

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'électronique

# Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : MICROELECTRONIQUE

Par

- AYADI Abderahim
- TOUHAMI Mabrouk

Intitulé

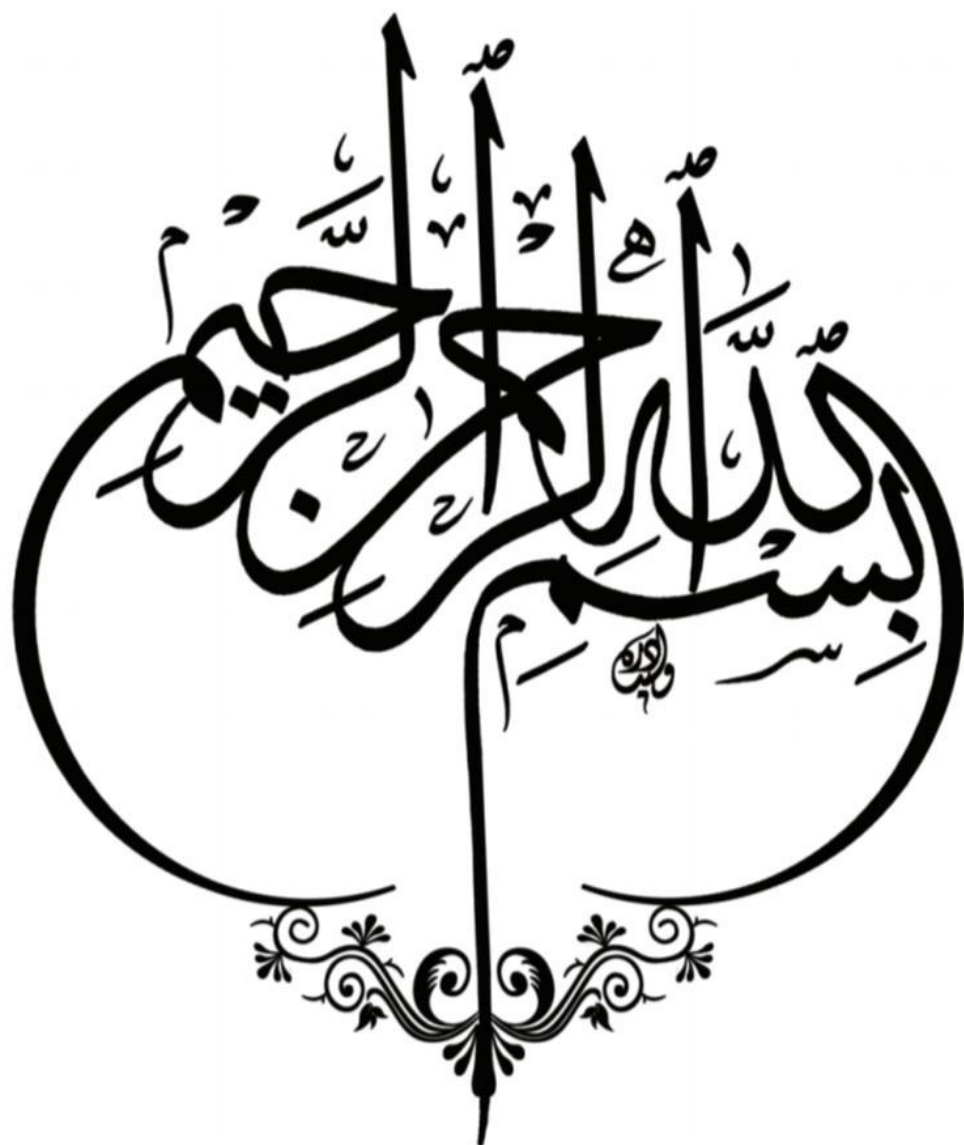
*L'oxyde de zinc ZnO comme couche active n et revêtement antireflet pour les cellules solaires à hétérojonction à base de silicium*

Soutenu le : 22 /06 /2022

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M. Z. MESSAI	MCA	Président	Univ-BBA
Mme. F.KHALED	MCB	Encadreur	Univ-BBA
Mme. F.KHERRAT	MAA	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2021/2022



# Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail  
à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais  
jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, la précieuse offre de dieu, à qui je dois ma vie, ma réussite  
et tout mon respect : mon cher père AHCEN.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit  
non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre  
heureux: mon adorable mère REZKIA.

A mes chères sœurs , et mes frères qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes  
études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A tous mes amis, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à  
maintenant.

Merci pour leur amour et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme TOUHAMI MABROUK pour son soutien moral, sa patience  
et sa compréhension tout au long de ce projet.

Ayadi Abderahim.

# Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail  
à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais  
jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mon cher père Said.

A mon adorable mère Nora.

A ma belle femme Farah.

A mon petit boss Loukemene.

A mes chères sœurs Ikram et Douaa, et mon frère Ouail

. Que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

A tous mes amis, les collègues de travail, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à  
maintenant.

Merci pour leur amour et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme AYADI ABDERAHIM pour son soutien moral, sa patience  
et sa compréhension tout au long de ce projet.

A tous ceux qui me sont Chers.

Touhami Mabrouk.

# Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à ALLAH tout puissant pour la volonté, la sante et la patience, qu'il nous a donnés durant toutes ces longues années d'étude.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué à **L'Université Mohamed EL-Bachir EL-Ibrahim Bordj Bou Arreridj**.

Nous tenons remercier notre encadreuse **Mme. F. KHALED**, enseignante chercheuse au sein de notre département, pour sa patience, sa confiance, son aide précieuse, ses remarques, ses conseils, sa disponibilité, sa bienveillance et son suivi permanent durant toute la période du projet surtout dans les circonstances que nous traversons. Un mot de remerciement ne suffit pas, qu'elle trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude, que Dieu la bénisse pour son aide et son soutien durant la simulation de notre projet fin d'étude.

Nous remercions également les membres du jury **M. Z. MESSAI** en qualité de président et **Mme. F. KHERRAT** en tant qu'examinatrice qui ont sacrifié leur temps pour juger ce modeste travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude et tout notre respect. Merci pour la considération accordée. Nous n'oublions surtout pas de remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, en particulier les enseignants de notre département d'électronique de **l'université Mohamed El Bachir EL IBRAHIMI de Bordj Bou Arreridj**. C'est avec un grand plaisir que nous réservons ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance aux nombreuses personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, Merci BEAUCOUP ET QUE ALLAH VOUS PROTEGE.

Nos vifs remerciements vont à tous nos amis de la promo 2022 qui ont partagé avec nous de bons moments durant le cycle de nos études.

## Sommaire

Listes des figures

Listes des tableaux

Listes d'abréviation et symboles

### Introduction générale

Introduction générale ..... 1

### Chapitre I: Cellules solaires au silicium

I.1. Introduction ..... 2

I.2. Cellules solaires au silicium cristallin ..... 2

I.3. Cellules solaires en hétérojonctions ..... 8

I.4. Les oxydes transparents conducteurs ..... 10

I.4.1. Propriétés générales des OTC ..... 11

I.5. L'oxyde de Zinc ZnO ..... 12

I.5.1. Propriétés cristallographiques ..... 13

I.5.2. Propriétés optiques ..... 14

I.5.3. Propriétés électriques ..... 16

I.6. Conclusion ..... 21

### Chapitre II: Simulation et résultats

II.1. Introduction ..... 22

II.2. Logiciel ATLAS de silvaco ..... 22

II.3. Structure et paramètres de la cellule ..... 24

II.4. Simulation de la structure n-ZnO /p-Si sans BSF ..... 26

II.5. Simulation de la cellule avec BSF ..... 28

II.6. Influence de l'épaisseur de l'émetteur ..... 31

II.7. Influence de l'épaisseur du BSF ..... 32

II.8. Influence de dopage du l'émetteur ..... 33

II.9. Influence du dopage du BSF ..... 36

II.10. Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires ..... 38

II.11. Rendement de la cellule en fonction de la vitesse de recombinaison ..... 39

II.12. Conclusion ..... 42

### Conclusion générale

Conclusion générale ..... 43

### Bibliographie

# Liste des figures

<b>FIGURE I-1</b> : DEFINITION DE L'AIR MASSE, SPECTRE D'EMISSION SOLAIRE SOUS AM0 ET AM1,5	3
<b>FIGURE I-2</b> : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	4
<b>FIGURE I-3</b> : (A) CARACTERISTIQUE I(V) D'UNE CELLULE	5
<b>FIGURE I-4</b> : SCHEMA EQUIVALENT DU MODELE A UNE DIODE	8
<b>FIGURE I-5</b> : CLASSIFICATION DES OXYDES TRANSPARENTS CONDUCTEUR	11
<b>FIGURE I-6</b> : (A)STRUCTURE ROCKSALT	14
<b>FIGURE I-7</b> : FACTEURS TRANSMISSION, ABSORPTION ET REFLEXION D'UN OXYDE TRANSPARENT CONDUCTEUR	15
<b>FIGURE I-8</b> : TRANSMISSION D'UN FILM ZNO RECUIT POUR DIFFERENTES TEMPERATURES	16
<b>FIGURE I-9</b> : PRESENTATION DU GAP DE ZNO	17
<b>FIGURE I-10</b> : RAYONNEMENTS INCIDENTS ET REFLECHIS ET TRANSMIS ENTRE TROIS MILIEUX D'INDICES DE REFRACTIONS DIFFERENTS	19
<b>FIGURE II-1</b> : INTERFACE L'OUTIL DECKBUILD	23
<b>FIGURE II-2</b> : STRUCTURE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	25
<b>FIGURE II-3</b> : CARACTERISTIQUE J(V) D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ZNO/SI	27
<b>FIGURE II-4</b> : EFFICACITE QUANTIQUE EXTERNE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ZNO/SI	27
<b>FIGURE II-5</b> : CARACTERISTIQUE J(V) DES CELLULES AVEC ET SANS BSF	29
<b>FIGURE II-6</b> : DIAGRAMME DE BANDES D'ENERGIE DE LA CELLULE AVEC COUCHE (P+)	30
<b>FIGURE II-7</b> : BANDES D'ENERGIE D'UNE CELLULE SANS COUCHE (P+)	30
<b>FIGURE II-8</b> : EFFICACITE QUANTIQUE EXTERNE DES CELLULES AVEC ET SANS BSF	31
<b>FIGURE II-9</b> : PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES DE LA CELLULE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE L'EMETTEUR	32
<b>FIGURE II-10</b> : PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES DE LA CELLULE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE COUCHE (P+)	33
<b>FIGURE II-11</b> : PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES DE LA CELLULE EN FONCTION DOPAGE DE L'EMETTEUR	34
<b>FIGURE II-12</b> : CARACTERISTIQUE P(V) EN FONCTION DOPAGE DE L'EMETTEUR	35
<b>FIGURE II-13</b> : CARACTERISTIQUE J(V) EN FONCTION DOPAGE DE L'EMETTEUR	35
<b>FIGURE II-14</b> : PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES EN FONCTION DOPAGE DE LA COUCHE (P+)	36
<b>FIGURE II-15</b> : CARACTERISTIQUE P(V) EN FONCTION DOPAGE DE COUCHE (P+)	37
<b>FIGURE II-16</b> : CARACTERISTIQUE J(V) EN FONCTION DOPAGE DE COUCHE (P+)	37
<b>FIGURE II-17</b> : PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES EN FONCTION DE LA DUREE DE VIE DES MINORITAIRES	38
<b>FIGURE II-18</b> : EFFICACITE QUANTIQUE EN FONCTION DE LA DUREE DE VIE DES MINORITAIRES	39
<b>FIGURE II-19</b> : PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES EN FONCTION VITESSE DE RECOMBINAISON	40
<b>FIGURE II-20</b> : CARACTERISTIQUE J(V) EN FONCTION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON	41
<b>FIGURE II-21</b> : EFFICACITE QUANTIQUE EN FONCTION DE LA VITESSE DE RECOMBINAISON	41

# Liste des tableaux

<b>TABLEAU I-1 : FACTEUR DE MERITE .....</b>	<b>18</b>
<b>TABLEAU II-1 : PARAMETRES DES COUCHES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ZNO/SI .....</b>	<b>25</b>
<b>TABLEAU II-2 : PERFORMANCES PHOTOVOLTAÏQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ZNO/SI .....</b>	<b>26</b>
<b>TABLEAU II-3 : PERFORMANCES PHOTOVOLTAÏQUES DE LA CELLULE AVEC COUCHE (P+) .....</b>	<b>28</b>



# Listes d'abréviations et symboles

## Abréviations

<b>Co</b> :	monoxyde de carbone
<b>CIGS</b> :	Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium
<b>GaAs</b> :	Arséniure de Gallium
<b>ZnO</b> :	oxyde de zinc
<b>Si</b> :	silicium
<b>OTC</b> :	oxyde transparent conducteur
<b>MBE</b> :	Microscope Electronique à Balayage
<b>MOCVD</b> :	Métal Organic Chemical Vapor Deposition
<b>BC</b> :	bande de conduction
<b>BV</b> :	bande de valence
<b>UV</b> :	ultra-violet
<b>CNTP</b> :	conditions normales de température et de pression
<b>Al</b> :	aluminium
<b>BSF</b> :	back surface filed
<b>TCAD</b> :	Technology Computer Aided Design
<b>SILVACO</b> :	Silicon Valley Corporation

## Symboles

<b>E<sub>g</sub></b> :	Largeur de la bande interdite (eV).
<b>I</b> :	Le courant (A).
<b>J<sub>cc</sub></b> :	La densité du courant de court-circuit (mA/cm <sup>2</sup> ).
<b>I<sub>m</sub></b> :	Le courant maximal (A).
<b>V</b> :	La tension (V).
<b>V<sub>co</sub></b> :	La tension de circuit ouvert (V).
<b>V<sub>m</sub></b> :	La tension maximale (V).
<b>P</b> :	La puissance (W).
<b>P<sub>m</sub></b> :	La puissance maximale (W).
<b>T</b> :	La température (K).
<b>λ</b>	La longueur d'onde de la lumière (μm).
<b>EQE</b>	Le rendement quantique externe (%).
<b>FF</b>	Le facteur de forme (%).
<b>η</b>	Le rendement de conversion (%).
<b>R</b>	Le coefficient de réflexion (%).

