

# UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



## UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Application

Spécialité : Physique des matériaux

**Sujet : Etude en modélisation et simulation d'une cellule solaire de type ZnO (n<sup>+</sup>)/Si (p)/ Si (p<sup>+</sup>) sous éclairement multispectral en régime statique : Contribution de l'émetteur**

Présenté par

**M. Raoul MALOU**

Sous la supervision du Professeur Grégoire SISSOKO (FST UCAD)

Soutenu publiquement le 11/08/2018 devant le jury composé de :

Prénom (s) NOM	Grade	Qualité	Etablissement
Moctar CAMARA	Maître de Conférences	Président de jury	UASZ
Lat Grand NDIAYE	Maître de Conférences	Examineur	UASZ
Joseph Sambasene DIATTA	Maître Assistant	Examineur	UASZ
Ababacar NDIAYE	Maître Assistant	Rapporteur	UASZ
Moustapha THIAME	Maître Assistant	Encadrant	UASZ

## **DEDICACES**

*Je dédie ce travail :*

*A mon feu père Augustin MALOU,*

*A ma mère et sa coépouse,*

*A mes tantes,*

*A mes oncles,*

*A mes sœurs,*

*A mes frères,*

*A mes cousines et cousins,*

*A tous mes professeurs,*

*A tous mes amis et tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce  
travail.*

## **REMERCIEMENTS**

Je remercie tout d'abord le MISERICORDIEUX de m'avoir donné souffle de vie. Dans cette optique, il ressort que l'humilité fut le début de ma quête du savoir. Alors je pense que le moment est venu pour moi d'exprimer mes sincères gratitude et reconnaissances au personnel enseignant de la filière MPC I qui n'a ménagé aucun effort pour nous permettre d'acquérir les connaissances indispensables pour notre formation afin d'affronter les rudes réalités du monde du travail.

Je tiens à remercier ensuite le Docteur Moustapha THIAME, mon encadrant, sans qui l'aboutissement de ce travail n'aurait pas été possible. Sa grande disponibilité, sa rigueur scientifique et ses conseils m'ont été très précieux. Il a su me guider et me faire progresser tout au long de ce travail de recherche, en me laissant la liberté dont j'avais besoin ; je ne peux que louer ses qualités humaines.

Je remercie aussi Dr Moctar CAMARA pour avoir accepté de présider le jury de mémoire de master.

Mes remerciements vont aussi à l'égard de Dr Ababacar NDIAYE pour avoir consenti de rapporter mon mémoire.

Je remercie très sincèrement Dr Lat Grand NDIAYE et Dr Joseph Sambasene DIATTA pour leur disponibilité et d'avoir accepté d'examiner mon travail de mémoire.

Je tiens à remercier plus particulièrement Mr Moussa CAMARA(le chef), Mr Sada TRAORE, Mr Remi NDIUKANE, Mr Abdoul K. DIALLO, Mr Seydou BA, tous les doctorants du département de physique, pour leurs discussions et aides apportées.

Je remercie Mr Dioncounda YOCK, Technicien de laboratoire au Département de Physique. Mes remerciements vont aussi droit vers la septième promotion de MPC I de l'université Assane SECK de Ziguinchor.

Je remercie l'ensemble des étudiants en doctorat et en master du Département de Physique qui, par leurs conseils et leurs aides ont contribué au bon déroulement de mon travail.

Je ne saurais terminer sans remercier par la grâce de Dieu mes parents et mes amis pour leur soutien inconditionnel, je m'adresse particulièrement à ma mère Jeannette NZALLE, Fatoumata K. SANE, à mon père adoptif Gilbert MALOU, à mon oncle Gêrôme NZALLE, Monique MALOU et Mr. Daouda DIAMBANG et à toute la famille MALOU, NZALLE qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de mes études, mention spéciale à mes amis Younouss BIAYE, Adama Kao CORREA, Papis TECKAGNE.

## RESUME

Le présent travail porte sur une étude en modélisation et simulation d'une cellule solaire de type ZnO (n<sup>+</sup>)/Si (p)/Si (p<sup>+</sup>) sous éclairage multispectral, en régime statique.

Nous avons fait une modélisation à une dimension de la photopile éclairée par la face avant en régime statique et une simulation de quelques paramètres électriques à l'aide d'un logiciel Mathcad. Nous avons mis en évidence l'effet de la profondeur de l'émetteur sur la densité des porteurs libres en son sein d'une part, et également sur les densités de photocourant, de phototension. Cela nous a permis de faire une comparaison de la densité des porteurs de charges, de la densité de photocourant pour les deux types de matériaux ZnO(n<sup>+</sup>) et Si(n<sup>+</sup>) utilisés comme émetteur d'une cellule solaire.

En suite, une étude des caractéristiques courant-tension, en mettant en exergue l'effet de l'épaisseur de l'émetteur et du taux de dopage est faite. Celle de la puissance en fonction de la phototension pour les deux matériaux utilisés au niveau de l'émetteur est aussi faite. Elle nous a permis de mettre en exergue l'effet de la variation de la profondeur de l'émetteur sur photocourant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert.

Enfin, les paramètres électriques optimaux de la cellule sont déterminés et comparés aux paramètres d'une cellule de même type à base de Si. Elle a permis de voir que l'on peut améliorer le rendement de la cellule bifaciale au silicium en utilisant comme émetteur par le ZnO fortement dopé.

**Mots clés : Photopile - Oxyde de Zinc- Silicium polycristallin- Emetteur- Eclairage multispectral- Régime statique.**

## **ABSTRACT**

The present work concerns a study in modeling and simulation of a ZnO (n +) / Si (p) / Si (p +) solar cell under multispectral illumination, under static conditions.

We did a one-dimensional modeling of the solar cell illuminated by the front face in static mode and a simulation of some electrical parameters using Mathcad software. We have demonstrated the effect of the depth of the transmitter on the density of the free carriers on the one hand, and also on the photocurrent and photovoltage densities. This enabled us to make a comparison of the density of the charge carriers, the photocurrent density for the two types of ZnO (n +) and Si (n +) materials used as emitter of a solar cell.

Then, a study of current-voltage characteristics, highlighting the effect of transmitter thickness and doping rate is made. That of the power as a function of the photovoltage for the two materials used at the transmitter is also made. It allowed us to highlight the effect of varying transmitter depth on short circuit photocurrent and open circuit photovoltage.

Finally, the optimal electrical parameters of the cell are determined and compared to the parameters of a cell of the same type based on Si. It has shown that the efficiency of the silicon bifacial cell can be improved by using as transmitter by the heavily doped ZnO.

**Key words: Photopile - Zinc oxide - Polycrystalline silicon - Emitter - Multispectral illumination - Static regime.**

## NOMENCLATURE

$x$	Profondeur de la photopile	$cm$
$d$	Epaisseur de l'émetteur	$cm$
$H$	Epaisseur de la base	$cm$
$\delta p(x)$	Densité des porteurs minoritaires des charges en excès (trous) dans l'émetteur suivant l'épaisseur $x$	$cm^{-3}$
$\delta n(x)$	Densité des porteurs minoritaires des charges en excès (électrons) dans la base suivant l'épaisseur $x$	$cm^{-3}$
$Lp$	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans l'émetteur	$cm$
$Ln$	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base	$cm$
$Dp$	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans l'émetteur	$cm^2.s^{-1}$
$Dn$	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base	$cm^2.s^{-1}$
$S_{av}$	Vitesse de recombinaison à la face avant de l'émetteur	$cm.s^{-1}$
$S_{fe}$	Vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur	$cm.s^{-1}$
$S_f$	Vitesse de recombinaison à la face avant de la base	$cm.s^{-1}$
$S_b$	Vitesse de recombinaison à la face arrière de la base	$cm.s^{-1}$
$\tau p$	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans l'émetteur	$s$
$\tau n$	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base	$s$
$J_{ph1}$	Densité de photocourant au niveau de l'émetteur	$A.cm^{-2}$
$J_{ph2}$	Densité de photocourant au niveau de la base	$A.cm^{-2}$
$p_i$	Concentration intrinsèque du matériau de ZnO	$cm^{-3}$
$n_i$	Concentration intrinsèque du matériau de silicium polycristallin	$cm^{-3}$
$K_B$	Constante de Boltzmann	$J / ^\circ K$
$V_T$	Tension thermique	$V$
$T$	Température ambiante	$^\circ K$

