électriques de la cellule ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p)

Le dopage du ZnO(n+) est fixé à $2,20 \times 10^{19}$ at.cm^{-3} , son épaisseur à $0,015 \mu\text{m}$ pour la région 1. Pour la région 3 du Si(p), le taux de dopage est de $1,00 \times 10^{16}$ at.cm^{-3} , pour une épaisseur de $160,00 \mu\text{m}$. Pour la région 2, une épaisseur de $0,50 \mu\text{m}$ a été utilisée. Ces courbes sont obtenus en prenant en compte la surface du dispositif (Device area en anglais) vaut 1 cm^2 . Le courant de court-circuit I_{cc} en valeur absolue a baissé progressivement en fonction du dopage Si(n+) sur la figure 16A. Cette baisse peut être expliquée par une augmentation des atomes étrangers. Ceci augmente le défaut dans le cristal et la recombinaison devient importante. Ce qui va entraîner une diminution du nombre de porteurs de charges, provoquant une diminution du courant maximal. Une réduction du nombre de porteurs de charges stockés dans la jonction PN a été constatée. Celle-ci provoque une baisse progressive du courant de court-circuit I_{cc} confirmé dans la littérature par des recombinaisons [4, 15, 21, 27]. Le courant I_{cc} en valeur absolue est estimé à

36,50 mA. Une augmentation du taux de dopage induit une croissance des défauts qui contribue à l'augmentation de la recombinaison [4]. La figure 16B représente la variation de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de Si(n+). L'augmentation du dopage provoque une croissance de la tension de circuit ouvert. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que lorsque le taux de dopage N_D augmente, le nombre de porteurs de charges dans le Si(n+) croit. Les porteurs majoritaires ayant beaucoup d'énergie traversent la jonction. Les minoritaires d'énergie faible sont stockés dans la jonction PN ; ce qui va induire une élévation de la tension de circuit ouvert V_{co} . Les valeurs sont optimisées à $1,39 \times 10^{17} \text{ at.cm}^{-3}$ pour une tension de circuit ouvert 0,62 volt.

La figure 16C représente la variation de la puissance maximale en fonction du taux de dopage Si(n+). La puissance maximale a chuté pour les valeurs faibles du taux de dopage de $1,00 \times 10^{16}$ à $1,00 \times 10^{18} \text{ at.cm}^{-3}$ respectivement de 18,8 à 17,2 mW. Au-delà de cette valeur, la puissance augmente légèrement en fonction du taux dopage de Si(n+). Cette diminution est due à la réduction du nombre de porteurs minoritaires.

La figure 16E présente la variation du facteur de forme en fonction du taux de dopage de Si(n+). Le dopage entraîne une amélioration progressive de la performance de la cellule solaire ; le facteur de forme atteint un maximum à 82,07 % pour un taux de dopage de $1,00 \times 10^{20} \text{ at.cm}^{-3}$. Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts.

La figure 16D représente la variation du rendement en fonction du dopage de silicium. Nous avons une diminution du rendement en fonction du taux dopage de Si(n+) jusqu'à une valeur de 15,66 % pour un dopage de $1,93 \times 10^{18} \text{ at.cm}^{-3}$. Il augmente jusqu'à 16,74 % pour un dopage de $5,18 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$. Les dopages permettent d'augmenter la conductivité électrique, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme des facteurs de pertes confirmé dans la littérature [4, 15, 16, 21]. Ce qui entraîne la diminution de la performance de la cellule.