$\alpha$	Le coefficient d'absorption ( $\text{cm}^{-1}$ ).
$\chi_e$	Affinité électronique (eV).
<b>TAUN</b>	Durée de vie des électrons (s).
<b>TAUP</b>	Durée de vie des trous (s).
$\Phi$	Flux lumineux incident.
<b>T</b>	Coefficient de Transmission.
<b>N</b>	l'indice optique complexe.
<b>K</b>	coefficient d'extinction.

# Introduction générale

### Introduction générale

De nos jours, le monde souffre énormément des besoins énergétiques à cause du développement technologique dans divers domaines (industriel, urbain, véhicule, etc.). L'utilisation des sources traditionnelles limitées et non renouvelables comme le pétrole, le gaz, le nucléaire est devenu un sujet mondial dû à ses effets négatifs sur l'environnement (pollution, changement climatique, etc).

Les chercheurs et les organisations concernées sont en train de recourir aux sources renouvelables, non polluantes et propre permettant de sauver l'environnement. Parmi ces énergies, on compte : l'énergie éolienne, thermique, hydraulique, marémotrice et l'énergie photovoltaïque. Cette dernière permettra de produire de l'électricité par transformation directe du flux lumineux incident en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Les cellules les plus connues et commercialisées à l'heure actuelle sont à base de silicium (mono et polycristallin) avec un rendement record supérieur à 25%.

Dans ce travail, un modèle de cellule solaire à base de silicium cristallin est proposé pour être étudiée à travers une simulation numérique à l'aide du logiciel Atlas de Silvaco. La structure est de la forme  $n\text{-ZnO:Al/p-Si/p}^+\text{-Si/Al}$  où la couche de silicium active  $n$  des cellules classiques est remplacée par une couche d'oxyde transparent conducteur ZnO dont la présence a évité l'utilisation de la couche antireflet en surface avant qui était indispensable dans les cellules homojonctions. Ceci est évidemment dû aux propriétés de transparence et de conduction de ce type de matériaux.

Pour ce faire, on a subdivisé notre mémoire en deux parties : une partie théorique dans laquelle on présente des notions de base sur les cellules solaires au silicium ainsi qu'une étude générale sur les oxydes transparents conducteurs et une deuxième partie où l'on expose les principaux résultats obtenus à partir de la simulation numérique et qui permettent de démontrer l'efficacité de ce type de structure de cellules photovoltaïque.

# Chapitre I

## Cellules solaires au silicium

## I.1. Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous présentons premièrement les cellules solaires au silicium cristallin, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques et paramètres électriques (courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, rendement, etc.). Une description générale des oxydes transparents conducteurs OTC et leurs propriétés fera également l'objet de ce chapitre tout en mettant l'accent sur l'oxyde de zinc ZnO.

## I.2. Cellules solaires au silicium cristallin

### Spectre solaire

La densité d'énergie qui atteint la frontière externe de l'atmosphère est définie par la constante solaire et de valeur communément prise égale à  $1360\text{W/m}^2$  (1). Cependant à la traversée de l'atmosphère, le spectre solaire subit une atténuation et une déformation ainsi que l'influence d'autres molécules présentes dans l'atmosphère ( $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ...). A son arrivée à la surface de la terre, il dépend de la couche d'air qu'il a traversée et donc de l'angle d'incidence. Si on fait face au soleil, on le voit à une certaine hauteur qu'on appelle « hauteur apparente » définie par l'angle  $h$  que fait le plan horizontal avec une droite pointée vers le soleil. Cette grandeur  $h$  permet de déterminer la distance parcourue par les rayons du soleil à travers l'atmosphère. On introduit alors un nombre  $m$ , qu'on appelle Air Masse (AM) et qui représente cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu ( $m=1/\sin(h)$ ).

AM0 : Hors atmosphère (applications spatiales)

AM1 : Soleil au zénith du point d'observation.

AM1.5 : Soleil à  $45^\circ$  [2].

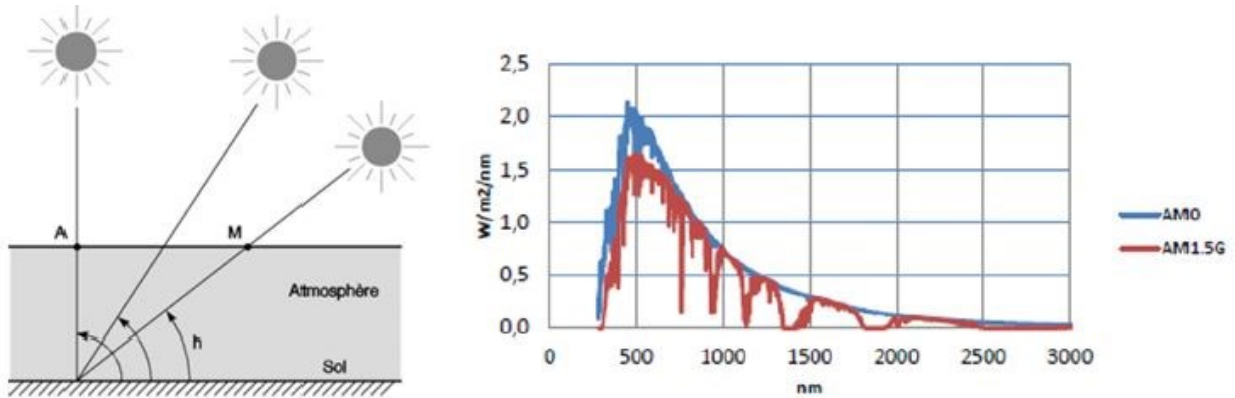


Figure I-1 : Air Masse, spectre d'émission solaire sous AM0 et AM1,5

Une cellule photovoltaïque est un moyen de convertir le flux lumineux en énergie électrique, elle fabriquée de base en matériaux semi-conducteur qui possédé un gap suffisamment faible pour absorber le max du flux lumineux, qui se situe entre 1ev et 5ev. le silicium est la première source de l'industrie de fabrication des cellules photovoltaïque car il est non-toxique, plus disponible sur la terre et bien maitrisée de nos jours.

Les premiers prototypes de cellules solaires développés en laboratoire utilisaient du silicium monocristallin, c'est-à-dire du cristal de silicium pur. En laboratoire, une simple jonction p-n de silicium monocristallin suffit pour atteindre des efficacités de plus de 20%. Depuis, beaucoup de types de silicium différents, moins coûteux à la fabrication, ont été étudiés afin d'aborder le point crucial des coûts de production. Ainsi, on produit actuellement beaucoup de panneaux solaires en silicium polycristallin [3].

Le principe de base d'une cellule solaire faite avec un matériau semi-conducteur comme le silicium amorphe ou microcristallin consiste en une jonction p-i-n, c'est à dire : une zone de silicium dopée "p" - une zone de silicium non dopée (intrinsèque) - une zone de silicium dopée "n"

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap du silicium atteint la zone intrinsèque, il est absorbé pour créer une paire "électron-trou". Un courant électrique est alors généré par la séparation de cette paire "électron-trou", en direction des deux bornes opposées de la cellule. Cette séparation se fait sous l'action du champ électrique présent dans la zone de silicium intrinsèque.

Le trou et l'électron créés dans la couche  $i$  doivent traverser les couches de silicium dopées (p et n) avant d'atteindre les bornes de la cellule solaire. Malheureusement, ces couches dopées de silicium amorphe ou microcristallin possèdent énormément de "défauts" divers qui provoquent la recombinaison des électrons et trous dans ces couches avant que ceux-ci aient pu atteindre les bornes de la cellule. C'est pourquoi on donne à ces couches dopées le moins d'épaisseur possible.

Deux couches conductrices de courant placées aux bornes de la cellule vont récupérer l'électron et le trou qui n'auront alors plus beaucoup de risques de se recombinaison [3]. Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré sur la figure I-2.

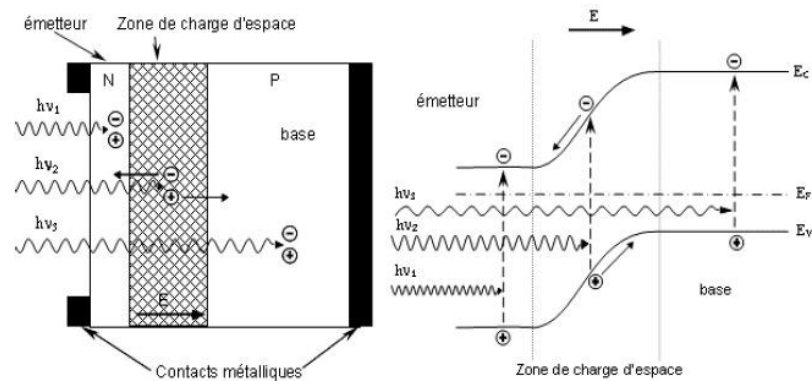


Figure I-2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### Caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque

Les caractéristiques principales d'une cellule photovoltaïque sont les deux mesures de la courbe courant-tension  $I(V)$ , et de la courbe de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde.

La caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire est la superposition de la caractéristique  $I-V$  de la cellule sous obscurité avec le courant photogénéré. La mesure de cette caractéristique permet de déterminer les différents paramètres électriques, à savoir le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la puissance maximale  $P_m$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$ .



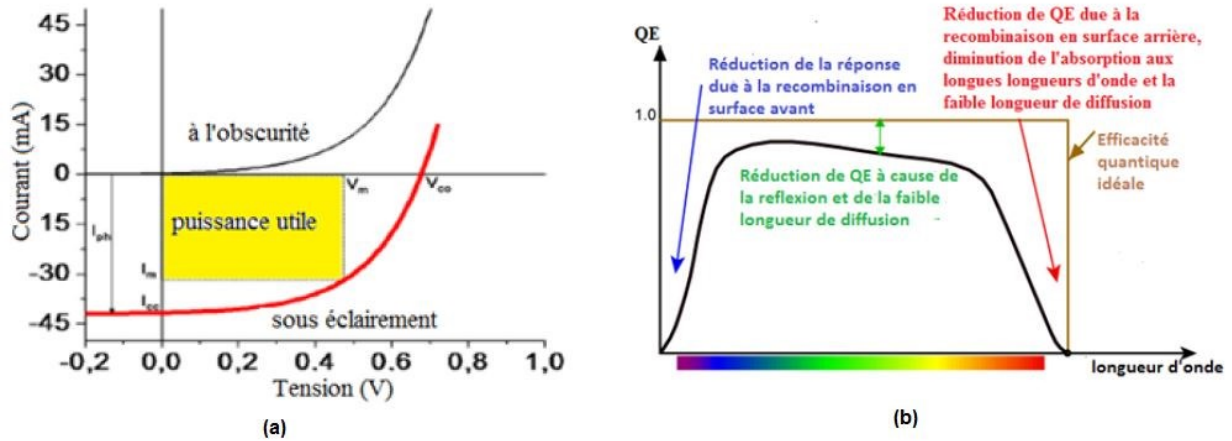


Figure I-3 : (a) Caractéristique I(V) d'une cellule

(b) Efficacité quantique d'une cellule

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

ICC : courant de court-circuit (obtenu pour V=0) ;

VCO : tension en circuit ouvert (obtenu pour I=0) ;

Im : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

Vm : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

$\eta$  : rendement de conversion ;

FF : facteur de forme.

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

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (I.1)$$

### Le courant de court-circuit I<sub>cc</sub> :

C'est le courant qui correspond à une tension nulle ou la cellule est court-circuitée. Ce courant est dû à la génération et la collecte des porteurs photogénérés.

### Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert  $V_{co}$  est la tension maximale dans une cellule solaire, elle correspond à un courant nul.  $V_{co}$  peut être calculée en mettant le courant à zéro dans l'équation de la cellule, on obtient alors l'équation suivante :

$$V_{co} = n \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.2)$$

### La puissance maximale :

La puissance fournie par la cellule est donnée par le produit :

$$P = VI = I_{ph} - I_s(e^{-ev/kT} - 1) \quad (I.3)$$

Avec

$$P_m = V_m I_m \quad (I.4)$$

Où la tension  $V_m$  et le courant  $I_m$  sont donnés par :

$$\left( 1 + \frac{qV_m}{KT} \right) e^{\frac{qV_m}{KT}} \approx 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (I.5)$$

$$I_m = I_s \frac{qV_m}{KT} e^{\frac{qV_m}{KT}} \quad (I.6)$$

### Facteur de forme :

Le facteur de forme ou facteur de remplissage FF permet de mesurer le caractère rectangulaire de la courbe  $I(V)$ . Il peut être exprimé par le rapport entre la puissance maximale de la cellule et le produit de  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ .

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.7)$$

### Rendement de conversion :

Le rendement  $\eta$  est le paramètre le plus utilisé pour l'étude des performances des cellules solaires. Il exprime le rapport de la puissance maximale disponible à la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} \quad (I.8)$$

Avec

$$P_m = FF.V_{co}.I_{cc} \quad (I.9)$$

$$P_{inc} = I_e.S \quad (I.10)$$

S et la surface de cellule

### **Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque**

La figure (I.4) propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque basé sur le modèle à une diode. Lorsqu'une jonction pn réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est exposée à un flux lumineux, elle fonctionne en générateur d'énergie. Ce modèle correspond à un générateur de courant imparfait qui présente une résistance shunt  $R_{sh}$  modélisant les courants de fuites de la jonction et une résistance série  $R_s$  qui caractérise les diverses résistances de contacts et de connexions.

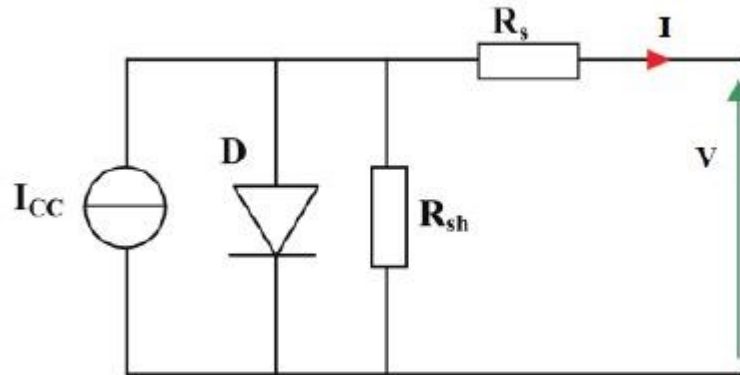


Figure I-4: Schéma équivalent du modèle à une diode

Ce modèle se met sous la forme mathématique de l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I.11)$$

La présence des résistances série et shunt réduit le rendement de la cellule solaire par dissipation de puissance. L'effet principal de ces résistances parasites est la réduction du facteur de forme. Leur valeur dépend de la géométrie de la cellule solaire à son point de fonctionnement [4].

### I.3. Cellules solaires en hétérojonctions

Les hétéro-structures ou hétérojonctions de semi-conducteurs sont des structures composées de deux ou plusieurs matériaux semi-conducteurs de nature différentes :

- Semi-conducteurs composés.
- Alliages de Semi-conducteurs.

Dans une hétéro-structure, la composition du cristal varie avec la Position mais la périodicité des atomes reste inchangée.

Les hétéro-structures sont normalement réalisées en utilisant les techniques d'épitanie MOCVD (Métal Organic Chemical Vapor Deposition) ou MBE (Molecular Beam Epitaxy) [5]. Les TCO dans les cellules solaires sont employés comme électrodes transparentes. Ils doivent nécessairement avoir une haute transmission optique afin de permettre un transport efficace des photons jusqu'à la couche active et également une bonne conductivité électrique qui est requise pour obtenir le moins de pertes de transport des charges photogénérées.

Dans les cellules photovoltaïques en hétérojonction, le métal est généralement représenté par un oxyde transparent conducteur TCO (Transparent Conductive Oxide). Dans notre cas, nous utiliserons le ZnO comme émetteur avec un gap égal à 3.27 (eV).

Les modèles qui traitent les hétérojonctions sont : [6]

- Le modèle d'Anderson, dans ce cas on ne tient pas compte des états d'interfaces.
- Des modèles tenant compte des états d'interfaces et des pertes qui influent sur le profil des bandes engendrant les recombinaisons.
- Des modèles qui prennent en considération les états d'interfaces et le transport de charge par effet tunnel.

### **Modèle d'Anderson**

Le modèle d'Anderson a été développé en 1960. Il est considéré comme le modèle de base dans l'étude des hétérojonctions. Ce modèle prend en compte les propriétés électroniques des matériaux qui constituent l'hétérojonction à savoir : l'affinité électronique  $\chi$ , les largeurs des bandes interdites des matériaux ( $E_g$ ), les dopages dans les matériaux [6].

Les cellules solaires à hétérojonction présentent l'intérêt d'avoir un rapport entre le rendement physique et le rendement économique meilleur que celui des cellules solaires conventionnelles à homojonction PN. Ceci, par le fait que lors de la fabrication de ce type de cellules, l'étape de la diffusion de dopants dans le silicium pour réaliser la jonction est éliminée. Aussi, elles peuvent être réalisées par des techniques de fabrication faciles à mettre en œuvre.

### **Avantages des cellules solaires à hétérojonction :**

- Faible coût de fabrication.

- Basse température de fabrication.
- Adaptation à l'utilisation des couches minces.

### I.4. Les oxydes transparents conducteurs

Selon la théorie des bandes d'énergie, les trois états électriques possibles sont : métal, isolant et semi-conducteur. Dans le métal, la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV) se recouvrent permettant la libre circulation des électrons. Par contre, l'existence de la bande interdite (gap) qui sépare la bande de valence et la bande de conduction dans le semi-conducteur interdit le passage des électrons vers la bande de conduction. Pour un gap supérieur à 4 eV, on parle d'isolant car même à température ambiante, la bande de conduction est vide [7].

Cependant, tous les métaux standards sont très conducteurs et possèdent une réflectivité élevée dans le visible, par conséquent, ils ne sont pas transparents dans cette région spectrale. D'un autre côté, tous les matériaux standards de haute transparence dans le visible (verre) ne sont pas de bons conducteurs. Il existe cependant une famille d'oxydes qui, en plus d'être transparents, peuvent devenir conducteurs s'ils possèdent un excès d'électrons dans leur réseau. Cet excès d'électrons peut être créé soit par des défauts de structure induisant un déséquilibre dans la stœchiométrie de l'oxyde, soit par un dopage approprié. Ces oxydes sont appelés oxydes transparents conducteurs « OTC ».

Un OTC est un semi-conducteur dégénéré, c'est à dire que son niveau de Fermi se situe tout proche de la bande de conduction (BC), voire même à l'intérieur de celle-ci pour un OTC fortement dopé, ce qui signifie que la bande de conduction est déjà bien remplie d'électrons à température ambiante le rendant ainsi conducteur. De plus, l'OTC possède un gap élevé, ce qui empêche l'absorption des photons ayant une énergie inférieure à ce gap le rendant transparent à la lumière visible.

Les OTC sont donc des semiconducteurs transparents et conducteurs à la fois. Ces matériaux de structure polycristalline ou amorphe sont souvent élaborés sous forme de couches minces sur un substrat de verre ou un polymère [7].

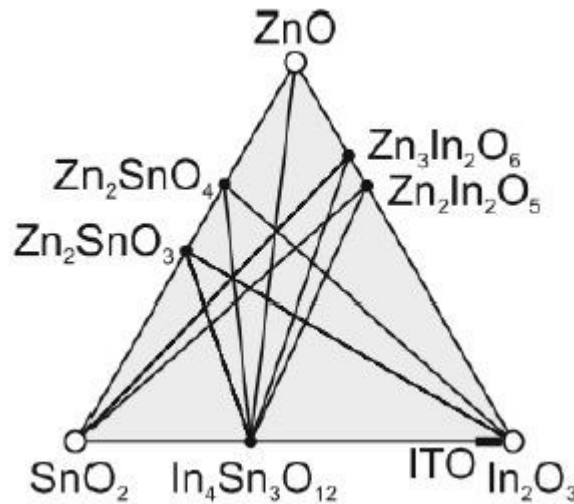


Figure I-5 : Classification des oxydes transparents conducteur

#### I.4.1. Propriétés générales des OTC

Les TCO sont des matériaux très utilisés, car beaucoup d'applications recherchent cette combinaison de la transparence optique avec la conductivité électrique. Quelques-unes de ces applications sont listées ci-dessous :

- Ecrans plats.
- Fenêtres anti-gel.
- Fenêtres réfléchissant la chaleur (bâtiments, fours, ...).
- Miroirs et fenêtres électrochromiques.
- Ecrans de contrôle tactile.
- Protection électro-magnétique.
- Dissipation des charges électro-statiques.
- Cellules solaires : comme contact avant à travers lequel la lumière doit passer afin d'entrer dans la cellule solaire.

Tout semiconducteur à large gap ( $EG > 3$  eV) et conducteur à cause de défauts intrinsèques ou par dopage d'impuretés est considéré comme un OTC [8].

### I.5. L'oxyde de Zinc ZnO

L'oxyde de zinc (ZnO) est un semiconducteur de type II-VI, qui possède des propriétés remarquables. C'est un matériau très prometteur, dans le développement des nouveaux matériaux pour l'énergie renouvelable et pour l'environnement. En effet, le ZnO est non toxique, biocompatible, et permet de réduire les coûts de production.

#### Application de l'oxyde de zinc ZnO

En raison de ses propriétés fondamentales attractives qui tiennent en sa très grande énergie de liaison excitonique ainsi que des progrès techniques pour son élaboration, le ZnO, est devenu un très important oxyde semiconducteur. Sa structure et sa largeur de bande interdite lui confèrent une large utilisation dans différentes applications telles que :

#### Dispositifs optoélectroniques

Le ZnO est un matériau prometteur pour une émission UV efficace à température ambiante. Sa largeur de bande interdite ainsi que son énergie de liaison excitonique lui permettent de fournir des émetteurs de haute luminosité avec les meilleures performances aux températures élevées par rapport aux autres OTC [9].

#### Les capteurs de gaz

Le ZnO possède des propriétés électriques qui changent en présence de certains gaz tels que le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ), l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ), le sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ), l'éthanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) etc d'où son utilisation dans les capteurs de gaz.

#### Les revêtements

Sa caractéristique de réflectivité dans le proche infrarouge et loin de l'infrarouge est exploitée pour la réalisation de dispositifs à base de couches réfléchissantes. Ces dernières laissent passer la lumière visible tout en réfléchissant les infrarouges [10].



## Cellules solaires

Les films de ZnO sont employés comme électrode transparente. Ils permettent en premier lieu le transport des photons vers l'absorbeur grâce à leur haute transmission optique dans le visible, et en second lieu, le transport des charges photogénérées avec un minimum de pertes grâce à leur conductivité électrique. Le ZnO peut être présent dans les différents types de cellules solaires, depuis la cellule au silicium monocristallin jusqu'aux nouvelles générations telles que les cellules organiques.

### I.5.1. Propriétés cristallographiques

L'oxyde de Zinc cristallise sous les formes suivantes :

- La structure wurtzite (B4)
- La structure Zinc blende (B3)
- La structure rocksalt (B1) (NaCl)

Aux conditions normales de température et de pression (CNTP), le ZnO cristallise selon la structure hexagonale wurtzite. Les paramètres de maille de cette structure sont :

$a = 3,25 \text{ \AA}$  et  $c = 5,2066 \text{ \AA}$ , ce qui donne un rapport  $c/a$  de l'ordre de 1,60 qui est proche de la valeur idéale  $c/a = 1,633$  pour les cellules hexagonales [8]. Ce matériau a la propriété d'être polaire suivant l'axe  $c$ . Par convention, la direction  $+c$  est définie par la face de l'atome de Zn,

alors que la face O est notée par  $-c$ . Le ZnO possède ainsi une polarisation spontanée non nulle selon l'axe  $c$ , appelée polarisation spontanée, de valeur de  $-0,05 \text{ C/m}^2$ . [11]

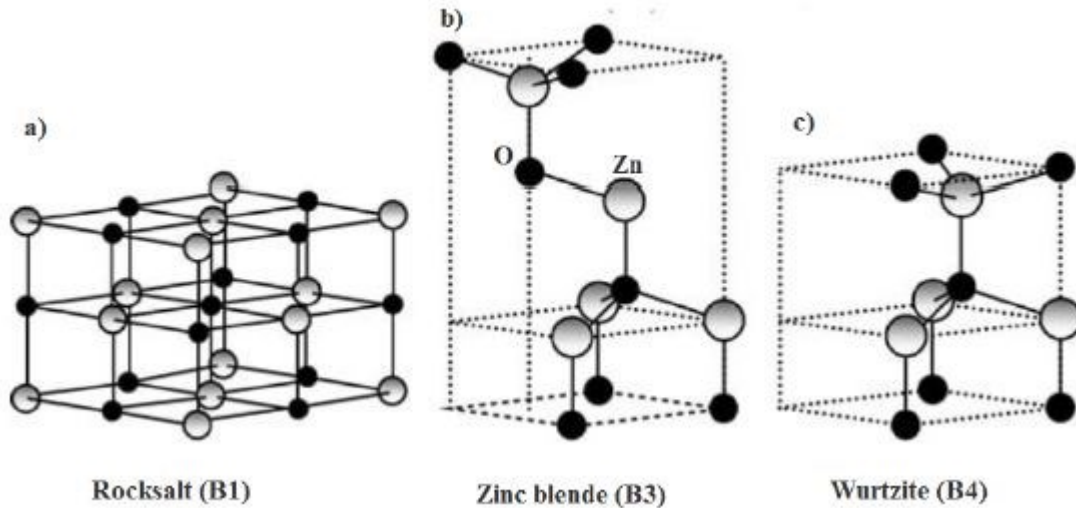


Figure I-6 : (a)structure Rocksalt (b) Structure Zinc blende (c) Structure Wurtzite

### I.5.2. Propriétés optiques

Les propriétés optiques des matériaux sont basées essentiellement sur trois phénomènes : la transmission caractérisée par le paramètre  $T$  (Transmittance ou facteur de transmission), la réflexion caractérisée par le paramètre  $R$  (Réflectance ou facteur de réflexion) et l'absorption caractérisés par les paramètres  $A$  (absorbance ou facteur d'absorption) et  $\alpha$  (coefficient d'absorption).