$N_a$	Taux de dopage des atomes accepteurs dans l'émetteur	$cm^{-3}$
$N_d$	Taux de dopage des atomes donneurs dans la base	$cm^{-3}$
$V_{ph1}$	Phototension au niveau de l'émetteur	$V$
$V_{ph2}$	Phototension au niveau de la base	$V$
$I_{ph}$	Photocourant résultant	$A$
$I_{cc_o}$	Courant (référentiel) de court-circuit mesuré d'un éclairage donné	$A$
$I_{cc_i}$	Courant de court-circuit correspondant au fonctionnement de la photopile à AM donné	$A$
$G_\alpha(x)$	Taux de génération des porteurs minoritaires suivant l'épaisseur $x$	$cm^{-3}.s^{-1}$
$R_p$	Taux de recombinaison des trous	$atomes.cm^3.s^{-1}$
$R_n$	Taux de recombinaison des électrons	$atomes.cm^3.s^{-1}$
$\mu_p$	Mobilité des porteurs libres (trous) dans le matériau ZnO	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
$\mu_n$	Mobilité des porteurs libres (électrons) dans le matériau Silicium polycristallin	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
$E_g$	Gap d'énergie d'un matériau	$eV$
$q$	Charge élémentaire	$C$
$a_i, b_i$	Coefficients dans l'expression du taux de génération	$cm^{-3}.s^{-3}, cm^{-1}$
$K_i$	Constante dans l'expression de la densité des porteurs minoritaires des charges	

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

ZnO : Oxyde de Zinc ;

TCO : Oxydes Transparents et Conducteurs ;

Si-poly : Silicium polycristallin ;

Si-mono : Silicium monocristallin ;

CO : Monoxyde de carbone ;

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone ;

CH<sub>4</sub> : méthane ;

ZCE : Zone de Charge d'Espace ;

QNB: Quasi Neutral Base;

BSF: Back Surface Field;

A.M : Masse d'Air ;

LED : Diode Electroluminescente ;

2D, 3D :2 Dimensions, 3 Dimensions ;



# TABLE DES MATIERES

<b>DEDICACES</b>	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>ii</b>
<b>RESUME</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iv</b>
<b>NOMENCLATURE</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b>	<b>vii</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>xi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>I-1/Généralités sur le Silicium Polycristallin</b> .....	<b>5</b>
<b>I-2/Généralités sur la couche mince d'oxyde de zinc</b> .....	<b>6</b>
<b>I-3/Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</b> .....	<b>8</b>
<b>I-4/ Etude de quelques travaux sur la modélisation et simulation de cellules solaires</b> ...	<b>9</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>18</b>
<b>CHAPITRE II : MODELISATION DE LA CELLULE SOLAIRE DE TYPE ZnO (n<sup>+</sup>) / Si(p) / Si (p<sup>+</sup>) EN REGIME STATIQUE SOUS ECLAIREMENT MULTISPECTRAL CONSTANT</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>20</b>
<b>II-1- Présentation de la photopile bifaciale</b> .....	<b>20</b>
<b>II-2- Présentation du logiciel</b> .....	<b>21</b>
<b>II-3- Densité des porteurs minoritaires de charges en excès</b> .....	<b>23</b>
<b>II-3-1) Densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans l'émetteur.</b> .....	<b>23</b>

II-3-1-1) Taux de génération .....	23
II-3-1-2) Taux de recombinaison .....	24
II-3-1-3) Equation de continuité.....	24
II-3-1-4) Conditions aux limites.....	25
II-3-2) Densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base. ....	26
II-3-2-1) Equation de continuité.....	26
II-3-2-2) Conditions aux limites.....	27
II-4- Etude théorique de la densité de photocourant.....	28
II-4-1) Etude théorique de la densité de photocourant au niveau de l'émetteur. ....	29
II-4-2) Etude théorique de la densité de photocourant au niveau de la base.....	29
II-5/ Etude théorique de la phototension .....	30
II-5-1) Etude théorique de la densité phototension au niveau de l'émetteur. ....	30
II-5-2) Etude théorique de la phototension au niveau de la base .....	31
II-6/ Etude théorique du courant de la photopile .....	31
II-7/ Puissance de la photopile.....	32
II-8/ Etude théorique du rendement .....	32
II-9/ Facteur de forme (FF) .....	32
CONCLUSION .....	33
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>34</b>
INTRODUCTION .....	34
III-1/ Densité des porteurs minoritaires en excès .....	35
III-1-1) Densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur de l'émetteur. ....	35
III-1-2) Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la densité des porteurs .....	36
III-1-3) Densité des porteurs minoritaires dans l'émetteur pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n <sup>+</sup> ) et Si (n <sup>+</sup> ).....	37
III-2/ Etude de la densité de photocourant .....	38

III-2-1) Photocourant de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur .....	39
III-2-2) Influence de l'épaisseur de l'émetteur .....	40
III-3/ Phototension .....	40
III-3-1) Phototension de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur .....	41
III-3-2) Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la phototension de l'émetteur ...	41
III-3-3) Influence du taux de dopage des impuretés sur la phototension de l'émetteur .....	42
III-4/ Comparaison des structures de cellules ZnO (n <sup>+</sup> ) /Si(p)/Si (p <sup>+</sup> ) et Si (n <sup>+</sup> )/Si(p)/Si (p <sup>+</sup> ) .....	43
III-4-1) Photocourant dans l'émetteur pour les matériaux de type ZnO (n <sup>+</sup> ) et Si (n <sup>+</sup> ) .....	43
III-4-2) Photocourant des cellules de type ZnO (n <sup>+</sup> )/Si(p)/Si (p <sup>+</sup> ) et Si (n <sup>+</sup> )/Si(p)/Si (p <sup>+</sup> ) .....	44
III-4-3) Phototension dans l'émetteur pour les matériaux de type ZnO (n <sup>+</sup> ) et Si (n <sup>+</sup> ) .....	46
III-5/ Caractéristique courant-tension .....	47
III-5-1) Caractéristique courant-tension de l'émetteur .....	47
III-5-2) Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique courant-tension de l'émetteur. ....	48
III-5-3) Caractéristique courant-tension de l'émetteur pour les matériaux ZnO (n <sup>+</sup> ) et Si (n <sup>+</sup> ) .....	49
III-6/ Puissance électrique .....	49
III-6-1) Puissance de l'émetteur de type ZnO (n <sup>+</sup> ) en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.....	49
III-6-2) Puissance de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur pour les deux types de matériaux ZnO (n <sup>+</sup> ) et Si (n <sup>+</sup> ).....	51
III-6-3) Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la puissance électrique de l'émetteur .....	51

<b>III-6-4) Comparaison des paramètres électriques .....</b>	<b>52</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>54</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>	<b>55</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>xii</b>

## **LISTE DES FIGURES**

Figure (I-1): Modules de Silicium (a) polycristallin (b) monocristallin.....	6
Figure (I-2) : structure cristallographique du ZnO (wurzite) .....	6
Figure (I-3): Evolution du nombre de publications portant sur « ZnO » d’après ISI Web of Knowledge. ....	8
Figure (I-4) : Structure (gauche) et diagramme (droite) de bande d’une cellule photovoltaïque. ....	9
Figure (I.5) : Spectres de transmission optique des couches minces de ZnO préparées avec différents dopages en Al.....	16
Figure (I.6) : Variation du gap optique en fonction du dopage.....	17
Figure (I.7) : Variation de la conductivité électrique en fonction du dopage.....	18
Figure (II.1) : Représentation d’une cellule solaire de type ZnO (n+) / Si(p) / Si (p+) .....	21
Figure (II-2) : Mathcad avec différentes barres d’outils affichées.....	22
Figure (II-3) : Différents boutons de la barre d’outils mathématiques.....	23
Figure (II-4) : Barre d’outils standard .....	23
Figure (II-5) : Barre d’outils de mise en forme.....	23
Figure (II-6) : Fonctionnement d’une photopile sous éclairage.....	30
Figure (III.1) : Profil de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur dans l’émetteur .....	37
Figure (III.2): Influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l’émetteur sur la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de l’émetteur .....	38
Figure (III-3) : Profil de la densité des porteurs minoritaires en excès dans (a) l’émetteur de type Si (n+) et (b) l’émetteur de type ZnO (n+) en fonction de la profondeur de l’émetteur. ....	39