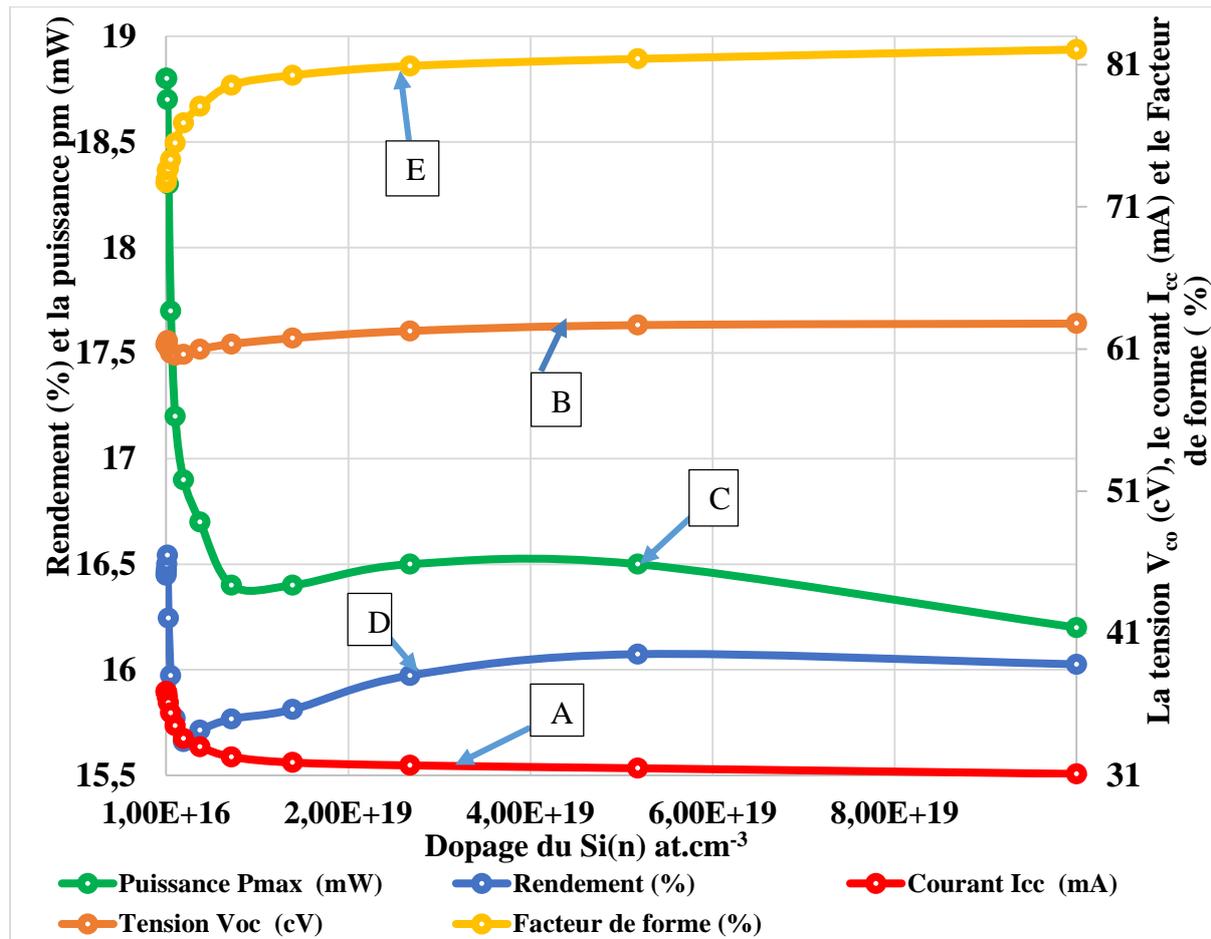


Figure 16 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction du taux de dopage de Si(n+)

La dopage optimal est de $1,3910^{17} \text{ at.cm}^{-3}$ donnant un courant de court-circuit de $1,3910^{17} \text{ at.cm}^{-3}$ donnant un courant de court-circuit I_{cc} de 36,5 mA, une tension V_{co} de 61,59 cV, un facteur de forme de 73,588%, un rendement de 16,543%.

III.8 Influence de l'angle de texturation de ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p) électriques ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p)

Dans cette partie les paramètres électriques sont obtenus lorsque la surface est de 1 cm^2 . La profondeur est fixée à $0,30 \mu\text{m}$ et un taux de dopage de la région 3 est de $1,00 \times 10^{16} \text{ at.cm}^{-3}$, une épaisseur de $160,00 \mu\text{m}$. Pour la région 1 nous avons une épaisseur de $0,015 \mu\text{m}$, un taux de dopage de $2,20 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$. Pour la région 2 nous avons une épaisseur $0,50 \mu\text{m}$ et un dopage $1,70 \times 10^{17} \text{ at.cm}^{-3}$.

La courbe 17A représente une décroissance de la tension de circuit ouvert en fonction de l'angle de texture. Plus l'angle de texture est grand, plus la morphologie de la face texturée tend à être plane. La réflexion sur la face avant adjacente sera éliminée, ce qui va causer une réduction

du phénomène de confinement des photons, confirmé dans la littérature [4, 21, 27]. Ceci provoque une décroissance de la quantité de photons absorbés dû à une diminution du nombre de porteurs de charges provoquant la diminution de la tension V_{co} .

La courbe 17B donne la variation de courant I_{cc} en valeur absolue en fonction de l'angle de texture. Nous constatons que lorsque l'angle de texturation est de 0° , nous avons un courant de court-circuit égale à une valeur minimale 36,70 mA. Cette valeur augmente avec l'ouverture de l'angle de texture pour atteindre une valeur maximale à 37,20 mA correspondant un angle de texturation de 70° .

Ces variations sont en effet liées au confinement optique du flux lumineux incident. Lorsque l'angle de texture augmente, le confinement optique augmente ; le flux lumineux absorbé croit. Le courant de court-circuit étant proportionnelle au flux lumineux nous notons une nette amélioration. Par contre lorsque l'angle de texture dépasse 70° , sa morphologie pyramidale tend vers une structure plane qui diminue le confinement optique. Ce qui donne une décroissance du courant I_{cc} confirmé dans la littérature [4, 21, 27].

La courbe 17C représente la variation de la puissance maximale en fonction de l'angle de texturation. Au-delà de 70° nous constatons une diminution de la puissance maximale, celle-ci est causée par le phénomène de confinement des photons. Plus l'angle est grand au-delà 70° , plus le confinement et l'absorption optique diminuent. La courbe 17D représente la variation du facteur de forme en fonction de l'angle de texture.

Le facteur de forme décroît en fonction de l'angle de texturation (voir courbe 17D) ; plus ce dernier augmente plus la quantité de photons absorbés dans la cellule diminue. Cette diminution des photons absorbés entraîne la perte de la performance et de la capacité de conversion (courbe 17E). Le rendement, le facteur de forme sont respectivement optimisés à 16,42 % et 72,13 %.