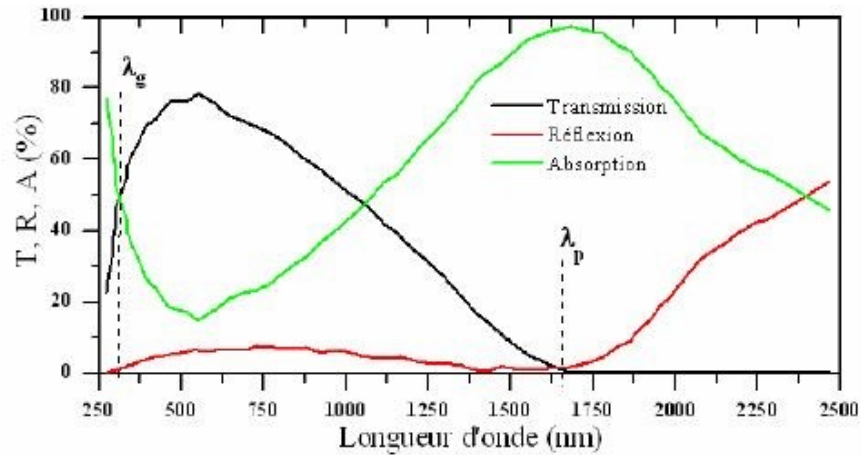


Figure I-7 : Transmission, absorption et réflexion d'un oxyde transparent conducteur

### Le facteur de transmission T :

Cette grandeur optique est définie comme étant le rapport entre l'intensité de la lumière transmise ( $\Phi_T$ ) à travers un matériau par rapport à l'intensité de la lumière incidente à sa surface ( $\Phi_0$ ).

$$T = \frac{\Phi_T}{\Phi_0} \quad (\text{I.12})$$

### Le facteur de réflexion R :

La réflectance d'un matériau est l'intensité de la lumière qui est réfléchi au niveau de sa surface ( $\Phi_R$ ) par rapport à l'intensité lumineuse incidente ( $\Phi_0$ ).

$$R = \frac{\Phi_R}{\Phi_0} \quad (\text{I.13})$$

### Le facteur d'absorption A :

$$A = \frac{\Phi_A}{\Phi_0} \quad (\text{I.14})$$

### Le coefficient d'absorption $\alpha$ :

La loi de Beer-Lambert permet de relier le flux transmis à la distance  $d$  au coefficient d'absorption  $R$

$$T = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (\text{I.15})$$

$\alpha$  étant le coefficient d'absorption du film, il est lié au coefficient d'extinction  $k$  par la relation

$$K = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (\text{I.16})$$

L'oxyde de zinc ZnO a un indice de réfraction varie entre 1,9 et 2. Il présente une absorption aux environs de 360 nm, longueur d'onde dans l'ultraviolet, ce qui explique la valeur du gap des films minces de ce matériau. Le ZnO présente aussi la propriété de luminescence. Sous l'effet d'un faisceau lumineux d'énergie supérieure au gap du ZnO, l'oxyde de zinc émet des photons, il est transparent dans le spectre visible et proche infrarouge comme l'indique la figure si dessous :

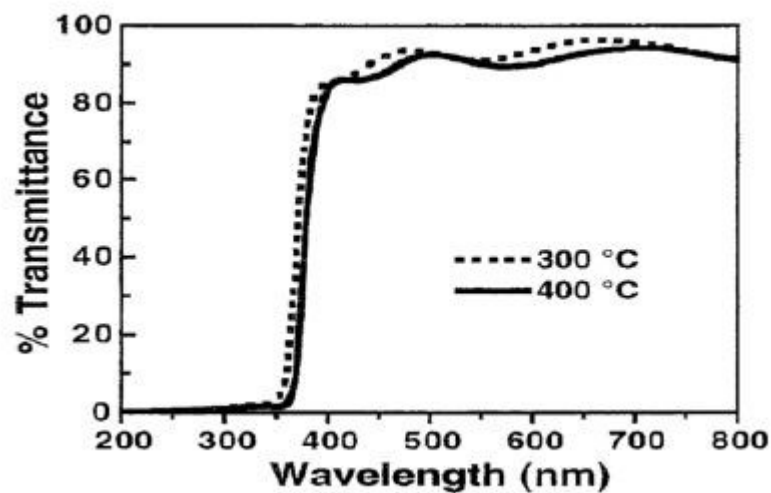


Figure I-8 : Transmission d'un film ZnO recuit pour différentes températures

### I.5.3 Propriétés électriques

L'oxyde de zinc présente un gap direct ; ceci est dû au fait que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent sur le même point de l'espace des  $k$  ( $k$  étant le vecteur d'onde dans la zone de Brillouin).

La conduction électrique de l'oxyde de zinc est due à la présence des atomes de zinc dans des sites interstitiels ainsi qu'aux lacunes d'oxygène. Par ailleurs, le ZnO stœchiométrique est un isolant. Le dopage permet d'améliorer la conductivité électrique de ce matériau. L'oxyde de zinc est un TCO qui peut avoir un dopage type p ou type n. Les éléments chimiques qui permettent un dopage type n du ZnO sont l'aluminium, le gallium et l'indium.

Les éléments chimiques qui permettent un dopage type p du ZnO il y a l'azote, et le co-dopage azote aluminium.

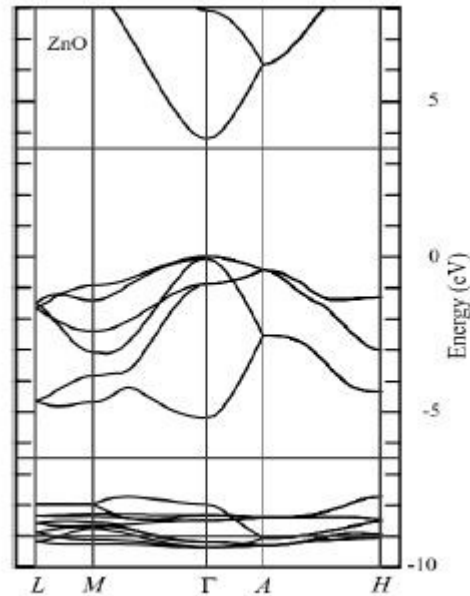


Figure I-9 : Présentation du gap de ZnO

Pour les oxydes transparents conducteur TCO, il existe un facteur de corrélation entre les propriétés optiques et électriques. G. Haacke a suggéré en 1976, un facteur de mérite et définit ce facteur comme étant le rapport entre la transmission moyenne  $T$  dans le domaine du visible (200 à 800 nm) et la résistance carrée  $R/\square$  du film TCO :

$$\Phi = \frac{T^{10}}{R/\square} \quad (\text{I.17})$$

G.R Gordon a comparé les TCO selon le facteur de mérite de chaque matériau comme le représente le tableau ci dessous :

**Tableau I-1** : Facteur de mérite

Matériaux	Résistance carré ( $\Omega/\square$ )	Coefficient d'absorption ( $\text{cm}^{-1}$ )	Facteur de mérite ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>
ZnO_F	5	0.03	7
Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>	7.2	0.02	7
ZnO_Al	3.8	0.05	5
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Sn	6	0.04	4
SnO <sub>2</sub> _F	8	0.04	3
ZnO_Ga	3	0.12	3
ZnO_B	8	0.06	2
SnO <sub>2</sub> _Sb	20	0.12	0.4
ZnO_In	20	0.20	0.2

### Utilisation des TCO comme couches antireflet [6]

Le fonctionnement des couches antireflets, repose sur l'adaptation de l'indice de réfraction de la couche de façon à produire des interférences destructives à une certaine longueur d'onde en tenant compte de l'épaisseur de la couche. Le matériau utilisé comme couche antireflet doit être non absorbant dans la gamme du spectre solaire.

On considère une couche fine antireflet d'épaisseur  $d$  et d'indice de réfraction  $n_2$ . Cette dernière est située entre l'air d'indice de réfraction  $n_1$  et un substrat d'indice  $n_3 > n_2$ . L'onde lumineuse frappe la surface de la couche antireflet.

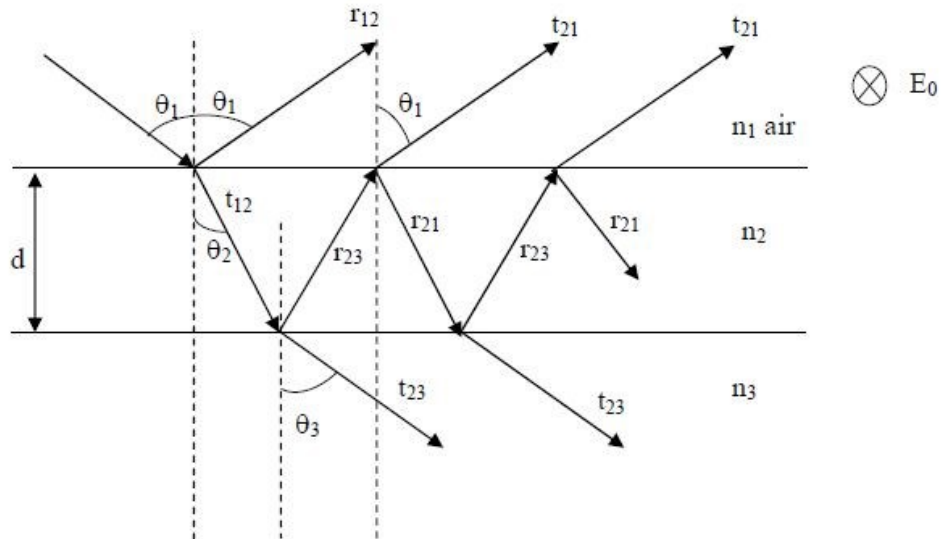


Figure I-10 : Rayonnements incidents et réfléchis et transmis entre trois milieux d'indices de réfractions différents

L'onde incidente est définie par l'amplitude maximale du champ électromagnétique  $E_0$  La différence de marche est égale à :

$$\delta = 2 \cdot d \cdot n_2 \quad (I.18)$$

Le déphasage entre les rayons réfléchis 1-2, 2-3 et transmis 1'-2', 2'-3' est :

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} d \cdot n_2 \cos \theta_2 \quad (I.19)$$

Soient  $r_{ij}$  et  $t_{ij}$  les coefficients de réflexion et de transmission du milieu  $i$  vers le milieu  $j$ .

Dans le cas où le champ électrique  $E_0$  a une incidence perpendiculaire au plan d'incidence, alors les coefficients de réflexion et de transmission entre les différents milieux s'exprimeront selon les équations (1-18 à 1-23) suivantes :

$$r_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (I.20)$$

$$r_{21} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (I.21)$$

$$r_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad (\text{I.22})$$

$$t_{12} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (\text{I.23})$$

$$t_{21} = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (\text{I.24})$$

$$t_{23} = \frac{2n_1 \cos \theta_2}{n_3 \cos \theta_3 + n_2 \cos \theta_2} \quad (\text{I.25})$$

### Le champ réfléchi :

Le champ électrique réfléchi s'exprime en fonction de  $E_0$ ,  $r_{12}$ ,  $t_{12}$ ,  $r_{23}$ ,  $t_{21}$  et le déphasage entre les rayons réfléchis  $\varphi$  :

$$E_r = \frac{E_0 [r_{12} + (t_{12} r_{23} t_{21}) e^{j\varphi}]}{(1 - r_{21} r_{23} e^{j\varphi})} \quad (\text{I.26})$$

### Le champ transmis :

Le champ électrique transmis jusqu'au milieu d'indice de réfraction  $n_3$  est illustré par la formule :

$$E_t = \frac{E_0 t_{12} t_{23}}{(1 - r_{21} r_{23} e^{j\varphi})} \quad (\text{I.27})$$

### Cas d'une incidence normale :

En incidence normale, les coefficients de réflexion et de transmission s'expriment comme suit :

$$r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (\text{I.28})$$

$$r_{21} = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} \quad (\text{I.29})$$



$$r_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \quad (\text{I.30})$$

$$t_{12} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (\text{I.31})$$

$$t_{21} = \frac{2n_2}{n_1 + n_2} \quad (\text{I.32})$$

$$t_{23} = \frac{2n_1}{n_3 + n_2} \quad (\text{I.33})$$

Pour annuler les réflexions, la condition d'interférences destructives c'est-à-dire,  $r_{ij} = -r_{ji}$  doit être assurée, c'est le principe des couches antireflets. Dans le cas où le déphase  $\varphi = \pm\pi$ , l'expression de l'épaisseur de la couche sera :

$$d = \frac{\lambda}{4n_2} \quad (\text{I.34})$$

Le champ réfléchi dans ce cas est nul ( $E_r = 0$ ), cela induit à écrire :

$$n_2 = \sqrt{n_1 \cdot n_3} \quad (\text{I.35})$$

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les cellules solaires au silicium cristallin avec leurs caractéristiques électriques ainsi que les matériaux OTC et spécialement l'oxyde de zinc (ZnO) qui a suscité un engouement particulier en raison de ses nombreuses propriétés. Une approche de ses principales propriétés : électriques, optiques et cristallographiques ainsi que les avantages du choix de ce matériau dans la composition de la cellule photovoltaïque ont également été abordés.