Figure (III-4) : Profil de la densité de photocourant dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur.....	40
Figure (III-5) : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de photocourant dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur.....	41
Figure (III-6) : Profil de la phototension dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur, .....	42
Figure (III-7) : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la phototension de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur, .....	43
Figure (III-8) : Influence du taux de dopage des impuretés sur la phototension dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur .....	44
Figure (III-9) : Profil du photocourant dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n+) et Si (n+), .....	45
Figure (III-10): Profil de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour ces deux type de cellules ZnO (n+)/Si(p)/Si (p+) et Si (n+)/Si(p)/Si (p+), .....	46
Figure (III-11) : Profil de la phototension dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n+) et Si (n+), .....	47
Figure (III-12) : Profil de la caractéristique courant-tension dans l'émetteur de matériau ZnO (n+). .....	49
Figure (III.13) : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique courant-tension de l'émetteur .....	50
Figure (III-14) : Profil de la caractéristique courant-tension de l'émetteur des matériaux ZnO (n+) et Si (n+). .....	51
Figure (III-15): Profil de la puissance électrique dans l'émetteur de type ZnO (n+) en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur. ....	52
Figure (III-16): Profil de la puissance électrique dans l'émetteur pour les deux types de matériaux ZnO (n+) et Si (n+) en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur. ....	53
Figure (III-17): Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la puissance de l'émetteur de type ZnO (n+) en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur. ....	54
Figure (III-18): Profils des caractéristiques P (V et J (V) en fonction de la phototension de la photopile de type ZnO (n+)/Si (p)/Si (p+). ....	55

Figure (III-19): Profils des caractéristiques P (V et J (V) en fonction de la phototension de la photopile de type Si (n+)/Si (p)/Si (p+).....55

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau (I.1): Valeurs tabulées du rayonnement solaire sous AM 1.5 [30] .....19

Tableau (III.1): Paramètres de sorties des photopiles de type ZnO (n+)/Si (p)/Si (p+) et Si (n+)/Si (p)/Si (p+).....56

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

De nos jours, face aux problèmes liés à l'épuisement des réserves d'énergie fossiles (charbon, pétrole, gaz, uranium, ...) et aux risques en matière d'environnement liés aux rejets de gaz à effet de serre d'origine anthropique engendrant un réchauffement planétaire [1], la future gestion de l'énergie est au cœur de l'actualité. Pour faire face à cette situation, les énergies renouvelables deviennent une alternative incontournable dans la crise énergétique mondiale. L'une des énergies renouvelables très utilisée et non polluante est l'énergie solaire du fait de sa disponibilité et sa quantité inépuisable.

L'effet photovoltaïque est la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique ; il implique la production et le transport de charges négatives (électrons) et de charges positives (trous) sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur dont le processus physique a été découvert en 1839 par le français Antoine Becquerel. Cette source d'énergie présente, en outre, l'avantage d'être disponible partout sur la planète et de bénéficier d'un potentiel énergétique considérable. La première cellule photovoltaïque au silicium a été réalisée en 1954 dans les laboratoires Bell aux Etats-Unis et présentait un rendement de conversion de 6 % [2]. Dès lors, de nombreux et rapide progrès ont été réalisés, motivés notamment par la conquête spatiale. Depuis les années 1990, l'énergie photovoltaïque suscite un intérêt grandissant, le but étant à la fois d'essayer de concurrencer les énergies traditionnelles pour une utilisation domestique ou industrielle généralisée, mais également de réduire le coût de conversion photovoltaïque [2].

De plus en plus d'efforts sont consacrés dans la recherche afin d'arriver à des rendements de conversion meilleurs tout en diminuant le coût de fabrication des procédés de développement ceci, dans l'objectif d'obtenir un prix de revient des cellules solaires réalisées pouvant rendre attractif l'électricité solaire photovoltaïque par rapport à celle des énergies conventionnelles [3]. Ces cellules solaires peuvent atteindre des rendements photovoltaïques de l'ordre de 24.7% [4]. Pour améliorer le rendement de ces cellules, plusieurs études sont menées pour maîtriser les phénomènes macroscopiques et microscopiques se déroulant en leurs seins, mais aussi pour augmenter le taux de pénétration des radiations à travers l'émetteur, d'où l'utilisation de matériau comme le ZnO. Il se caractérise par un coefficient de transmission de 90 % environ dans le spectre visible et sa conductivité peut être contrôlée par les paramètres d'élaboration au moyen du dopage aux éléments du groupe III. Il s'est imposé ces dernières années dans les technologies planaires comme oxyde conducteur transparent (TCO) pour les cellules solaires [6].



L'évolution du domaine d'application de l'hétérojonction ZnO/Si fait l'objet de plusieurs études à cause de leurs propriétés électrique et optique qui sont intéressantes et pouvant entrer dans diverses applications.

Dans le but de contribuer à optimiser les paramètres électriques des cellules photovoltaïques exploitant ce type de jonction en vue d'obtenir un rendement maximum, notre mémoire porte sur la modélisation et simulation d'une cellule solaire de type ZnO (n+) /Si(p)/Si (p+) sous éclairement multi spectral en régime statique. Nous avons utilisé le logiciel MATHCAD appliqué aux équations et relations relatives aux structures utilisées dans la conception de cellules photovoltaïques pour simuler les paramètres.

Le mémoire s'articule autour de trois chapitres :

D'abord, le premier chapitre aborde une étude bibliographique sur le principe de conversion photovoltaïque et plus particulièrement une photopile bifaciale en régime statique sous éclairement multispectral. Les paramètres électriques, optique, cristallographique d'une part et les généralités sur le silicium polycristallin et le ZnO d'autre part y sont détaillées.

Ensuite, dans le deuxième chapitre nous présentons une modélisation d'une cellule solaire de type ZnO (n+) /Si(p)/Si (p+) éclairée par la face avant sous éclairement multispectral.

Enfin, le troisième chapitre est consacré à la simulation de quelques paramètres de la cellule et l'interprétation des résultats obtenus.

Nous donnerons une conclusion générale à notre travail qui mettra en évidence les idées principales qui ressortent de cette étude et les projets futurs en vue de continuer cette recherche scientifique.

# **CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **INTRODUCTION**

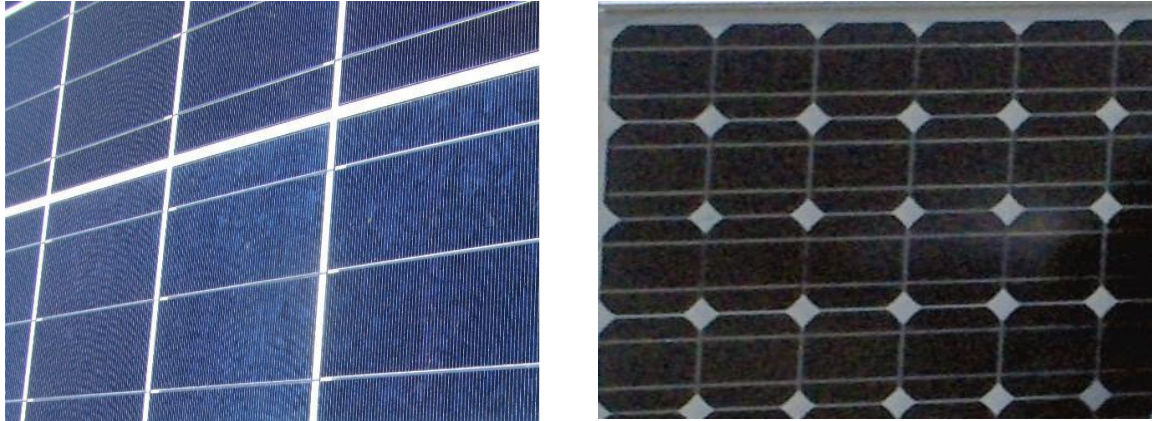
L'électricité est l'une des formes non polluante et silencieuse de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « Cellule solaire » basé sur un effet dit « Effet photovoltaïque ». L'influence de la durée de vie ou de la longueur de diffusion, de la vitesse de recombinaison en surface et en face arrière des porteurs minoritaires sur le rendement d'une photopile ont entraîné le développement de techniques et méthodes de détermination de ces paramètres. Ces techniques sont définies suivant le type d'excitation et de détection de la réponse de la photopile. On distingue deux groupes importants parmi ces techniques [7, 8, 9] :

- Les techniques de mesure en régime statique
- Les techniques de mesure en régime dynamique.