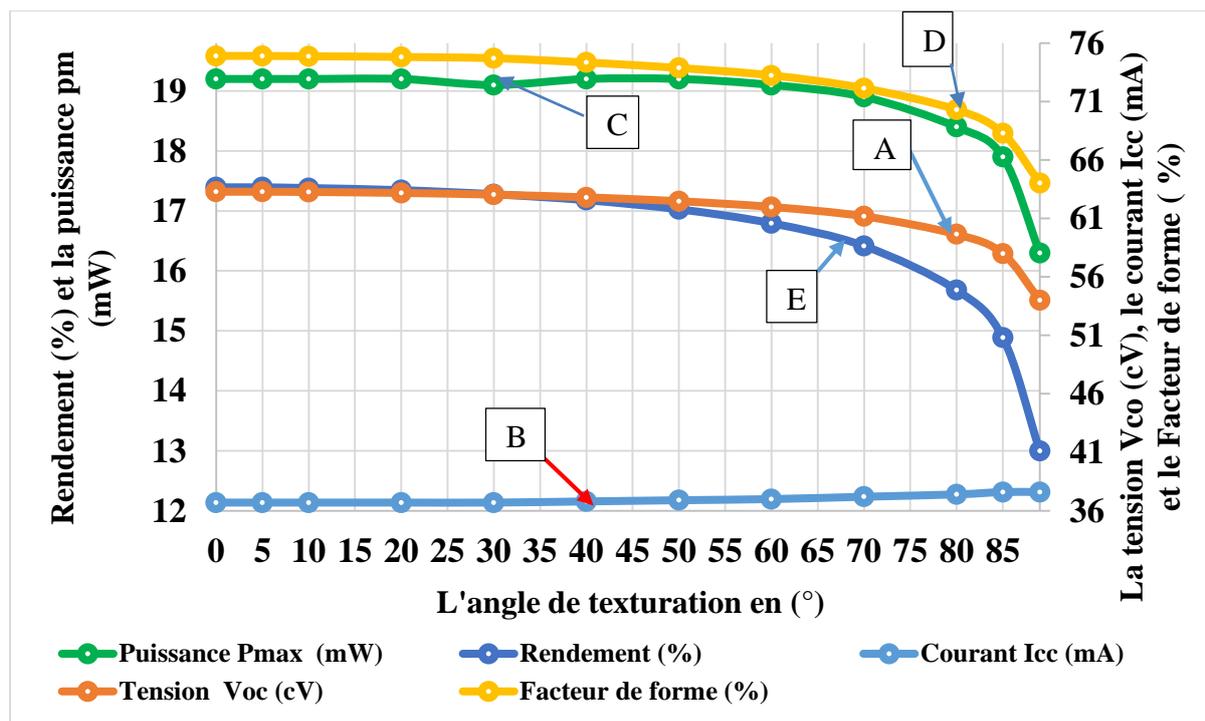


Figure 17 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de l'angle de texturation ($^{\circ}$)

L'angle de texture ($^{\circ}$) est optimisé à 70° donnant un courant de court-circuit de 37,6 mA, une tension V_{co} de 61,18 cV, un facteur de forme 72,132 % et un rendement de 16,416 %.

III.9 Influence de la profondeur du front de texturation de ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p) sur les paramètres électriques ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p)

Ces courbes ont été obtenues lorsque l'angle de texture vaut $\Theta = 54,74^{\circ}$. Pour la région 3, le dopage est de $1,00 \times 10^{16} \text{ at.cm}^{-3}$, d'épaisseur $160,00 \mu\text{m}$ et celui de la région 2 est de $2,20 \times 10^{18} \text{ at.cm}^{-3}$, d'épaisseur $0,50 \mu\text{m}$. Pour la région 1, nous avons un dopage de $2,20 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$ et une épaisseur de $0,3 \mu\text{m}$.

La figure 18B représente la variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la profondeur de texturation de la face avant. La faiblesse de la profondeur de texturation permet une diminution appréciable la quantité des photons transmis, car nous avons une morphologie de la face avant presque plane. Ce qui entraîne une diminution du flux lumineux transmis, d'où la décroissance de la tension V_{co} , pour les faibles profondeurs de texture de 0 à $1,00 \mu\text{m}$. Les valeurs optimisés sont obtenues à une épaisseur de $0,25 \mu\text{m}$ lorsque la tension de circuit ouvert est égale à 0,60 volt.

La figure 18C donne la variation de la courant I_{cc} en valeur absolue en fonction de la profondeur de texturation. Une décroissance du courant de court-circuit I_{cc} en valeur absolue à partir de $0,50$ à $1,00 \mu\text{m}$ a été constatée. Il augmente jusqu'à $5,00 \mu\text{m}$, pour être constant au-delà de

cette valeur. Lorsque la profondeur est très faible, la réflexion multiple sur la face adjacente sera éliminée ce qui va provoquer la chute du courant de court-circuit. Cette augmentation de la profondeur de texturation à une certaine valeur de la profondeur de texturation, nous avons dépassé l'épaisseur du ZnO qui est de 0,015 μm [4, 15, 21]. Ce qui provoque une décroissance du confinement optique c'est raison pour laquelle le courant de court-circuit I_{cc} diminue. La valeur absolue du courant de court-circuit décroît de 0 à 1 μm . Celle-ci peut être expliquée par une réduction du confinement optique due à une diminution de l'absorption des photons. De 1 à 5 μm nous avons une augmentation du courant de court-circuit I_{cc} car le confinement des photons devient important due à l'augmentation du courant I_{cc} en valeur absolue. Les paramètres électriques sont proportionnels aux flux lumineux transmis.