# Chapitre II

## Simulation et résultats

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une simulation d'une cellule solaire de type ZnO(n)/Si(p) avec différents paramètres et leurs influences tels que : l'épaisseur des différentes couches (absorbeur et émetteur), le dopage et la vitesse de recombinaison.

Cette simulation avec le logiciel ATLAS de Silvaco est dans le but d'obtenir des résultats permettant d'améliorer les performances des cellules solaires.

## II.2. Logiciel ATLAS de silvaco

Le logiciel Atlas de Silvaco offre des possibilités de simulation à deux et à trois dimensions (2D et 3D) basées sur la physique des dispositifs semiconducteurs. Différents outils peuvent être utilisés comme : deckbuild, tonyplot, Devedit , etc. Une représentation de l'interface Deckbuild est donnée à la figure (II-1).

La simulation à l'aide de ce programme permet de comprendre le fonctionnement et la physique de dispositifs pour différentes structures. Il est gouverné par les trois principales équations : l'équation de Poisson, l'équation de continuité ses électrons libres et l'équation de continuité des trous libres. La résolution de ces équations différentielles non linéaires peut se faire à l'aide de différentes méthodes numériques (Newton, Gummel, etc) afin de déterminer les caractéristiques de transport.

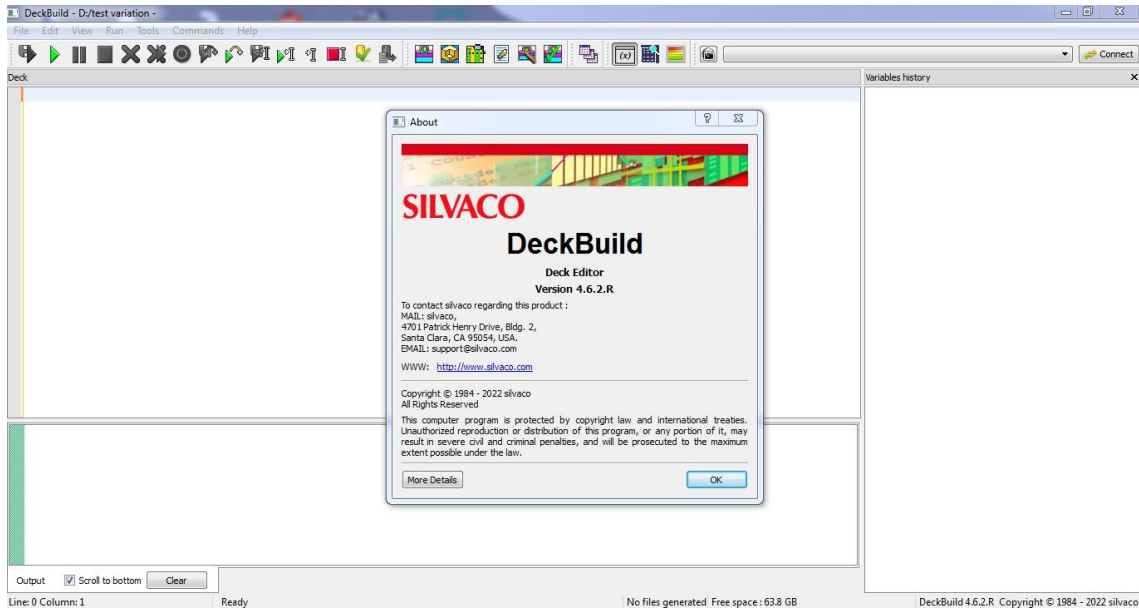


Figure II-1 : Interface l'outil deckbuild

### Étapes de simulation sous Deckbuild

**Mesh**, : ou Maillage encore c'est une grille définie par des lignes horizontales et verticales et l'espace entre eux

**Region** : après la définition du maillage, chaque partie de la structure doit être affectée à un type de matériau ce qu'on appelle par région. Ces régions sont numérotées à partir 1 (région 1, région 2, ... etc.)

**Contact** (électrodes) : Cette étape consiste à définir les deux contacts de notre cellule : une cathode pour la région de type n et une anode pour la région de type p.

**Doping** : Dans cette étape, le type de dopage de chaque région est défini tout en spécifiant le type de distribution (soit gaussien ou uniforme).

**Material** : identifie les matériaux de chaque région en précisant ses paramètres : le gap d'énergie EG, les mobilités des électrons et des trous, la durée de vie des porteurs minoritaires et la vitesse de recombinaison des électrons et des trous.

**Model** : Le choix du modèle physique à utiliser par ATLAS durant la simulation de la structure par exemple :

**CONMOB** (dépendance de la mobilité en fonction de la concentration).

**FLDMOB** (dépendance de la mobilité dépende de e fonction du champ électrique).

**Method** : choix de la méthode numérique pour calculer les solutions des dispositifs semiconducteurs, parmi elles : Newton, Gummel, block.

**Solution** : extraire et sauvegarder le fichier qui contient les résultats de la solution.

Résultats : afficher les résultats de simulation soit par l'outil tonyplot pour la représentation graphique et la structure, ou encore les valeurs par l'instruction EXTRACT.

### II.3. Structure et paramètres de la cellule

Notre cellule a une structure hétérojonction de type n<sup>+</sup>-ZnO:Al/ n-ZnO/p-Si /p<sup>+</sup>-Si/Al. Le ZnO est utilisé en même temps comme couche antireflet, électrode transparente, et aussi comme couche active n pour réaliser la jonction. Le Silicium de type p constitue l'absorbeur de notre cellule, dont la surface arrière est fortement dopée pour réaliser un champ de surface arrière appelée BSF (Back Surface Field). L'aluminium joue le rôle de contact métallique arrière. La simulation de la structure de la cellule à l'aide de Atlas Silvaco est représentée à la figure (II-2).

Les principaux paramètres des différentes couches de la cellule utilisée pour cette simulation sont donnés au tableau (II-1).

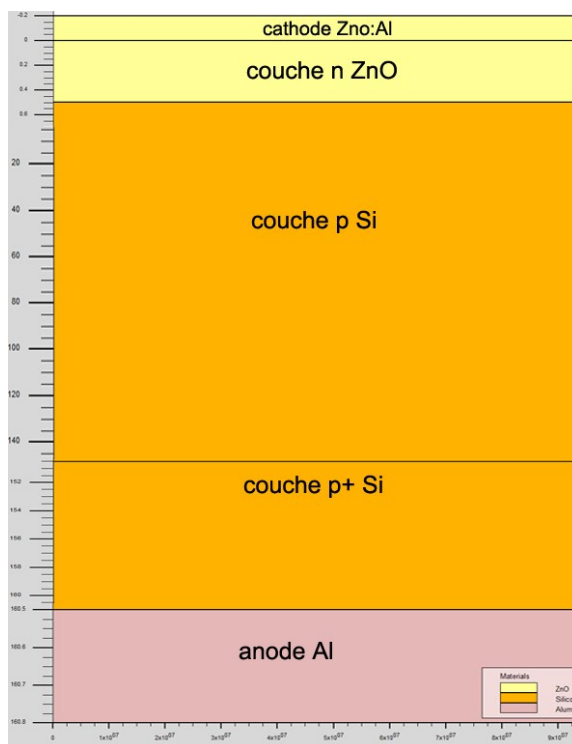


Figure II-2: Structure de la cellule photovoltaïque

Tableau II-1 : Paramètres des couches de la cellule photovoltaïque ZnO/Si

	Cathode ZnO :Al	Couche n+-ZnO	Couche p-Si	Couche p+-Si	Anode Al
aisseur (µm)	0.2	0.5	150	10	0.3
EG (eV)	3.27		1.124		/
Durée de vie des minoritaires (s)	$1 \times 10^{-6}$		$1 \times 10^{-4}$		/
Dopage( $\text{cm}^{-3}$ )	/	$2.2 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{16}$	$3 \times 10^{18}$	/

## II.4. Simulation de la structure n-ZnO /p-Si sans BSF

Les résultats de simulation de la cellule n<sup>+</sup>-ZnO/p-Si sans BSF a permis d'obtenir les performances photovoltaïques représentés sur le tableau (II-2) où un rendement de 15.25% est atteint. Les graphes de la caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension J(V) ainsi que l'efficacité quantique externe pour différentes longueurs d'onde EQE( $\lambda$ ) sont représentés respectivement sur les figures (II-3) et (II-4).

Une forte réduction de l'efficacité quantique est observée pour les longues longueurs d'onde. Cette forte réduction est essentiellement due à la faible longueur de diffusion des minoritaires ainsi que la recombinaison en surface arrière.

**Tableau II-2** : Performances photovoltaïques d'une cellule photovoltaïque ZnO/Si

Résultats de simulation	
$I_{CC}$ (mA)	29.68
$V_{CO}$ (V)	0.61
FF (%)	83.08
$\eta$	15.25

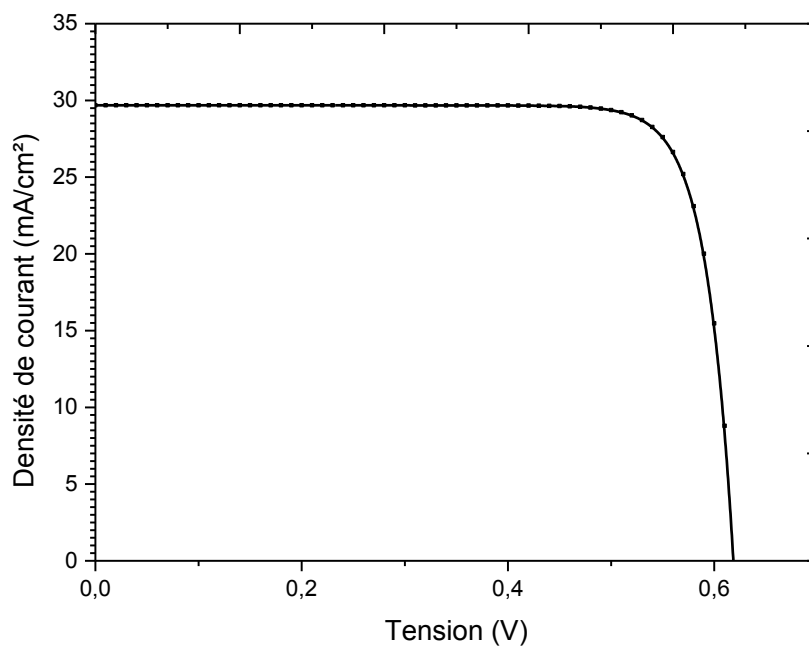


Figure II-3 : Caractéristique J(V) d'une cellule photovoltaïque ZnO/Si

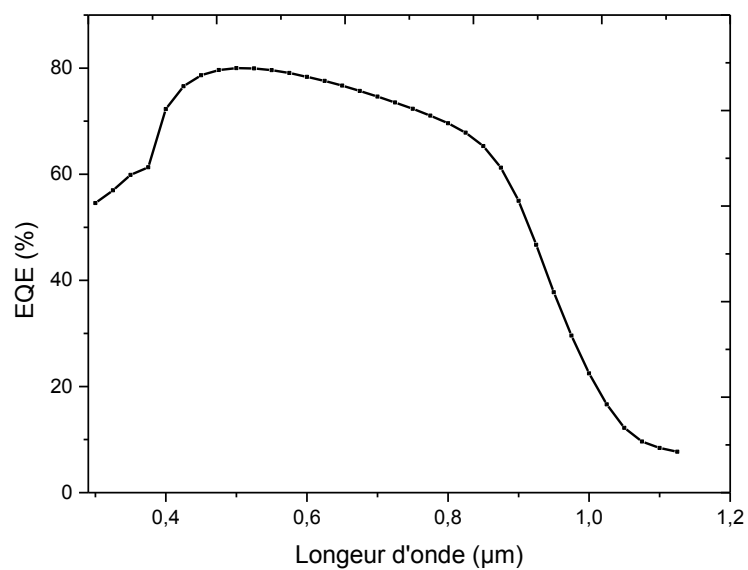


Figure II-4 : Efficacité quantique externe d'une cellule photovoltaïque ZnO/Si



## II.5. Simulation de la cellule avec BSF

Afin d'améliorer les performances de la cellule, une couche de type p fortement dopée (BSF) est introduite à la surface arrière. Les résultats de simulation sont donnés au tableau (II-3) où l'on note une augmentation de  $J_{cc}$  qui passe de 29.68 à 35.15 mA/cm<sup>2</sup> ; une légère augmentation de  $V_{co}$  de 0.61 à 0.69 V.

Une nette amélioration du rendement de conversion est notée passant directement de 15.25 % à 20.46 %. Cette amélioration est due à la réduction de la vitesse de recombinaison en surface arrière et par conséquent l'augmentation de la probabilité de collecte des porteurs. Les caractéristiques  $J(V)$  de la cellule avec et sans BSF sont représentées ci-dessous.