Dans ce premier chapitre nous allons d'abord donner des généralités sur le matériau silicium polycristallin et l'oxyde de zinc puis nous parlerons du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et enfin donner une étude bibliographique de certains travaux qui ont été faits sur quelques paramètres caractéristiques essentiels des cellules solaires.

### **I-1/Généralités sur le Silicium Polycristallin**

Le silicium polycristallin est très proche des modules monocristallins. La même théorie concernant le fonctionnement de la cellule s'applique ; la principale différence est le procédé de fabrication (la cellule Mono-Si est constituée d'un grand monocristal de silicium pur. Ce monocristal est le plus souvent fabriqué suivant la méthode de Czochralski [10]). Les cellules Poly-Si sont fabriquées avec du Si fondu pur dans un moule de section carrée ; le refroidissement est une étape essentielle parce qu'il détermine la grosseur du grain et la distribution des impuretés. Les lingots obtenus sont coupés en barres avec une section transversale; finalement ils sont sciés pour obtenir les disques minces. Ce procédé de fabrication donne une structure cristalline multi-grain. Comparé au Si monocristallin, la structure est moins idéale ayant pour résultat une perte d'efficacité de conversion d'environ de 1% comparé à du mono-Si [11], mais cet inconvénient est surmonté par des coûts inférieurs de production. Un deuxième avantage est l'agencement des cellules qui sont rectangulaires, comparé au « pseudo-carré » du mono-Si ; ainsi ils peuvent être agencés de façon optimisée dans les modules photovoltaïques. L'aspect du poly-Si est distinctement bleu (voir la figure (I-1)) dû à l'absorption manquante des photons de plus haute énergie. En fait, ces photons de haute énergie de la partie supérieure du spectre visible sont réfléchis et ne sont pas absorbés.



(a)

(b)

Figure (I-1): Modules de Silicium (a) polycristallin (b) monocristallin

### I-2/Généralités sur la couche mince d'oxyde de zinc

L'oxyde de zinc (ZnO) est un matériau binaire de type (II-VI) dérivé du zinc, il est semi-conducteur à large bande interdite comprise entre 3.2 et 3.4 eV [12]. Il est photoconducteur, piézoélectrique avec le coefficient piézoélectrique le plus élevé et la plus grande énergie de liaison d'excitons ( $E = 60 \text{ meV}$ ) de tous les semi-conducteurs. Le ZnO est placé parmi les matériaux les plus prometteurs dans différents domaines grâce à ses propriétés physiques intéressantes. Il se cristallise sous différentes structures comme le sel de gemme, le zinc blende et la Wurtzite (voir figure (I-2)) [13].

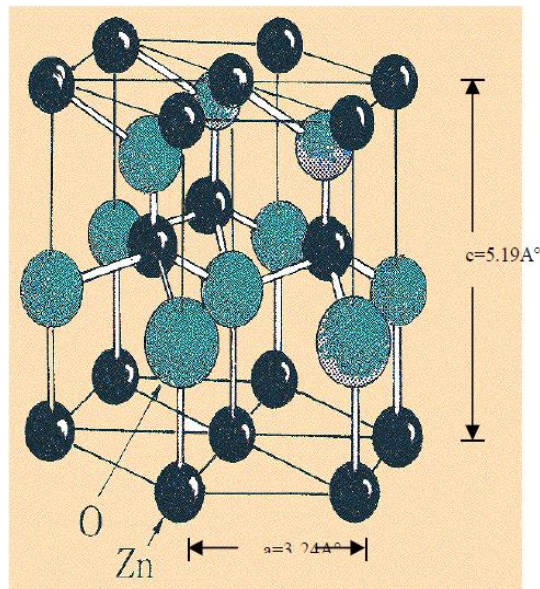


Figure (I-2) : structure cristallographique du ZnO (wurtzite) [14].

La structure Wurtzite est un empilement de doubles couches (Zn et O) compactes selon l'axe [0001] appelé également axe c. Dans cette structure Wurtzite, les paramètres de maille du ZnO sont :

$$a = 3,24 \text{ \AA}$$

$$c = 5,19 \text{ \AA}$$

Chaque atome de zinc (en site tétraédrique) est entouré de quatre atomes d'oxygène et inversement. La coordinance 4 est typique des liaisons covalentes de type  $sp^3$  cependant la liaison O-Zn possède également un caractère fortement ionique en raison de la forte électronégativité de l'atome d'oxygène.

Les films de ZnO ont montré une bonne stabilité chimique aux plasmas d'hydrogène intervenant dans la fabrication des cellules solaires à base de Si-H. Les couches minces de ZnO peuvent également être employées comme fenêtres optiques, dispositifs photovoltaïques, électrodes transparentes, varistors, capteurs de gaz, diodes électroluminescentes et dispositifs laser. La non-toxicité et l'abondance de ZnO sur la terre font de lui un candidat idéal utilisé comme contact électrique transparent pour les cellules solaires en couches minces. Ce matériau est d'une grande importance dans le domaine de l'optoélectronique et de la photovoltaïque. [13].

Comme semi-conducteur, l'oxyde de zinc est étudié depuis 1912, juste après l'invention du transistor. En 1960, les bonnes propriétés piézo-électriques de l'oxyde de zinc ont conduit à la première application électronique en forme de couche mince dans les dispositifs à ondes acoustiques. Un regain d'intérêt pour l'oxyde de zinc en tant que matériau semi-conducteur a conduit à des recherches intenses entre 1950 et 1970. Dans les années 85, les difficultés de doper ZnO en type p (déficit d'électrons) ont ralenti les recherches sur ce matériau [15].

Le regain d'intérêt pour ZnO a eu lieu dans les années 1990 avec la possibilité d'obtenir du ZnO nanométrique et en couches minces. Ainsi, des émissions laser UV ont été observées à température ambiante dans des couches minces à base de ZnO nanostructuré [16].

Depuis, une augmentation considérable du nombre de publications portant sur ZnO a eu lieu (Figure (I-3)) et de nouvelles applications prometteuses ont vu le jour.

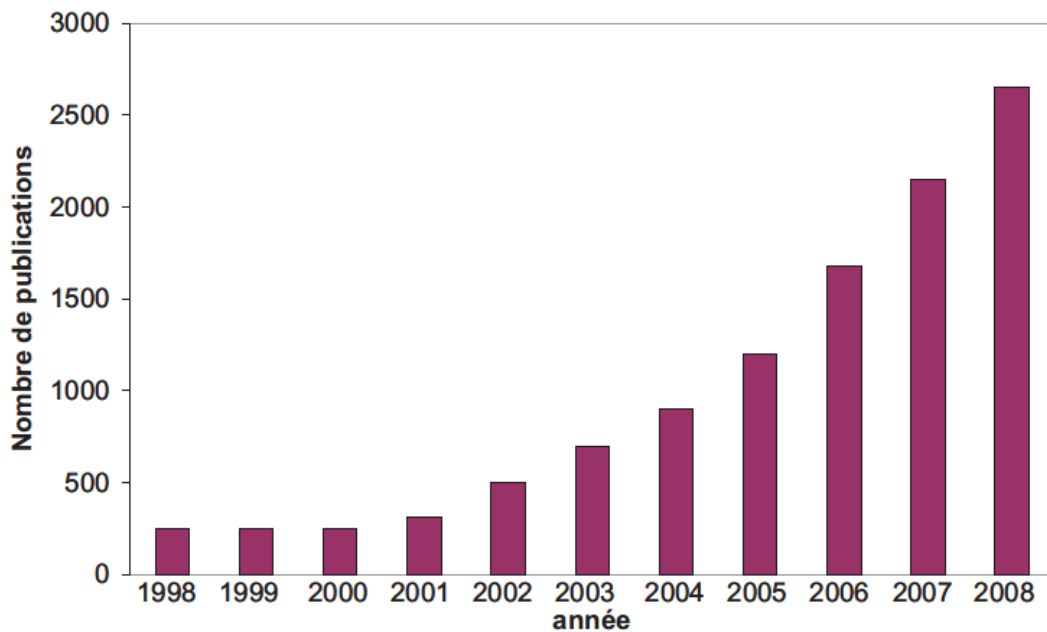


Figure (I-3): Evolution du nombre de publications portant sur « ZnO » d'après ISI Web of Knowledge [17].