La figure 18A montre la variation de la puissance maximale en fonction de la profondeur de texturation. La puissance maximale décroît de 0 à 1,00 μm , cela peut être expliqué par une réduction du confinement optique due à une réduction de l'absorption des photons. La valeur optimisée est obtenue à une épaisseur de 0,25 μm lorsque le courant de court-circuit I_{cc} est égal à 31,70 mA. Nous savons que le facteur de forme est donné par relation 17 :

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (18)$$

La tension V_{co} et courant I_{cc} sont reliés au facteur de forme par la formule 19 :

$$FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc} = I_m \cdot V_m \quad (19)$$

La figure 18D représente la variation du facteur de forme FF en fonction de la profondeur de texturation. Plus la profondeur de texture augmente, plus le facteur de forme diminue. Ceci peut être dû au fait que lorsque la profondeur de texture augmente, cela provoque une augmentation de l'absorption du photon entraînant la création d'un grand nombre de porteurs de charges qui se recombinent. Ce qui entraîne une diminution du courant maximal et une décroissance du facteur de forme [4, 15, 21]. Ce qui induit une réduction du confinement optique des photons due à une diminution de l'absorption des photons confirmé par la littérature [4, 21]. La figure 18E représente la variation du rendement en fonction de la profondeur de texturation. Nous remarquons une diminution du rendement en fonction de la profondeur de texture. Celle-ci peut être explicitée par le fait que lorsque la profondeur de texture augmente jusqu'à dépasser l'épaisseur du ZnO 0,015 μm , ce qui va entraîner la perte de la performance de la cellule. La perte de performance est provoquée par la réduction du confinement optique due à une diminution du nombre de porteurs de charges.

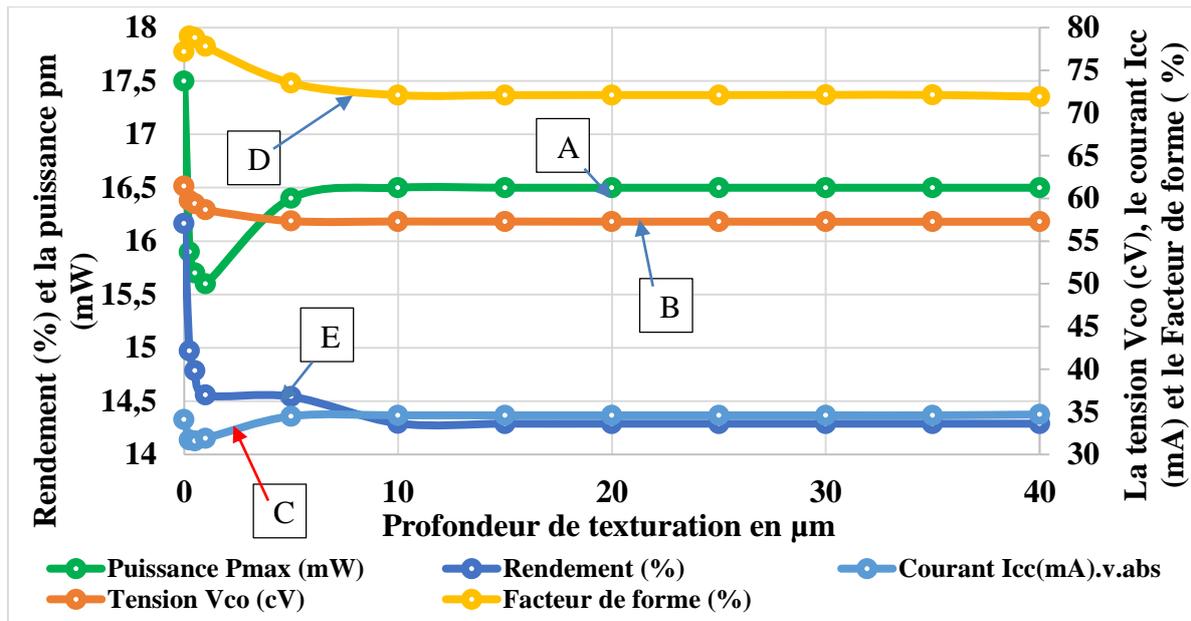


Figure 18 : Variation des paramètres électriques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , FF et η) en fonction de la profondeur de texturation

La valeur optimale de la profondeur de texture est de $0,25 \mu\text{m}$ donnant un courant de court-circuit de $59,77 \text{ cV}$, $79,017 \%$ et un rendement de $14,971 \%$.

III.10 Paramètres optimisés de la cellule solaire

Pour toutes les variations, les meilleurs paramètres ont été pris puis injectés dans une autre modélisation de la cellule solaire. Le tableau ci-dessous représente les données optimisées qui ont permis d'obtenir des meilleurs résultats de la modélisation sous PC1D.

Tableau 2 : Paramètres optimisés de la cellule solaire $\text{ZnO}(n+)\backslash\text{Si}(n+)\backslash\text{Si}(p)$

Paramètres	Valeurs
L'épaisseur du Si(p) en μm	300,00
L'épaisseur du Si(n+) en μm	0,50
L'épaisseur du ZnO(n+) en μm	0,015
Le taux de dopage du Si(p) en at.cm^{-3}	$7,72 \times 10^{16}$
Le taux de dopage du Si(n+) en at.cm^{-3}	$1,39 \times 10^{17}$
Le taux de dopage du ZnO(n+) en at.cm^{-3}	$2,2 \times 10^{18}$
L'angle de texturation en ($^\circ$)	70
La profondeur de texturation en μm	0,25

III.11 Influence des paramètres optimisés sur les caractéristiques électriques

A partir de la cellule de référence, tout d'abord l'épaisseur du ZnO a été variée de 0,015 μm à 55,00 μm , l'angle de texture de 0 à 89 ° et la profondeur de texture de 0 à 40 μm . Ensuite, dans le silicium dopé de type N+, l'épaisseur et le taux dopage ont été fait varier. En fin, dans le silicium de type P utilisé comme substrat, nous avons fait varier l'épaisseur et le taux de dopage. L'ensemble des variations est résumé dans le tableau 10. Les résultats de ces simulations, nous ont permis de déceler des valeurs optimales (voir tableau 9) de certains paramètres qui nous permettrons d'optimiser les performances de notre cellule ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p).

Les données du tableau 9 ont été injectées dans le logiciel et les résultats obtenus nous ont permis de tracer les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension. Les valeurs extraites de ces courbes sont données dans le tableau 11.