**Tableau II-3 :** Performances photovoltaïques de la cellule avec couche (p+)

Résultats de simulation	
$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	35.15
$V_{co}$ (V)	0.69
FF (%)	83.66
$\eta$	20.46

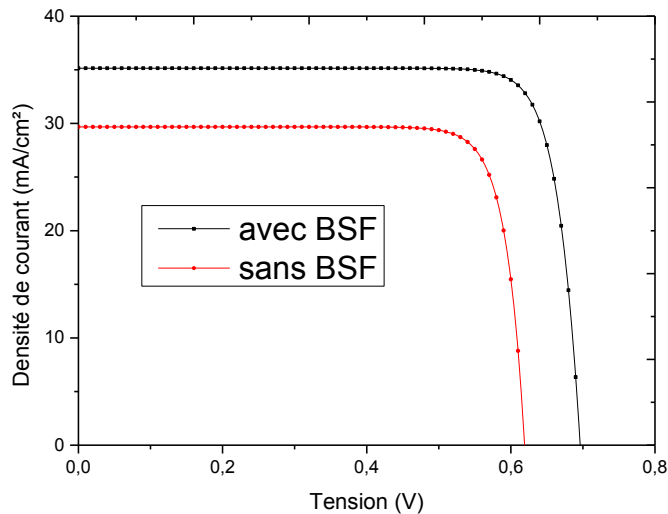


Figure II-5: Caractéristique J(V) des cellules avec et sans BSF

Sur les graphes des figures (II-6) et (II-7) sont représentées les bandes d'énergie de la cellule avec et sans BSF. Dans le deuxième cas ( $n^+$ -ZnO/ $p$ -Si), les porteurs minoritaires peuvent atteindre la surface arrière où il se recombinent, par contre la présence de la couche ( $p^+$ ) dans le premier cas, une courbure des bandes d'énergie apparaît dans les deux niveaux (conduction et valence) du diagramme. Ceci est dû à la création d'un champ électrique à la surface arrière qui s'oppose au mouvement des porteurs minoritaires et les repousse loin de la surface arrière.

L'efficacité quantique représentée sur la figure (II-8) montre que dans l'intervalle de longueurs d'onde  $[0,8-1,1] \mu\text{m}$  le rendement quantique de la cellule avec BSF est supérieur à celui de la cellule sans BSF. L'existence de la couche ( $p^+$ ) à la surface arrière implique une augmentation de la concentration des porteurs mobile ce qui rend l'amélioration du rendement apparente pour les longues longueurs d'onde.

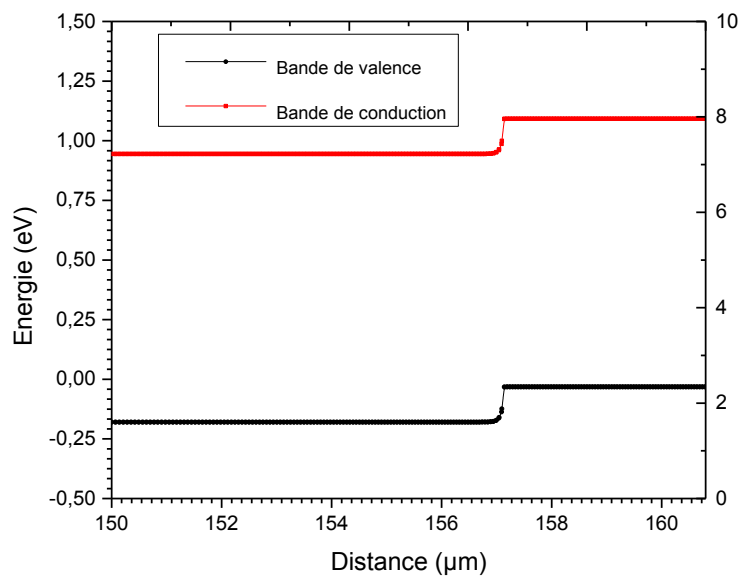


Figure II-6 : Diagramme de bandes d'énergie de la cellule avec couche (p+)

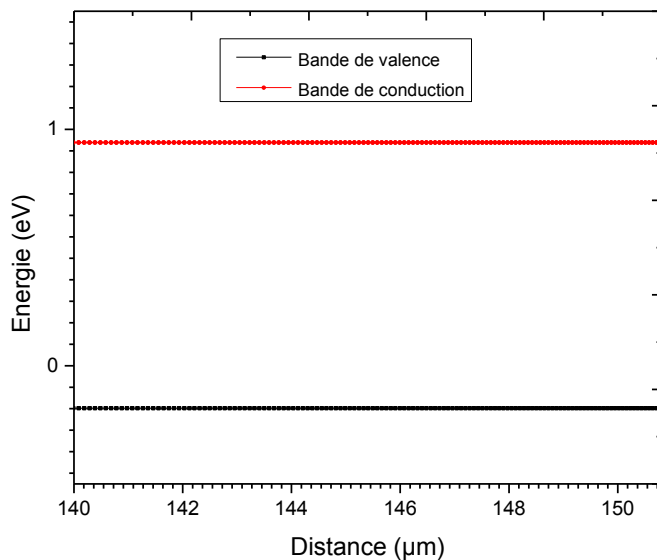


Figure II-7 : Bandes d'énergie d'une cellule sans couche (p+)

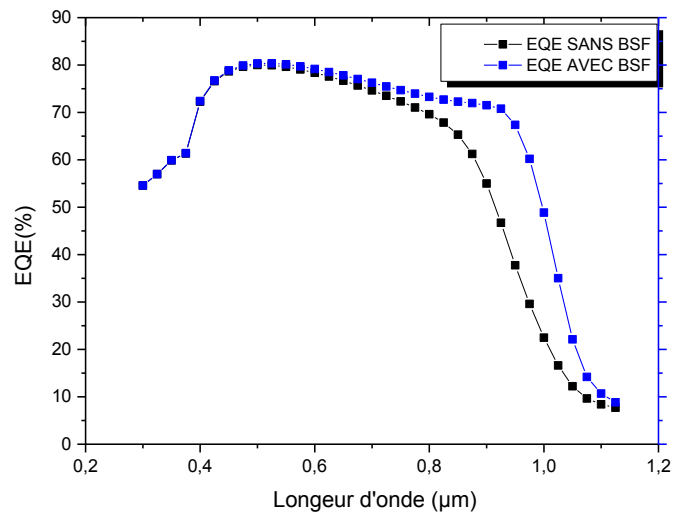


Figure II-8 : Efficacité quantique externe des cellules avec et sans BSF

## II.6. Influence de l'épaisseur de l'émetteur

La simulation de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche ZnO pour une variation de 0,2  $\mu\text{m}$  jusqu'à 0,8  $\mu\text{m}$  nous donne les graphes des performances photovoltaïques représentées ci-dessous. Tous les paramètres sont presque constants ce qui prouve la bonne transparence de notre OTC du moment que l'absorption des photons à la surface avant est moindre (presque négligeable).

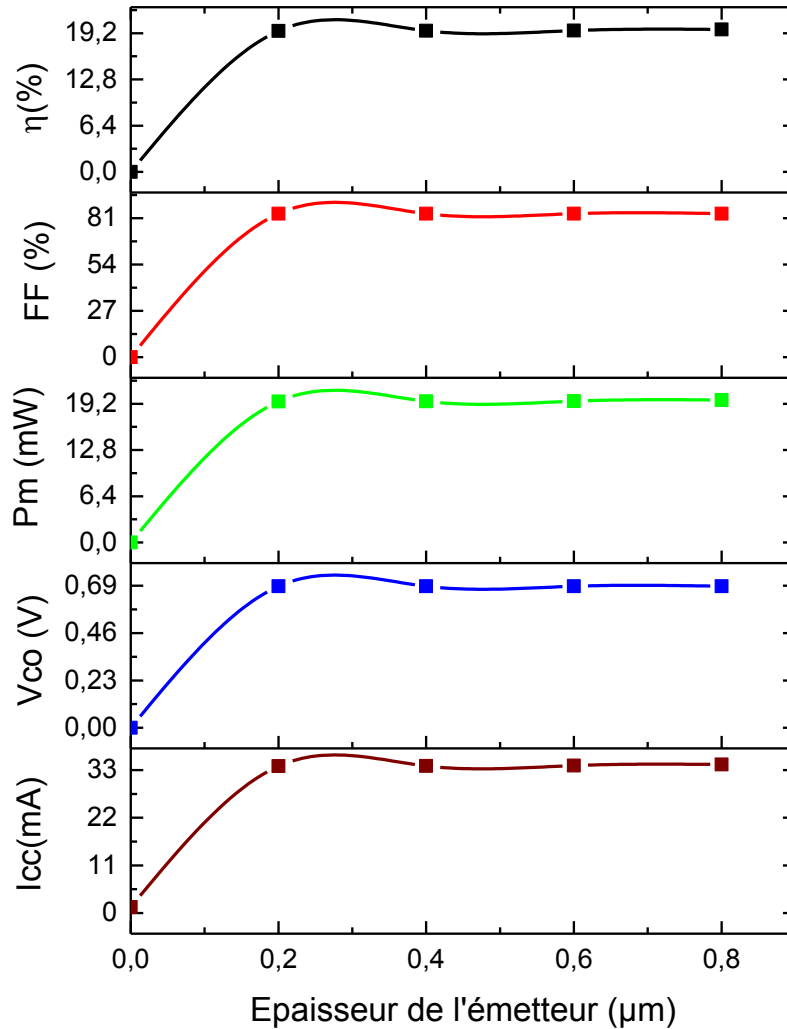


Figure II-9 : Paramètres photovoltaïques de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

## II.7. Influence de l'épaisseur du BSF

Simulation de la cellule avec variation de l'épaisseur de la couche (P+) BSF, de 0μm à 10μm. On obtient les graphes ci-dessous correspondant à ICC, VCO, FF et PMAX.

Très claire qu'une présence d'une couche p+ (BSF) entraîne une augmentation de ICC, VCO et donc PM, EFF, cette augmentation due à l'accumulation des charges positives.

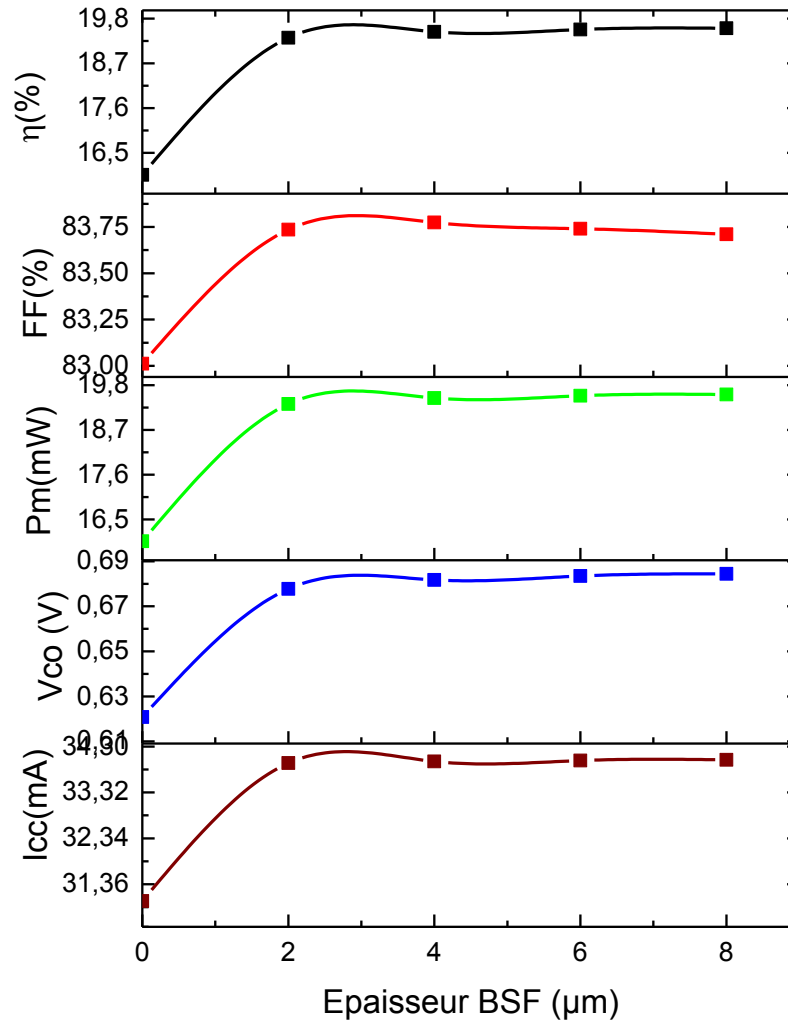


Figure II-10 : Paramètres photovoltaïques de la cellule en fonction de l'épaisseur de couche (p+)

## II.8. Influence de dopage du l'émetteur

Une variation du dopage de la couche n-ZnO dans l'intervalle  $[1 \times 10^{16} \text{ } 3 \times 10^{18}]$  permet d'extraire le dopage optimal pour un meilleur rendement de conversion. Les résultats représentés sur la figure (II-11) montrent qu'un dopage de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  donne les meilleures performances pour notre cellule.