### **I-3/Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

Pour créer un courant électrique, il est nécessaire de dissocier les paires électrons-trous photogénérées et de les collecter dans un circuit électrique extérieur avant qu'elles ne se recombinent librement au sein du matériau. La séparation des paires électrons-trous est en général réalisée dans les cellules photovoltaïques par la création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur. Les types de barrières les plus communes sont la monojonction (jonction p/n dans le même semi-conducteur), hétérojonction (jonction p/n entre deux matériaux différents) et barrières Schottky (métal/ semi-conducteur). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un "trou" positif derrière lui. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure (I.4) :

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

- ✓ Dans la zone  $n$  ou  $p$ , les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone  $p$  (pour les trous) ou dans la zone  $n$  (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Les paires électron-trou générées près de la zone de charge d'espace auront la plus grande probabilité d'être collectées.

On aura donc, un photocourant de diffusion ;

- ✓ Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou créés par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région  $n$ , les trous vers la région  $p$ . On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant  $I_{ph}$  ( $I_{ph}$  = photocourant de diffusion + photocourant de génération). C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

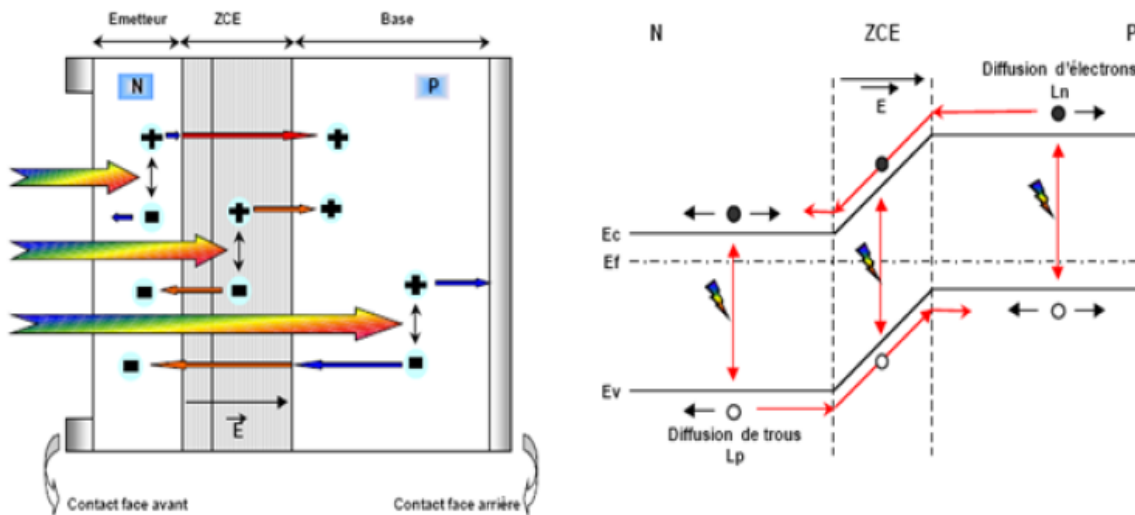


Figure (I-4) : Structure (gauche) et diagramme (droite) de bande d'une cellule photovoltaïque [18].

#### I-4/ Etude de quelques travaux sur la modélisation et simulation de cellules solaires

##### **Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et leur domaine de validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique [19]**

Cet article présente, des techniques de détermination des paramètres de recombinaison et domaine de validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique.

Partant de l'équation de continuité et suivant différents modes d'éclairages (faces avant et arrière, puis simultanément sur les deux faces), nous avons obtenu un certain nombre d'expressions théoriques de la photopile. A partir des études théorique et expérimentale, on déduit trois techniques donnant la longueur de diffusion effective  $L_{eff}$ , les vitesses de

recombinaison intrinsèques à la jonction  $S_{f\alpha}$  et à la face arrière  $S_{b\alpha}$  des porteurs minoritaires de charge pour les différents modes d'éclairement. Une étude des incertitudes sur la détermination de la longueur de diffusion effective a été présentée et elle a montré les limites d'applicabilité de ces techniques de caractérisation des photopiles.

Dans cette étude, un certain nombre d'approximations ont été faites :

- i. L'étude porte exclusivement sur les densités (photo courant, photo tension) des porteurs minoritaires de charge dans la base étant donné que la contribution de l'émetteur est négligeable (épaisseur faible : de l'ordre de  $1\mu\text{m}$ ) par rapport à celle de la base [20] ;
- ii. Seul le champ au niveau de la jonction sera pris en compte car on considère que le champ cristallin qui existe au sein de la base est nul (théorie Q.N.B Quasi Neutral Base) ;
- iii. Le modèle traité est unidimensionnel avec comme origine la jonction de la photopile.

La densité du photocourant due à la diffusion des porteurs minoritaires de charges à travers la jonction est donnée par loi de Fick sous la forme suivante :

$$J_{ph\alpha} = q \cdot D \cdot \left. \frac{\partial \delta_{\alpha}(x)}{\partial x} \right|_{x=d} \quad (I.1)$$

Avec :

$\delta_{\alpha}(x)$  est la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur  $x$  dans la base

$q$  : Charge de l'électron

$D$  : Coefficient de diffusion des porteurs.

D'après la relation (I.1), l'expression de la densité de photocourant devient une fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi, les densités de photocourant  $J_{ph\alpha}$  peuvent être représentées en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_{f\alpha}$  suivant les différents modes d'éclairement (face avant, face arrière et simultanément sur les deux faces) de la photopile.

Pour des vitesses de recombinaison très élevées les densités de photocourant permettent d'obtenir les expressions des densités de courant de court-circuit.

L'étude de la densité de photocourant  $J_{ph\alpha}$ , en fonction de la vitesse de recombinaison  $S_{f\alpha}$  à la jonction, a montré que cette dernière tend vers une valeur constante pour les grandes vitesses



de recombinaison à la jonction  $S_{f\alpha}$ . Et cette valeur de la densité du courant correspond au courant de court-circuit.

On obtient ainsi, les différentes expressions du courant de court-circuit  $J_{cc\alpha}$  en fonction uniquement de la longueur de diffusion L (les autres paramètres D, bi et H étant constants), avec  $S_{b1}$  étant la vitesse de recombinaison en face arrière suivant le mode d'éclairage.

$$J_{cc1} = q.D \sum_{i=1}^3 K_i \cdot \frac{L(Db_i - S_{b1}) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) - (D - b_m L^2 S_{b1}) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) - L(Db_i - S_{b1}) \cdot e^{-b_i H}}{D.L \left(\frac{H}{L}\right) + L^2 S_{b1} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (I.3)$$

$$S_{b1} = D \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{b_i \left[ e^{-b_i H} - \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \right] + \frac{1}{L} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right)}{L.b_i \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + e^{-b_i H} - \cosh\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (I.4)$$

$$J_{cc2} = q.D \sum_{i=1}^3 K_i \cdot \frac{L(Db_i + S_{b2}) - \left[ L(Db_i + S_{b2}) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D + b_m L^2 S_{b2}) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right] e^{-b_i H}}{D.L \left(\frac{H}{L}\right) + L^2 S_{b2} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right)} \quad (I.5)$$

$$S_{b2} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{-L.b_i + \left[ \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L.b_i \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \right] e^{-b_i H}}{1 - \left[ L.b_i \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \right] e^{-b_i H}} \quad (I.6)$$

### Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State [21]

Dans cet article l'étude porte sur l'effet de l'épaisseur de la cellule solaire et la vitesse de recombinaison de surface arrière, à travers la densité de porteurs, la densité de photocourant, la densité de phototension, la puissance, le facteur de remplissage et efficacité de conversion.

La cellule solaire est de type  $n^+ - p - p^+$  et sa structure unidimensionnelle.

L'équation de continuité pour une étude unidimensionnelle à laquelle obéissent ces porteurs minoritaires de charge dans la base à l'abscisse x en régime statique s'annonce comme suit :

$$\frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} - \frac{n(x)}{L_n^2} = -\frac{1}{D_n} \cdot G_n(x) \quad (I.7)$$

Avec :

$n(x)$  est la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base

$L_n$  est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charges dans la base ;

$D_n$  est le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base ;

$L_n$  et  $D_n$  sont liés par la relation d'Einstein par l'expression (I.8) suivante :

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (\text{I.8})$$

$G_n$  : est le taux de génération des porteurs minoritaires.

Le taux de génération  $G_n$  exprimé en fonction de la profondeur  $x$  d'absorption de la lumière dans la base est sous la forme d'une série entière [22] telle qu'elle est exprimée dans l'équation (I.9) suivante :

$$G_n(x) = \sum_{\lambda_0}^{\lambda_g} F_{0\lambda} (1 - r_\lambda) \alpha_\lambda \cdot e^{-\alpha_\lambda x} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$\lambda_0 = 0.3 \mu m$  et  $\lambda_g = 1.2 \mu m$  sont respectivement le minimum et le maximum de la longueur d'onde dans la source polychromatique.