Nous remarquons une amélioration du courant de court-circuit qui passe de 37,80 à 39,00 mA, de la tension de circuit ouvert qui passe de 62,00 à 74,08 mV. Nous remarquons aussi une augmentation de la puissance qui passe de 19,00 à 24,70 mW. Le rendement de conversion qui passe de 18,34 à 24,70 %, le facteur de forme qui passe de 80,92 à 85,49 %. Cette amélioration des performances de notre cellule peut être dû à une diminution de la recombinaison au niveau des deux jonctions que sont la jonction ZnO (n+)/Si (n+) et la jonction Si(n+)/Si(p).

Tableau 3 : Variation des paramètres de la cellule solaire ZnO(n+)\Si(n+)\Si(p)

paramètres	valeurs
L'épaisseur du si(p) en μm	10 à 900
L'épaisseur du si(n+) en μm	0,1 à 40
L'épaisseur du ZnO(n+) en μm	0,015 à 55
Le taux de dopage si(p) en at.cm^{-3}	1×10^{16} à 1×10^{20}
Le taux de dopage si(n+) en at.cm^{-3}	1×10^{16} à 1×10^{20}
L'angle de texturation en (°)	0 à 89
La profondeur de texturation en μm	0 à 40

Dans cette partie, il sera question de relater les impacts des paramètres optimisés sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire. Nous avons utilisé un angle de texturation de 70 ° et une épaisseur Si(p) de 300,00 μm . Ces dernières valeurs que nous avons optimisées, nous ont permis d'obtenir la caractéristique courant tension et puissance tension présentée dans la courbe ci-dessous. Elle permet d'obtenir le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert, la puissance maximale et le courant maximal. Elle nous fournit indirectement le facteur

de forme FF et le rendement η . La figure permet d'obtenir le courant I_{cc} , la tension V_{co} et la Puissance P_{opt} .

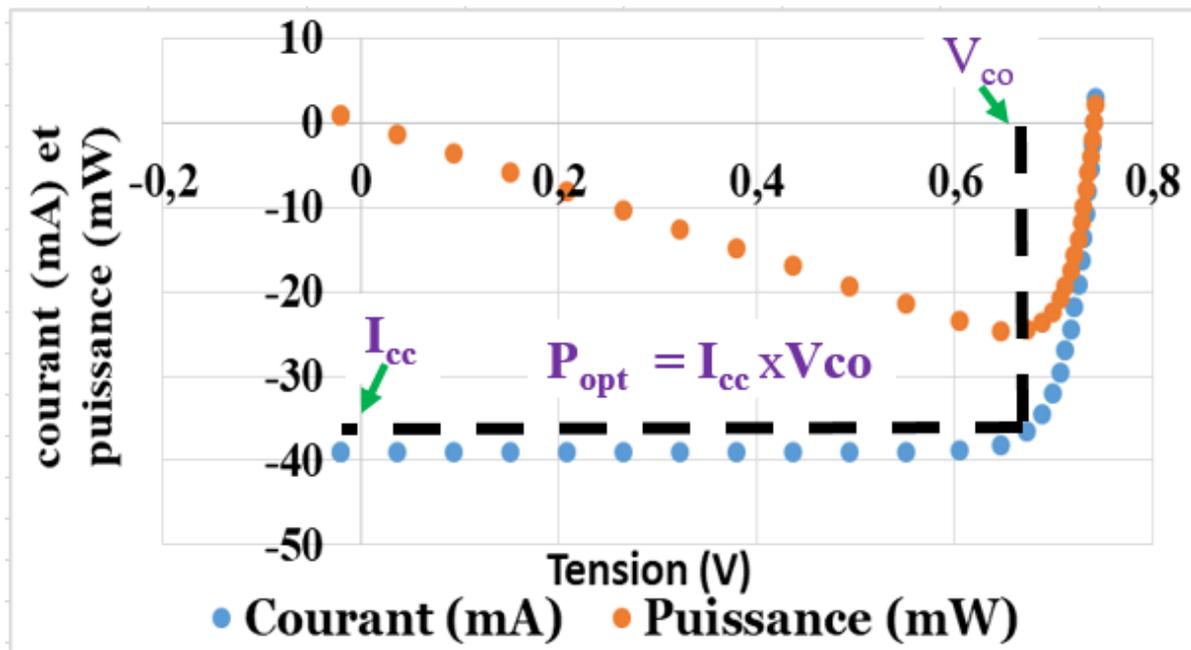


Figure 19 : Caractéristique puissance et courant en fonction de la tension de la cellule ZnO(n+)\Si(n+)\Si(p)

Le tableau 11 suivant représente la caractéristique courant tension et puissance tension de la cellule ZnO(n+)\Si(n+)\Si(p) pour une épaisseur de 300,00 μm et un angle de texture à 70°. A partir du tableau 12, la puissance P_{max} a été obtenue, correspondant à 24,60 mW (la ligne verte).

La modélisation avec les paramètres optimisés, nous a permis d'améliorer les performances de la cellule solaire.

Tableau 4 : Paramètres obtenus après optimisation de la cellule solaire

I_{cc} (mA)	V_{co} (mV)	P_m (mW)	FF(%)	η (%)
39,00	74,08	24,60	85,49	24,70

Après avoir fait la modélisation avec les paramètres optimisés sous PC1D. Les résultats obtenus, nous offre un facteur de forme de 85,49 % et un rendement de 24,70 % pour une épaisseur de 300,00 μm et un angle de 70°.