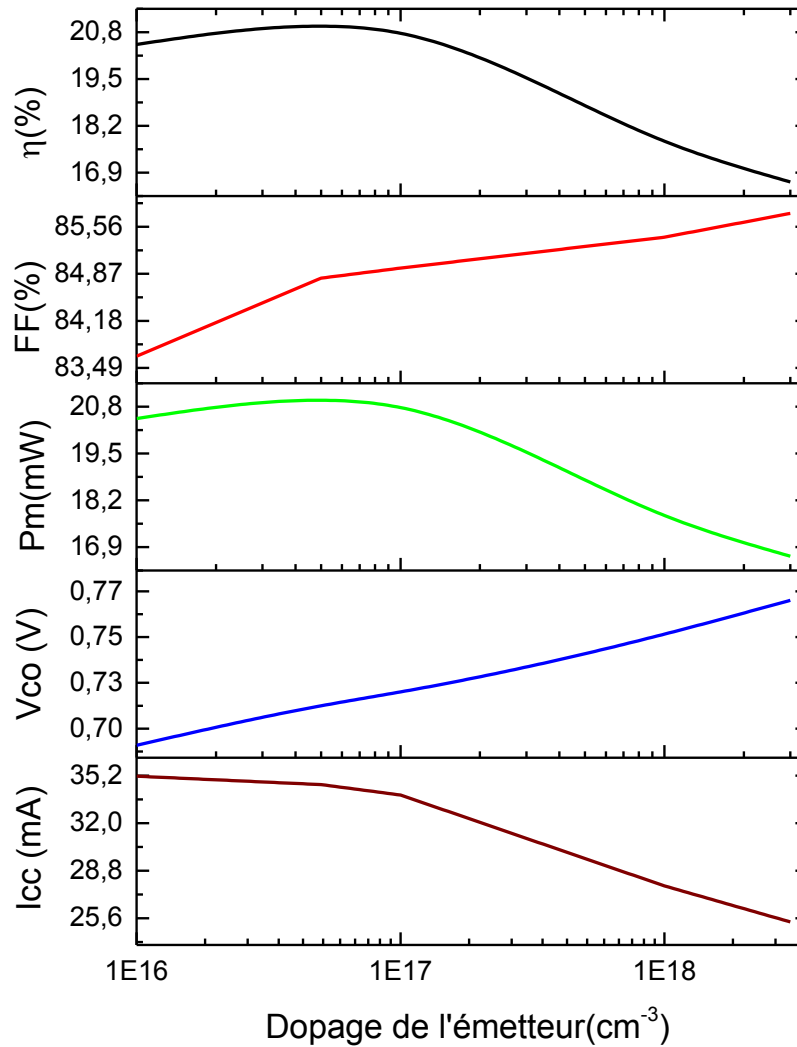


Figure II-11 : Paramètres photovoltaïques de la cellule en fonction dopage de l'émetteur

D'après les caractéristiques électriques  $P(V)$  et  $J(V)$  représentées respectivement sur les figures (II-12) et (II-13), on note que pour un dopage de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , la puissance est à son point maximal et la densité de courant de court-circuit chute à partir de cette valeur.

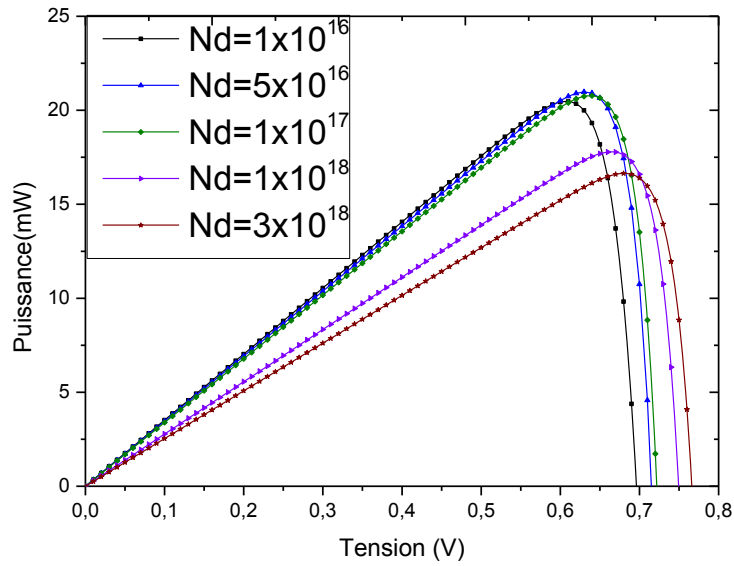


Figure II-12 : Caractéristique P(V) en fonction dopage de l'émetteur

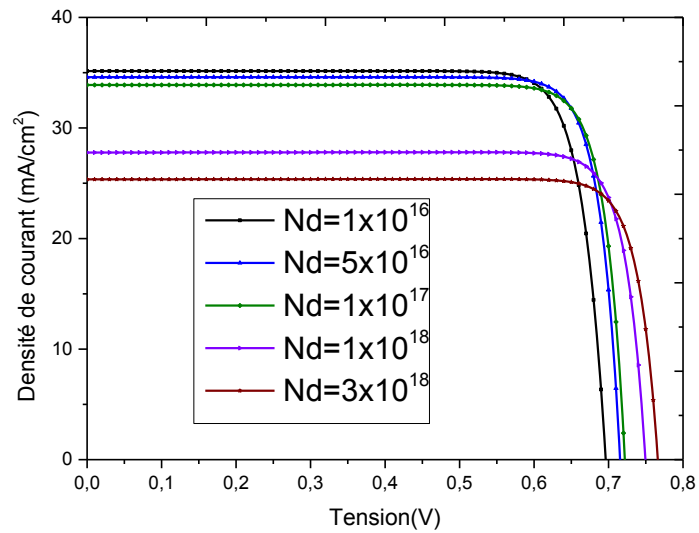


Figure II-13 : Caractéristique J(V) en fonction dopage de l'émetteur



## II.9. Influence du dopage du BSF

L'influence du dopage de la couche p+ sur les performances photovoltaïques pour une variation allant de  $10^{16}$  à  $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  est représentée sur la figure (II-14). On remarque que tous les paramètres subissent une amélioration suite à l'augmentation du dopage et que seul le facteur de forme présente une légère diminution lorsque le dopage dépasse  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ .

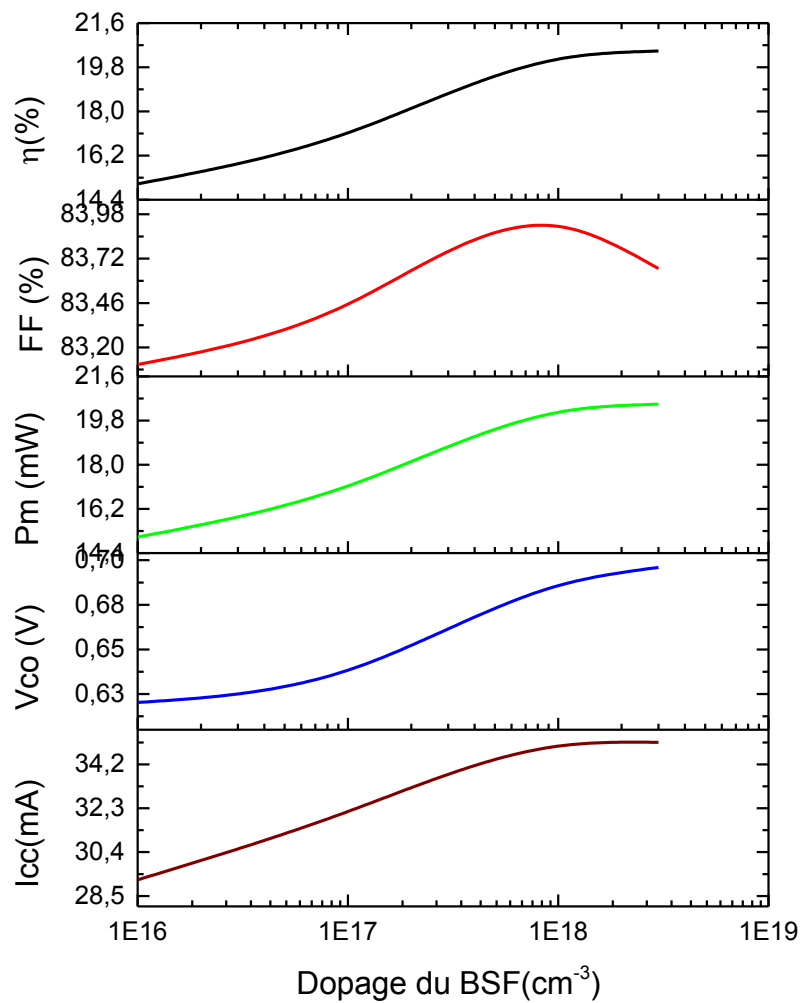


Figure II-14 : Paramètres photovoltaïques en fonction dopage de la couche (p+)

Les figures ci-dessous confirment clairement que le dopage optimal de la couche Si(p+) se situe entre  $10^{18}$  et  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

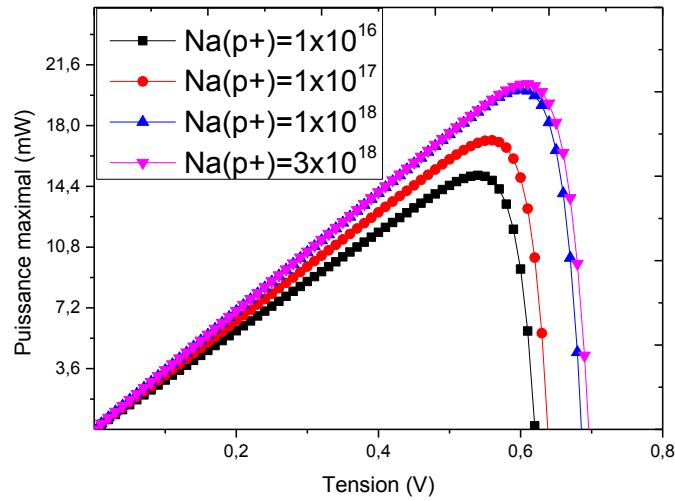


Figure II-15 : Caractéristique P(V) en fonction dopage de couche (p+)

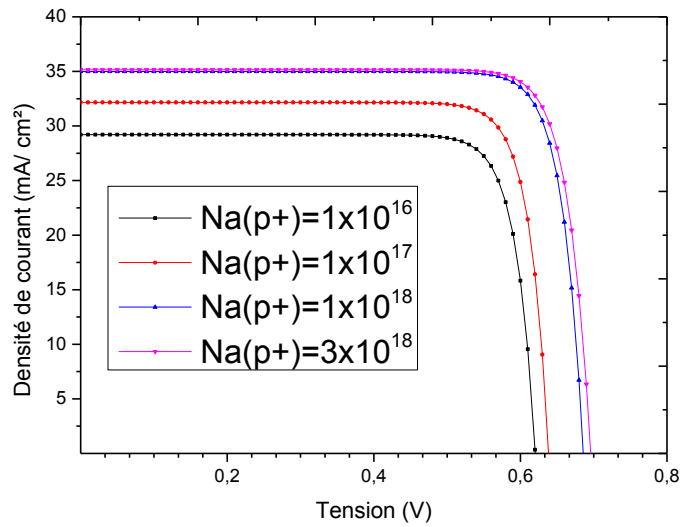


Figure II-16 : Caractéristique J(V) en fonction dopage de couche (p+)

## II.10. Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires

Suite à l'introduction de la couche BSF (citée précédemment) et par conséquent l'amélioration des performances photovoltaïques particulièrement due à l'augmentation de la durée de vie des porteurs minoritaires, on a procédé à une étude de l'effet de la variation de cette durée de vie sur les paramètres de la cellule dans une plage allant de  $20\mu\text{s}$  à  $100\mu\text{s}$ . Tous les paramètres photovoltaïques sont améliorés en particulier le rendement de conversion qui passe de 18.6% à 20.4%.

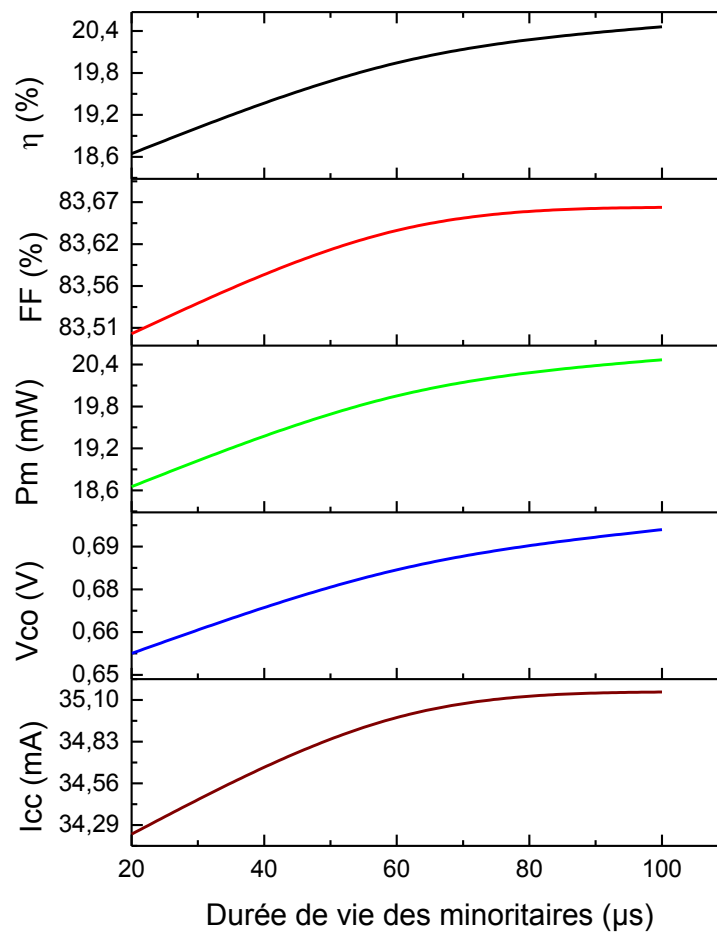


Figure II-17 : Paramètres photovoltaïques en fonction de la durée de vie des minoritaires

Comme la longueur de diffusion  $L_{diff}$  des porteurs est proportionnelle à leur durée de vie  $\tau$  suivant l'équation :  $L_{diff} = \sqrt{D \cdot \tau}$  où D est le coefficient de diffusion, une augmentation de  $\tau$  confère aux porteurs une meilleure diffusion ce qui se traduit par l'augmentation du rendement quantique externe aux longues longueurs d'onde.