$F_{0\lambda}$  est le flux de photons incidents;

$\alpha_\lambda$  est le coefficient d'absorption monochromatique de la matière;

$r_\lambda$  est le coefficient de réflexion monochromatique à la surface du matériau;

La solution de l'équation de continuité avec la méthode conventionnelle peut être écrite comme suite:

$$n(x) = A \cdot \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x}{L}\right) + \sum_{\lambda=1}^{45} K_\lambda e^{-\alpha_\lambda x} \quad (\text{I.10})$$

Les constantes A et B sont déterminés par les conditions aux limites.

Pour  $S_f$  et  $S_b$  représentent respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charges à la jonction ( $x=0$ ) et à la face arrière ( $x=H$ ) [23,24].

La densité du photocourant due à la diffusion des porteurs minoritaires de charges à travers la jonction est donnée par la loi de Fick sous la forme suivante :

$$J_n(S_f, S_b) = q \cdot D_n \cdot \left. \frac{\partial n(x, S_f, S_b)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$q$  est la charge de l'électron.

Les profils de la densité de photocourant dans la base en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, permet de conclure la présence de trois zones [25]:

- i. Pour l'intervalle  $S_f \leq 10 \text{ cm.s}^{-1}$ , le photocourant est nul. Les porteurs minoritaires sont bloqués et stockés à la jonction. Tout transporteur traverse la jonction: c'est le fonctionnement de circuit ouvert.
- ii. Dans l'intervalle  $10 \text{ cm.s}^{-1} \leq S_f \leq 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$ , la densité de photocourant augmente rapidement.
- iii. Dans l'intervalle  $S_f \geq 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$ , la densité de photocourant devient constante et conserve une valeur maximale correspondant au photocourant de court-circuit.

L'expression de la densité de phototension est donnée par la relation de Boltzmann suivante :

$$V_{ph}(S_f, S_b) = V_T \cdot \ln \left[ \frac{N_B}{n_i^2} n(0, S_f, S_b) + 1 \right] \quad (\text{I.14})$$

Avec :

$$V_T = \frac{k_B \cdot T}{q} \quad (\text{I.15})$$

$V_T$  est la tension thermique a une température donnée,

$q$  est la charge élémentaire,

$k_B$ : est la constante de Boltzmann  $k_B = 1,38.10^{-23} \text{ J / K}$

$N_B$  est le taux de dopage dans la base,

Les profils de la densité de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, montrent la présence de deux zones [25]:

- i. Dans l'intervalle  $S_f \leq 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ , la densité de phototension est constante et correspond à la phototension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ). Les porteurs de charges minoritaires en excès sont bloqués et ne peuvent pas franchir la jonction, leurs accumulations expliquent la valeur maximale de phototension.
- ii. Dans l'intervalle  $S_f \geq 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ , la densité de phototension diminue rapidement pour s'annuler. C'est parce que toutes les porteurs de charges minoritaires en excès vont franchir progressivement la jonction jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de charges: c'est le fonctionnement en court-circuit.

La puissance électrique de sortie est un paramètre essentiel pour une cellule solaire. Cela indique la capacité de la cellule solaire à fournir une électricité à la charge externe. L'énergie électrique produite par la cellule solaire sous éclairage polychromatique constante et pour un point de fonctionnement donné est déterminée par:

$$P = J.V_{ph} \quad (I.16)$$

Avec :  $J = J_{ph} - J_d$

$$J_d = q.n_1.S_{fo} \left( \exp\left(\frac{V_{ph}}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (I.17)$$

$J$  est la densité de photocourant externe,

$J_d$  représente la densité de courant de diode [25], [26].

Et  $n_1 = \frac{n_o}{N_B}$ ,  $n_o$ : densité de porteurs à l'équilibre .

On remarque que pour le profil de puissance donnée on observe que :

Les valeurs les plus faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction c'est-à-dire

$S_f \leq 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ , la puissance tend vers la valeur nulle. En raison de la proximité avec le circuit ouvert, le courant est faible (voire nul), ce qui entraîne un faible pouvoir ou même nul.

Dans l'intervalle  $10^2 \text{ cm.s}^{-1} \leq S_f \leq 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$ , la vitesse de recombinaison de la jonction augmente, la densité de photocourant augmente également entraînant une augmentation de la puissance pour atteindre une valeur maximale correspondant à la puissance maximale.

Alors, pour  $S_f \geq 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$ , il tend vers la condition de court-circuit, puis la puissance tend vers une valeur nulle [25]. Cela provoque alors une diminution de la puissance qui s'annule pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction.

### **Vitesses de recombinaison intrinsèques d'une photopile en régime statique [27,28]**

Les vitesses de recombinaison intrinsèques caractérisant certains phénomènes recombinatoires des porteurs minoritaires en excès au niveau des interfaces et des surfaces des photopiles monofaciale et bifaciale, font l'objet d'études pertinentes afin de contrôler leurs qualités. C'est ainsi, des études ont été menées sur la détermination des expressions des vitesses de recombinaisons en régimes statique en éclairement multispectral.

Le profil des différentes vitesses de recombinaison à la face arrière en fonction du champ électrique de polarisation, montre une diminution des vitesses avec le champ électrique. Ceci

implique que le champ électrique de polarisation améliore le fonctionnement de la photopile car diminuant les recombinaisons des porteurs minoritaires en excès à la face arrière.

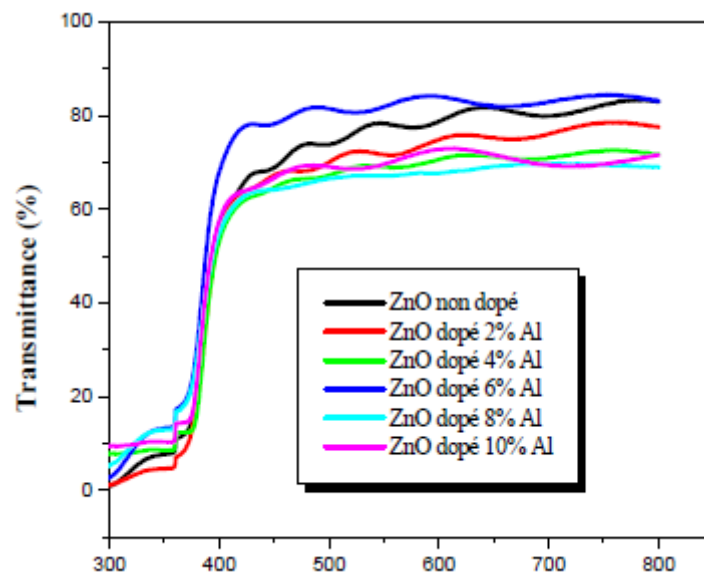
### **Les propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de ZnO: Al élaborées par spray ultrasonique [29]**

Dans ce travail les auteurs présentent les propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de ZnO : Al élaborées par spray ultrasonique.

Ainsi pour atteindre leurs objectifs, ils ont déposées les couches minces de ZnO par la technique spray ultrasonique sur des substrats en verre chauffés à la température fixe 350 °C, en utilisant l'acétate de zinc avec une molarité de 0.1mol/l.

Leur intérêt est porté sur l'étude de l'influence du dopage sur les propriétés structurales, optiques et électriques de ces couches. Pour cela, ils ont utilisé la diffraction des rayons X pour les caractérisations structurales, la spectroscopie de transmission optique UV–Visible pour les caractérisations optiques et la technique de deux pointes pour les caractéristiques électriques des films.

Pour structurer les études, les auteurs ont d'abord établi des propriétés optiques en représentant sur la figure (I.5) les spectres de transmission optique des films ZnO élaborés avec différents taux de dopage en Al. Les mesures ont été effectuées dans le domaine UV-visible, correspondant à la gamme de longueurs d'ondes: 200 - 800 nm.



*Figure (I.5) : Spectres de transmission optique des couches minces de ZnO préparées avec différents dopages en Al [29].*

Comme on peut le voir sur cette figure (I.5), la présence d'une région de forte transparence située entre 400 et 800nm, la valeur de la transmission est de l'ordre de 70 à 85% dans le visible avec une valeur maximale obtenue à 6% d'Aluminium.