III.12 Comparaison des résultats de la modélisation avec ceux de la littérature

Le tableau 13 suivant donne une comparaison entre les résultats de la modélisation et ceux de la littérature. Cette comparaison montre que la cellule de la figure 10 peut avoir un rendement de 24,70 %. Un rendement de 19,04 % est obtenu dans la littérature avec couche anti-

réfléchissante ZnO d'épaisseur 0,015 μm par contre sans couche antireflet nous avons trouvé 16,40 %. En comparant les résultats obtenus pour la cellule ZnO(n+) /Si(n+) /Si(p) avec ceux de la littérature ZnO(n+)/Si (n+)/Si(p). Un rendement de 24,70 % est obtenu supérieur à celui de la littérature qui est de 19,04 %. Nous remarquons aussi l'impact positif de la couche antireflet sur les paramètres électriques de la cellule. La couche antireflet joue un rôle très important pour l'augmentation des paramètres électriques. La différence entre le rendement de la littérature et celui de la modélisation est due à la texturation de la surface avant du ZnO.

Tableau 5 : Influence de la couche antireflet ZnO

Epaisseur de l'oxyde de Zinc (ZnO) = 0,015 μm			
Oxyde de Zinc	Avec Couche antireflet		Sans couche antireflet
Nature du résultat	Modélisation	Littérature [1]	Littérature [1]
I_{cc} (mA)	39,00	34,89	29,82
V_{co} (mV)	74,08	65,00	66,00
P_m (mW)	24,70	19,04	16,40
FF (%)	85,49	83,80	83,10
η (%)	24,70	19,04	16,40

Conclusion

En somme, cette partie nous a permis de connaître les impacts des paramètres de la cellule étudiée sur les paramètres électriques. Après avoir étudié les effets des paramètres de la cellule l'épaisseur, le taux de dopage, l'angle de texture et la profondeur de texturation, nous avons optimisé ces variables. Nous avons pris les meilleurs paramètres optimisés puis les injectés dans une nouvelle modélisation afin d'obtenir finalement les résultats. Les résultats obtenus, nous offre un facteur de forme de 85,49 % et un rendement de 24,70 % pour une épaisseur de 300,00 μm et un angle de 70 °. Les résultats optimisés ont été comparés avec ceux de la littérature.

Conclusion Générale

Une optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque est nécessaire quel que soit la structure, pour avoir un bon rendement. Fréquemment, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de l'émetteur de la couche antireflet ZnO, du silicium dopé N+, du silicium dopé P, les taux de dopage du ZnO(n+), du silicium Si(p) et de la couche intermédiaire du silicium de Si(n+), l'angle de texturation et la profondeur de texturation.

Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface avant. L'optimisation des

paramètres de la cellule solaire comprend donc de nouvelle étude sur la détermination du rendement et du facteur de forme. La tension de circuit ouvert, le courant I_{cc} qui doivent être de plus en plus maximaux, afin d'obtenir une structure conduisant à un rendement maximal. Notre objectif est d'améliorer les performances de la cellule solaire étudiée. La simulation sous le logiciel PC1D de la cellule solaire $ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p)$, nous a permis de définir l'influence des paramètres de la cellule. Ces paramètres tels que la concentration des impuretés du silicium, des épaisseurs, des angles de texturation et la profondeur de texturation de la couche antireflet sur les caractéristiques photovoltaïques de cette cellule solaire. Les résultats obtenus montrent que cette cellule solaire peut avoir un rendement de conversion de l'ordre de 24,70 % pour une épaisseur de 300,00 μm du substrat de silicium $Si(p)$. Nous avons obtenu un facteur de forme de 85,49 %, un courant de court-circuit de 39,00 mA et une puissance de 24,60 mW. Les simulations ont montré que le rendement optimal est atteint lorsque les concentrations des impuretés, les épaisseurs sont respectés. Les résultats obtenus en simulation montrent que le dépôt d'une couche antireflet $ZnO(n+)$ de surface texturée en homojonction, améliore considérablement la performance et la capacité de conversion de la cellule solaire. Nous avons utilisé une simulation numérique à une dimension PC1D, afin d'optimiser les paramètres de la cellule $ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p)$. Nous avons aussi analysé l'influence de l'épaisseur, de l'angle de texturation, de la profondeur de texturation et du taux dopage de la couche $ZnO(n+)$ sur la cellule étudiée $ZnO(n+)/Si(n+)/Si(p)$.

En somme dans ce travail nous avons modélisé une cellule solaire composée de trois parties dont les paramètres optimisés sont ainsi indiqués comme suit :

La première partie est constituée d'une couche antireflet de $ZnO(n+)$ d'épaisseur 0,015 μm , dont la face avant a été texturée pyramidale de 70° dopé N^+ de profondeur 0,25 μm et un taux de dopage de $2,20 \times 10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$.

La deuxième partie est constituée de silicium dopé N^+ avec un dopage de $1,39 \times 10^{17} \text{ at.cm}^{-3}$ et une épaisseur de 0,50 μm .

La troisième partie, nous avons le substrat de silicium dont le taux dopage est $7,72 \times 10^{16} \text{ at.cm}^{-3}$ et son épaisseur vaut 300,00 μm .

Il est intéressant d'utiliser le Niobate de Plomb et de Zinc, Titanate de Plomb comme substrat $Pb(Nb_{2/3}, Zn_{1/3})O_3$ $PbTiO_3$ pour maximiser l'absorption des photons. Il serait intéressant de faire la réalisation et la caractérisation expérimentales de la structure de la cellule $Pb(Nb_{2/3}, Zn_{1/3})O_3$ $PbTiO_3$ texturée déposé sur le silicium.