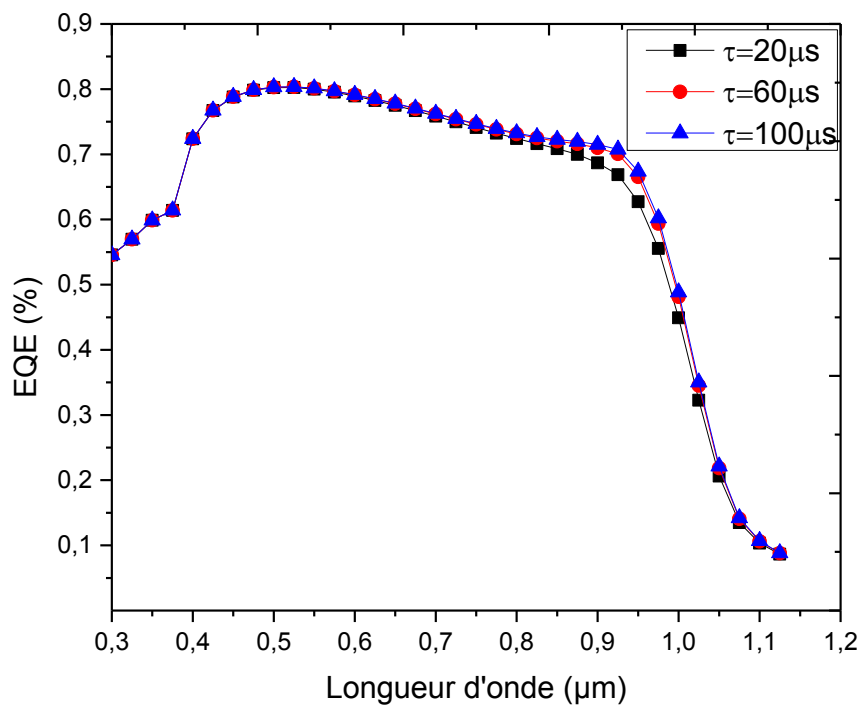


Figure II-18 : Efficacité quantique en fonction de la durée de vie des minoritaires

## II.11. Rendement de la cellule en fonction de la vitesse de recombinaison

Parmi les paramètres clés qui dictent le comportement du rendement de la cellule étudiée, la vitesse de recombinaison en surface à l'interface Si/ZnO considérée comme étant le paramètre le plus important. En effet, la figure (II.29) démontre le grand effet de cette vitesse sur les performances photovoltaïques où l'on note qu'une augmentation de la vitesse de recombinaison de

$1 \times 10^4$  cm/s à  $1 \times 10^8$  cm/s réduit considérablement tous les paramètres photovoltaïques et particulièrement le rendement de conversion.

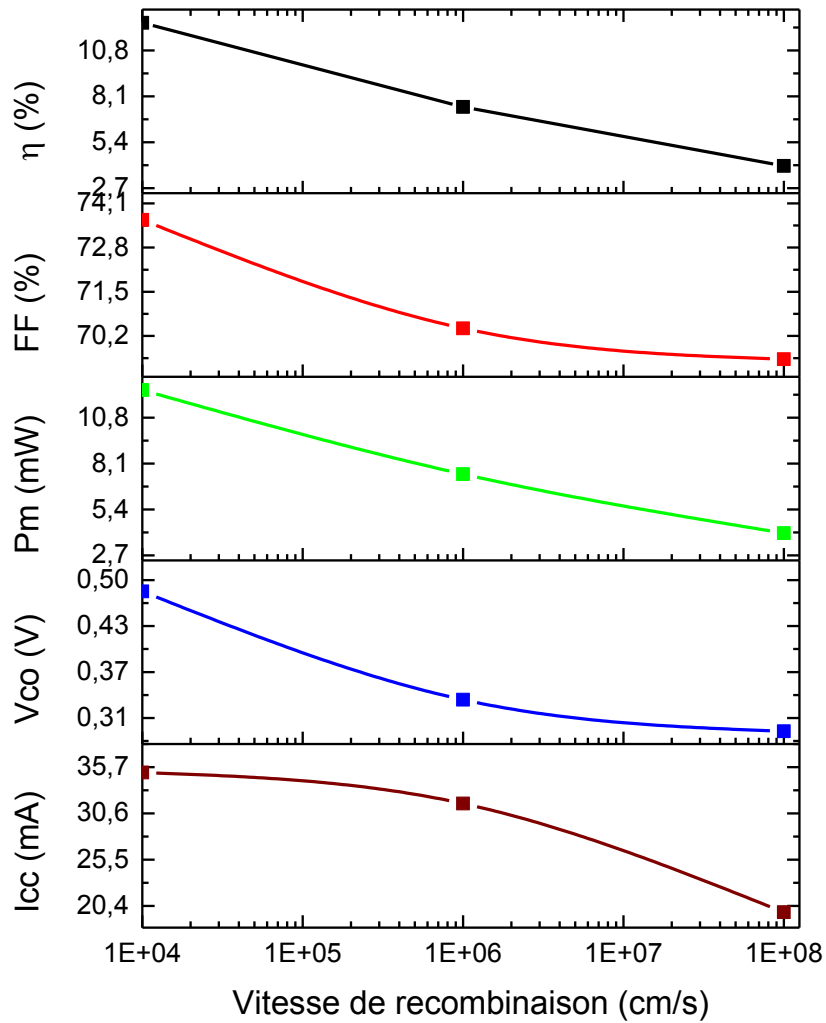


Figure II-19 : Paramètres photovoltaïques en fonction vitesse de recombinaison

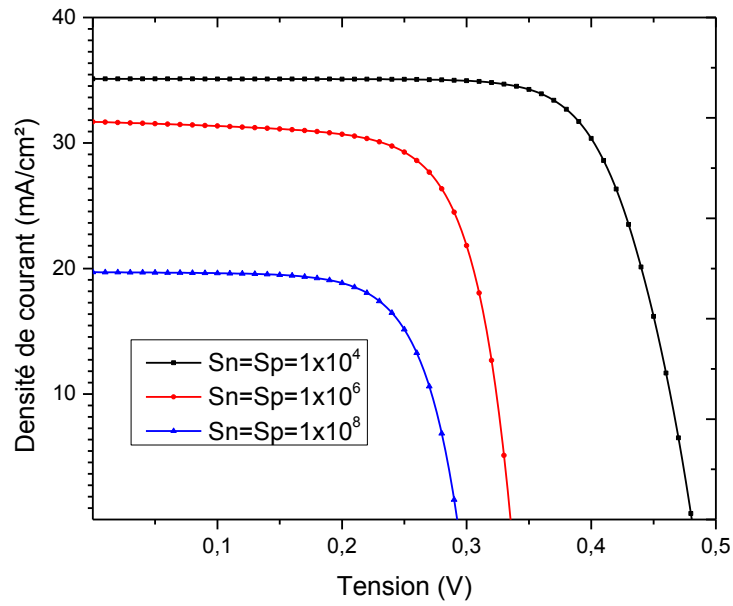


Figure II-20 : Caractéristique J(V) en fonction de la vitesse de recombinaison

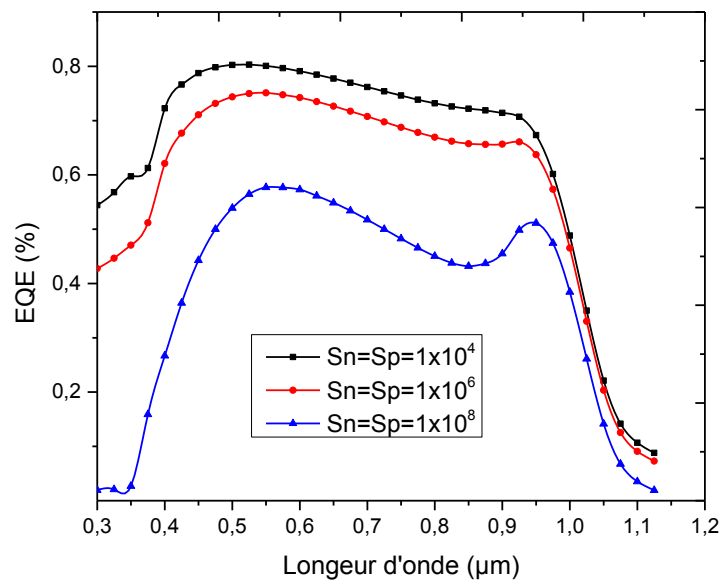


Figure II-21 : Efficacité quantique en fonction de la vitesse de recombinaison

## II.12. Conclusion

La simulation numérique de la cellule proposée dans ce travail de structure n-ZnO/p-Si/p+-Si/Al à l'aide de Atlas Silvaco a prouvé son efficacité dans l'utilisation de la couche d'oxyde de Zinc en même temps comme couche active n et couche antireflet grâce aux propriétés de transparence et de conduction de matériau. Un rendement de 20.46% est atteint avec un facteur de forme de 83.66%.

# Conclusion générale



### Conclusion générale

Le travail proposé dans ce mémoire consiste à simuler à l'aide du logiciel Atlas de Silvaco une cellule photovoltaïque en hétérojonction basée sur du Silicium cristallin de type p comme absorbeur et d'une couche d'oxyde de Zinc de type n comme couche active et couche antireflet.

Grâce à ses nombreuses propriétés physico-chimiques et optoélectroniques intéressantes, le ZnO représente l'un des rares matériaux (oxyde transparent conducteur) multifonctionnels. C'est un semiconducteur très prometteur dans plusieurs domaines d'applications, notamment comme couche antireflet, capteur de gaz et en tant que photocatalyseur dans la dépollution de milieux aqueux.

Ce présent travail est lié plus particulièrement à l'identification de l'influence de certains paramètres (dopage, effet de BSF, épaisseur et dopage su ZnO) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule, à savoir le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion  $\eta$ .

Les résultats obtenus suite à la simulation numérique sont considérés satisfaisants puisqu'ils démontrant les possibilités d'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque. En effet, l'optimisation des différents paramètres de la cellule solaire ZnO/Si, permet d'atteindre une tension de circuit ouvert de 0.7 V, un courant de court-circuit de 35.15 mA/cm<sup>2</sup>, un facteur de forme de 83.66% et un rendement de 20.46%.

Il serait intéressant d'effectuer d'autres simulations en utilisant d'autres paramètres structuraux dans le but d'améliorer les performances de la cellule solaire ZnO/Si.

---

## Bibliographie

- [1] "EQUEUR, B.," *Energie solaire photovoltaïque volume1, UNESCO(2000)*.
  - [2] "T.Destus, Développement de cellules photovoltaïque à hétérojonctions,INSA Lyon".
  - [3] "Faÿ, Sylvie , L'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires,THÈSE N° 2899 (2003)".
  - [4] "F. KHALED, Dispositifs photovoltaïques, Polycopié de cours, 2020", .
  - [5] "A. Djemouai Physique des composants semiconducteurs 2", Cours Master 1.
  - [6] "K. LAGHA-MENOUER ,Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouches, (2011)".
  - [7] "Garnier, Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray CVD. Thèse de doctorat, ENAM, (2009)".
  - [8] "F.KHALED, Effet de l'électrode transparenteles sur les propriétés des cellules solaires en hétérojonction à base de silicium, Thèse de doctorat, (2017)".
  - [9] "Shashikant Sharma, Bernhard C. Bayer, and Viera Skakalova ,IEEE Transactions on Electron Devices,(2016)".
  - [10] "A. Eshaghi, A. Graeli, and M. Hajkarimi,Fabrication of transparent conductive aluminum zinc oxide nanostructured thin film on polycarbonate substrate for heat mirror,Journal of Optical Technology, (2015)".
  - [11] "L. Serairi, M. Capochichi-Gnambodoe, Y.G. Habba, and Y. Leprince-Wang,," *Energy harvesting based on ZnO nanostructure*.
-

## Résumé

Ce travail consiste à simuler une cellule solaire en hétérojonction de type n-ZnO : Al/ n-ZnO/p-Si /p+-Si/Al afin d'améliorer les paramètres photovoltaïques tels que le rendement qui a atteint une valeur de 20.46 %. Cette simulation a été effectuée à l'aide du logiciel ATLAS SILVACO, les résultats obtenus par l'équipe de recherche de l'université de USA à l'aide de l'outil PC1D confirment les notre. L'utilisation du ZnO comme couche active et couche antireflet est confirmée.

## Abstract

The main of this work is a numerical simulate of a single heterojunction solar cell model based on crystalline p-silicon and n-doped zinc oxide in order to find the optimized parameters like the efficiency which reached 20.46%. The simulation used Atlas Silvaco software and the obtained results are in good agreement with those found by the research team of USA university. The use of ZnO as an active layer as well as an antireflection coating is confirmed.

## ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو محاكاة خلية شمسية مكونة من طبقتي أكسيد الزنك ZnO و السيليسيوم Si و ذلك للحصول على أفضل الاعدادات و الخصائص و منها الكفاءة التي وصلت قيمتها في هذه المحاكاة الى 20.46%. هذه المحاكاة التي تمت بواسطة برنامج ATLAS SILVACO أعطت و أثبتت النتائج التي توصل إليها فريق البحث في جامعة الولايات المتحدة الأمريكية , كما يمكن إجراء محاكاة أخرى بالإعتماد على إعدادات أخرى في سبيل تطوير هاته الخلية للوصول إلى إستغلال أمثل للطاقة الشمسية مستقبلا.