La région de forte absorption correspond à l'absorption fondamentale ( $\lambda < 400\text{nm}$ ) dans les films de ZnO, qui est due à la transition électronique inter bande. Cependant, ils ont observé un décalage du seuil d'absorption vers les basses énergies avec l'augmentation du taux de dopage. Ce décalage est dû à l'augmentation de la concentration des porteurs libres dans les matériaux [30]. Ces résultats montrent bien que ce matériau peut être utilisé comme un oxyde transparent dans les cellules solaires.

Ces auteurs ont déduit le gap optique de ces films à partir de la région de chute de la transmittance ( $\sim 400\text{ nm}$ ). Ce dernier est estimé à partir de l'intersection de la courbe donnant  $(\alpha h\nu)^{1/2} = f(h\nu)$  avec l'axe des abscisses [31, 32].

Ils ont rapporté sur la figure (I.6), l'évolution du gap optique de ces films en fonction de dopage. Dans cette figure, le gap des films diminue avec l'augmentation de dopage de 3,4 eV pour ZnO pur jusqu'à 3,1 eV pour ZnO dopé à 10% Al. Ces valeurs du gap optique sont comparables à celles trouvées par A. Ashour et al. [33] et qui varient entre 3,31 eV et 3,21 eV. Cette diminution du gap avec le taux de dopage est essentiellement due aux distorsions provoquées dans le réseau suite à l'introduction d'impureté (dopage) et à l'augmentation de la concentration des électrons libres. Ceci est, éventuellement, le résultat de l'occupation des sites interstitiels par les atomes de dopant car ces derniers, représentent les principaux donneurs natifs dans les films ZnO [34].

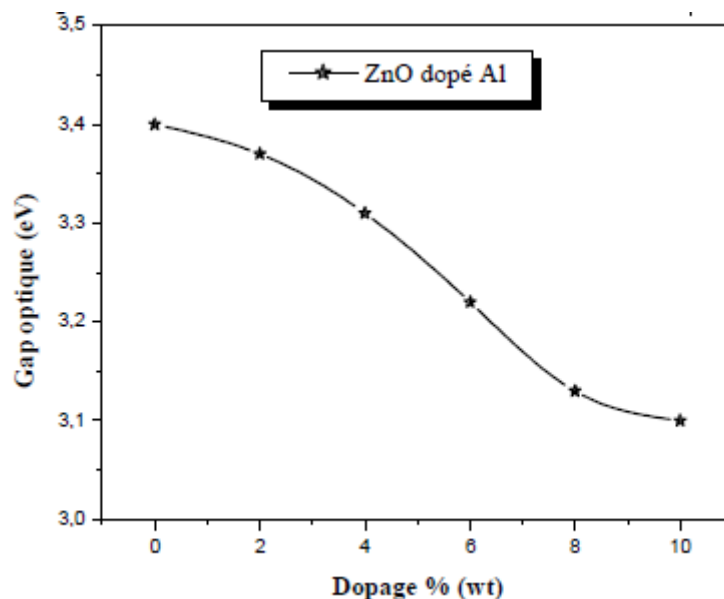


Figure (I.6) : Variation du gap optique en fonction du dopage [34]

Ils ont ensuite établi des propriétés électriques en représentant dans la figure (I.7), l'évolution de la conductivité électrique des films de ZnO: Al en fonction du taux de dopage (Al). On observe que la conductivité des échantillons augmente avec l'accroissement du pourcentage de dopage et atteint sa valeur maximale de  $0,27 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$  pour un dopage de 8% Al, ensuite elle

diminue jusqu'à  $0,15 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ . Cette augmentation de la conductivité avec l'augmentation de la concentration de dopage peut être interprétée par l'augmentation du nombre des porteurs de charge (électrons) provenant des ions donneurs  $\text{Al}^{3+}$  incorporés dans les emplacements substitutionnels ou interstitiels des cations de  $\text{Zn}^{2+}$  [35]. Par contre, la réduction de la conductivité au-delà de 8% Al peut être due à l'apparition d'une phase  $\text{Al}_2\text{O}_3$  qui donne lieu à la formation d'un alliage au lieu d'un dopage [36]. J-H. Lee et al [37] ont trouvé une évolution de la conductivité qui est similaire, avec des valeurs qui sont aussi comparables. Ils ont donné une valeur maximale de  $0,6 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$  pour un dopage de 3% Al. Comme on le constate sur cette même figure, le taux de 8% en Al s'avère un taux optimal pour le dopage du ZnO par l'aluminium à partir du précurseur  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

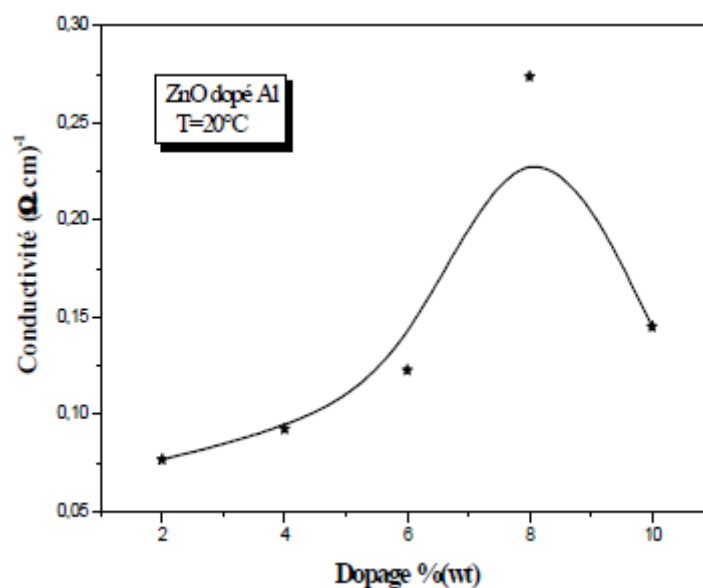


Figure (I.7) : Variation de la conductivité électrique en fonction du dopage [35]

### Généralité sur les taux de génération dans le cas d'un éclairage polychromatique constant [38]

Lorsque la photopile est éclairée par une énergie supérieure à l'énergie de gap du matériau qui le compose, les photons sont absorbés. Ce phénomène d'absorption découlant de la photosensibilité du matériau engendre une rupture des liaisons interatomiques à l'origine des paires électron-trous. On parle alors de photocreation ou photogénération de porteurs caractérisée par le taux de génération. Ce paramètre est fonction de la nature du spectre de lumière envoyée [39] (monochromatique, polychromatique) et donc de la longueur d'onde. Son expression dépend également du mode d'éclairage par la face avant, face arrière ou simultanément. Nous proposons ci-dessous quelques expressions possibles de ce facteur :

➤ Pour un éclairage par la face avant :

$$G(x) = \sum_{i=1}^3 n.a_i e^{-b_i x} \quad (\text{I.19})$$

➤ Pour un éclairage par la face arrière :

$$G(x) = \sum_{i=1}^3 n.b_i e^{-b_i(H-x)} \quad (\text{I.20})$$

➤ Pour un éclairage simultané :

$$G(x) = \sum_{i=1}^3 n.a_i \left( e^{-b_i x} + e^{-b_i(H-x)} \right) \quad (\text{I.21})$$

Où  $n$  appelé nombre de soleil, permet de relier la puissance incidente réelle à une puissance de référence pour un spectre solaire donné. Et les coefficients  $a_i$  et  $b_i$  sont les valeurs tabulées du rayonnement solaire sous AM 1.5 [40]

Le tableau (I.1) suivant indique les valeurs tabulées du rayonnement solaire :

*Tableau (I.1): Valeurs tabulées du rayonnement solaire sous AM 1.5 [40]*

i	1	2	3
$a_i$	$6.13.10^{20}$	$0.54.10^{20}$	$0.0991.10^{20}$
$b_i$	6630	1000	130

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés générales du ZnO et du Silicium polycristallin tel que les propriétés cristallographiques, optiques, électriques, ainsi que leurs multiples applications d'une part. D'autre part, nous avons présenté des études faites pour la détermination des paramètres électriques des cellules solaires. Cette littérature nous a permis de comprendre les différentes méthodes de détermination des paramètres électriques et mécanismes physique d'une photopile sous éclairage multispectral. Dans la suite nous présenterons une étude théorique d'une photopile bifaciale de type ZnO (n<sup>+</sup>) /Si(p)/Si (p<sup>+</sup>) sous éclairage multispectral par la face avant en régime statique.