Références Bibliographiques:

- [1] **Boubrik, N.** (2013). Comparaison des effets antireflets du SnO₂ et ZnO utilisés comme couches antireflet sur les propriétés de la cellule solaire à homojonction, thèse (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri), 105 p.
- [2] **Elmi, O. I.** (2017). Nouvelles structures de cellules solaires à base de silicium: texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion, thèse, (Doctoral dissertation, Lille 1), 214 p.
- [3] **MAUDET, F.** (2015). Elaboration de nouveaux traitements optiques hautes performances grâce à l'utilisation de la croissance en incidence rasante, Magister, université Blaise Pascal de CLERMONT-FERRANT, 35 p.
- [4] **Sambou, A. A.** (2011). Modélisation des propriétés électriques et optiques des nanostructures de silicium sous formes de pyramides et pyramides inversées, Mémoire 64 p.
- [5] **Salim, H.** (2015). Etude de la croissance des nanostructures de ZnO déposées par la technique spray ultrasonique, thèse, Université d'Oran, 91 p.
- [6] **Oleksiy, N.** (2005). Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, thèse, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 161 p.
- [7] **Hussain, B., Ebong, A., Ferguson, I.** (2015). Oxyde de zinc en tant que couche n active et revêtement antireflet pour cellule solaire à hétérojonction à base de silicium. Matériaux d'énergie solaire et cellules solaires, 139, 95-100.
- [8] **Kobor, D.** (2019). Elaboration et traitement de surfaces, Cours, université de Ziguinchor, 56 p.
- [9] **Mahfoud, A.** (2018). Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, thèse, université de SETIF 1, 187 p.
- [10] **Nait Kaci, F.** (2010). Etude et réalisation de couches d'oxynitride de silicium sur un substrat de silicium monocristallin ou multicristallin, thèse, (Doctoral dissertation), 124 p.
- [11] **RACHED, D. RAHAL, W. L.** (2010). Optimisation des rendements des cellules solaires au silicium polymorphe par modélisation de la courbure de bande de l'émetteur. U.S.T.O.M.B.-B.P.1505, El M'naouar, Oran, Algérie. Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements p.1-6.
- [12] **RAHMOUN, A. HABIBES, Z.** (2009). Dimensionnement d'une installation PV hybride «application à un système raccorde au réseau», mémoire, Université Aboubekr Belkaid de Tlemcen, (Doctoral dissertation), 92 p.

[13] **Mosbah, A.** (2009). Elaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de zinc, Thèse, Université MENTOURI CONSTANTINE, 150 p.

[14] **Cozzolino, R.** (2012). Etude de couches minces organométalliques déposées par procédé plasma basse pression à partir de Zirconium Tert Butoxide: application aux traitements antireflets, thèse, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 216 p.

[15] **Valour, A.** (2017). Synthèse d'oxyde de zinc dopé azote sous formes de poudre et de couche mince: caractérisation du type de semiconductivité, thèse, UNIVERSITÉ DE RENNES 1, 225 p.

[16] **Vahanian, E.** (2017). Développement de couches antireflets à base de nanoparticules de silice pour des systèmes photovoltaïques à haute concentration, thèse, université LAVAL, 173 p.

[17] **Abdelkader, M.** (2017). Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes, thèse, Université de Mostaganem, 182 p.

[18] **MAERTENS, A.** (2016). Etude de la réalisation d'une structure transistor (FET) pour l'observation de l'exciton du ZnO sous champ électrique, thèse, Ecole Doctorale EMMA, 187 p.

[19] **Chovet, A., Masson, P.** (2004). Physique des semi-conducteurs, Article, Université d'école polytechnique de Marseille, 75 p.

[20] **EL JOUAD, Z.** (2017). Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques, thèse, Université Bretagne, 213 p.

[21] **EHEMBA, A. K., NDIAYE, A., DIALLO, D., SOCE, M. M., DIENG, M.** (2018). Amélioration des paramètres électriques macroscopiques d'une cellule solaire à base de couche mince de Cu (In, Ga) Se₂ par l'optimisation des paramètres optiques et morphologiques de la couche la plus externe en face avant. Sciences Appliquées et de l'Ingénieur, 2(2), 20-29.

[22] **ELKAIEM, A.** (2015). Contribution au Développement des Matériaux Nano-Composites à Base de ZnO et Polymère Etude Structural et Optique, Mémoire, Université FRERE MENTOURI CONSTANTINE, 95 p.

[23] **Hussain, B., Ebong, A., Ferguson, I.** (2015). Oxyde de zinc en tant que couche n active et revêtement antireflet pour cellule solaire à hétérojonction à base de silicium. Matériaux d'énergie solaire et cellules solaires, Article, 139, 95-100.

[24] **Ternon, C., Kaminski, A., Constantin, D., Claudon, L. Volpi, F., Vincent, L. Bsiesy, A.** (2014). Simulation, élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques, Université Grenoble Alpes, Article, 13, p.1-11.

[25] **Diouf, D.** (2010). Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structures interdigitées en face arrière, thèse, Université de Paris 11, 158 p.

[26] **Marushka, V.** (2014). Contrôle des propriétés des couches optiques par bombardement ionique, Mémoire, École Polytechnique de Montréal, 118 p.

[27] **Zohir, A.** (2017). Etude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïques à simple jonction à base du silicium, Mémoire, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 113 p.

[28] **EL HAJJ, A.** (2013).Elaboration et caractérisation d'électrodes tri-couches sans indium appliquées aux dispositifs photovoltaïques organiques 154 p.

Annexes

ZnO solar cell - PC1D for Windows
File Device Excitation Compute Graph View Options Help

File: C:\Users\Lenovo\Desktop\PC1D Logiciel et Appuit\PC1DV59\PC1D5.9\PC1D5\ZnO solar cell.prm
(Double-click to add a description)

DEVICE
 Device area: $1 \times 10^0 \text{ cm}^2$
 Front surface texture depth: $5 \times 10^0 \text{ }\mu\text{m}$
No surface charge
 Exterior Front Reflectance: $5 \times 10^{0\%}$
No Exterior Rear Reflectance
No internal optical reflectance
 Emitter contact enabled
 Base contact enabled
No internal shunt elements

REGION 1
 Thickness: $5 \times 10^0 \text{ }\mu\text{m}$
 Material modified from zno (2).mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 8.66×10^0
 Band gap: $3.289 \times 10^0 \text{ eV}$
 Intrinsic conc. at 300 K: $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
 Refractive index: 1.9×10^0
 Absorption coeff. from zno_abs.abs
 Free carrier absorption enabled
 N-type background doping: $2.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
No front diffusion
No rear diffusion
 Bulk recombination: $\tau_n = 1 \times 10^{-3} \text{ }\mu\text{s}$, $\tau_p = 1 \times 10^{-6} \text{ }\mu\text{s}$
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination

REGION 2
 Thickness: $7.5 \times 10^{-2} \text{ }\mu\text{m}$
 Material modified from c:\users\lenovo\desktop\pc1d logiciel et appuit\pc1dv59\pc1d5.9\pc1d5\si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 1.19×10^1
 Band gap: $1.124 \times 10^0 \text{ eV}$
 Intrinsic conc. at 300 K: $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
 Refractive index: 3.58×10^0
 Absorption coeff. from c:\users\lenovo\desktop\pc1d logiciel et appuit\pc1dv59\pc1d5.9\pc1d5\si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 N-type background doping: $1.39 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
No front diffusion
No rear diffusion
 Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 1 \times 10^2 \text{ }\mu\text{s}$
No Front-surface recombination
No Rear-surface recombination

REGION 3
 Thickness: $6 \times 10^2 \text{ }\mu\text{m}$
 Material modified from c:\users\lenovo\desktop\pc1d logiciel et appuit\pc1dv59\pc1d5.9\pc1d5\si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 1.19×10^1
 Band gap: $1.124 \times 10^0 \text{ eV}$
 Intrinsic conc. at 300 K: $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
 Refractive index: 3.58×10^0
 Absorption coeff. from c:\users\lenovo\desktop\pc1d logiciel et appuit\pc1dv59\pc1d5.9\pc1d5\si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: $7.72 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
No front diffusion
No rear diffusion
 Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 1 \times 10^2 \text{ }\mu\text{s}$

Device Schematic

ZnO solar cell - PC1D for Windows
File Device Excitation Compute Graph View Options Help

Figure 20 : Fenêtre du logiciel PC1D

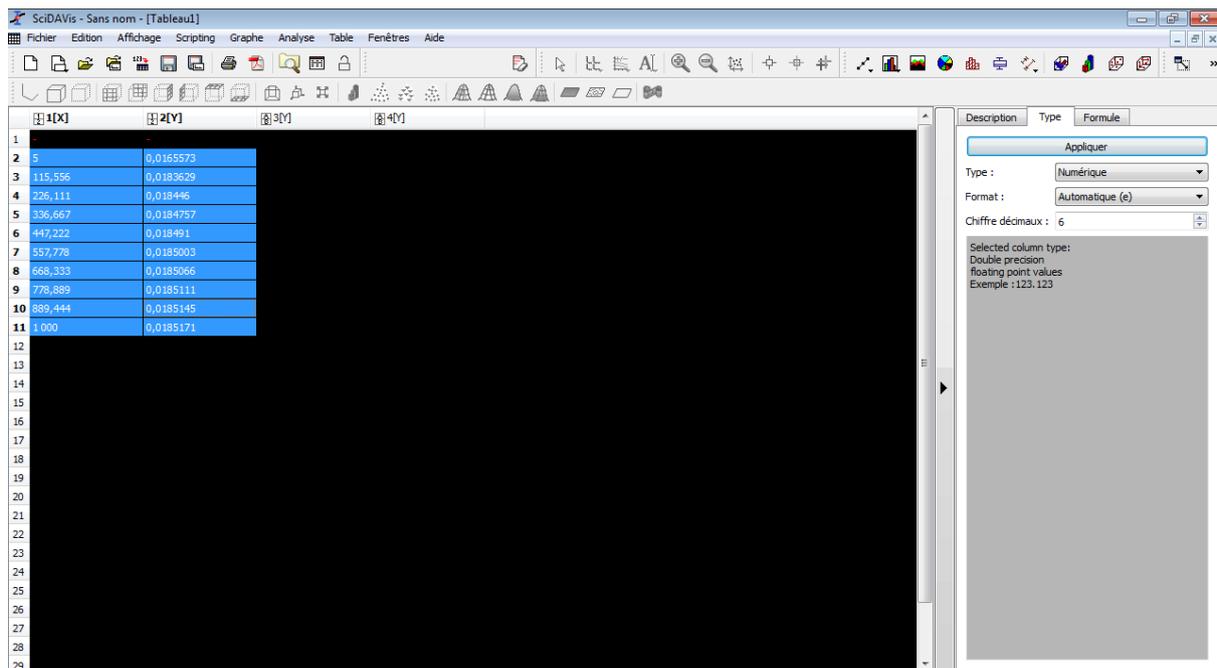


Figure 21 : Fenêtre du logiciel SciDAVis

C'est un logiciel qui nous a permis de tracer les courbes durant notre modélisation nommé SciDAVis.