**CHAPITRE II : MODELISATION DE LA CELLULE  
SOLAIRE DE TYPE ZnO (n<sup>+</sup>) / Si(p) / Si (p<sup>+</sup>) EN  
REGIME STATIQUE SOUS ECLAIREMENT  
MULTISPECTRAL CONSTANT**

## INTRODUCTION

L'intérêt de la conversion photovoltaïque est la production d'énergie. La recherche de l'amélioration du rendement des photopiles a conduit à la fabrication de photopiles bifaciales, présentant une face arrière fortement "dopée" en atomes d'impureté sur une faible épaisseur. Cette zone "surdopée" offre l'avantage de créer un champ électrique qui a pour effet de renvoyer vers la jonction les charges photo générées. L'une des conséquences de l'existence de ce champ électrique est la diminution de la vitesse de recombinaison  $S_b$  des porteurs sur la face arrière. L'éclairement pouvant être faite par la face avant (émetteur), la pénétration des photons peut être limité par la réflexion sur cette face. D'où l'utilité d'utiliser, pour la conception de la cellule solaire, un émetteur à base de substances qui sont de bons absorbants comme le ZnO.

Ainsi, l'utilisation du ZnO a montré ces dernières années un intérêt très important dans le domaine électrique et optoélectronique tel que la réalisation des détecteurs à gaz [41], des émetteurs infra-rouges, mais surtout dans la fabrication des cellules solaires [42] [43].

Dans ce chapitre nous ferons l'étude en modélisation unidimensionnelle d'une photopile bifaciale du type ZnO ( $n^+$ ) / Si(p) / Si ( $p^+$ ) sous éclairement multispectral constant en régime statique. La contribution de l'émetteur est évaluée. Cette étude permettra, après avoir résolu l'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires photocréés (trous ou électrons), de déterminer les paramètres électriques au niveau de l'émetteur d'une part et de la base d'autre part.

### II-1- Présentation de la photopile bifaciale

La photopile bifaciale à hétérojonction que nous étudions est de type ZnO ( $n^+$ ) / Si(p) / Si ( $p^+$ ) comme le montre sa structure présentée à la figure (II.1) ci-dessous

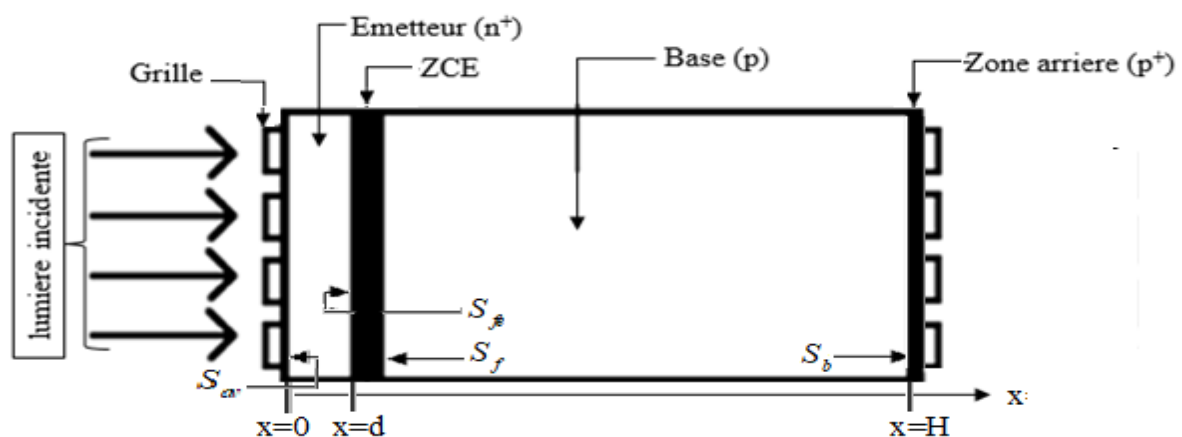


Figure (II.1) : Représentation d'une cellule solaire de type ZnO ( $n^+$ ) / Si(p) / Si ( $p^+$ )

Cette photopile comprend quatre parties :

- Emetteur : zone frontale de type ZnO ( $n^+$ ) de faible épaisseur, qu'on appelle également face avant.
- Base : zone de type Si ( $p$ ) peu dopée où les porteurs minoritaires sont les électrons.
- Zone de charge d'espace (ZCE) qui se trouve entre l'émetteur et la base où règne un champ électrique intense qui permet de séparer les paires électron-trou créées.
- Zone arrière : zone sur dopée Si ( $p^+$ ) située sur la face arrière de la base où un champ électrique de surface (Back Surface Field) [44, 45] renvoie les porteurs photocréés près de la face arrière vers la jonction.

## II-2- Présentation du logiciel

Mathcad est un logiciel permettant de réaliser des calculs scientifiques. Avec son interface bloc-notes unique, le logiciel intègre dans une même feuille de calcul les notations, les textes et graphiques (2D et 3D) mathématiques standard. Il contient des fonctions de calcul numérique et de calcul formel. Puisque Mathcad est un programme de fenêtre, obtenu après avoir exécuté le programme Mathcad. Nous voyons une fenêtre comme montée dans la figure (II-2) suivante :

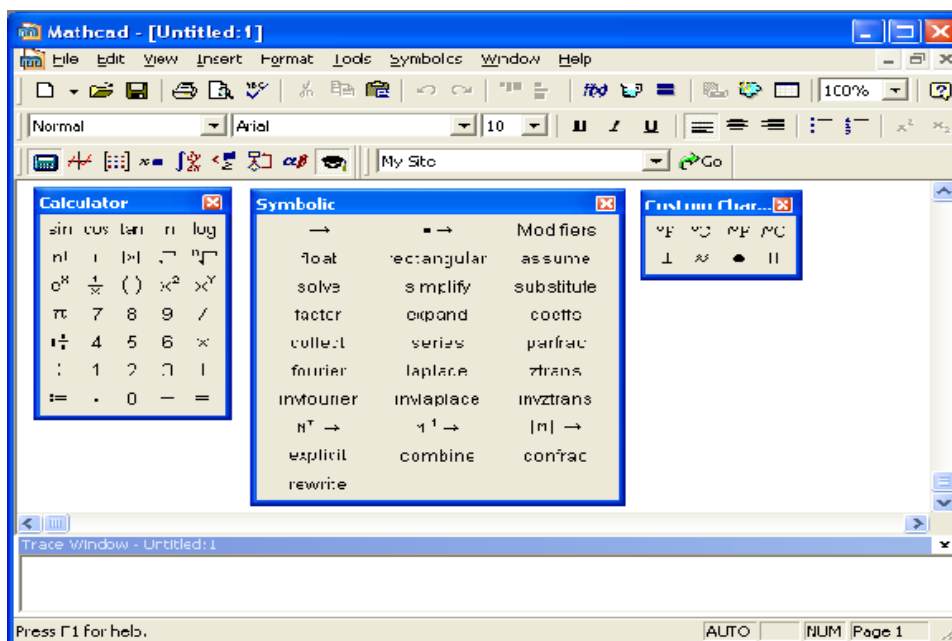


Figure (II-2) : Mathcad avec différentes barres d'outils affichées.

Chaque bouton de la barre d'outils mathématique ouvre une autre barre d'outils d'opérateurs ou de symboles. On peut insérer de nouveaux opérateurs grecs et des graphiques en cliquant sur ces boutons (voir figure (II-3)).

**Bouton**

**Barre d'outils**



**Calculatrice** : operateurs arithmétiques



**Graphique** : 2D, 3D types de trace et outils graphiques



**Matrice** : operateurs matriciels et vectoriels



**Evaluation** : signes égaux pour l'évaluation et la définition



**Calcul** : dérivés, intégrales, limites, itérations, et produits



**Booléen** : operateurs comparatifs et logiques pour l'expression booléenne



**La programmation** : construction de programmation



**Grec** : lettres grecques



**Symbolique** : symboliser les mots-clés et les modificateurs

. Figure (II-3) : Différents boutons de la barre d'outils mathématiques

De plus la barre d'outils standard fournit un accès rapide à de nombreuses commandes de menu (voir figure II-4).



Figure (II-4) : Barre d'outils standard

La barre d'outils de mise en forme contient des listes déroulantes et des boutons pour spécifier les caractéristiques de police pour les équations et le texte (figure II-5).



Figure (II-5) : Barre d'outils de mise en forme

### **II-3- Densité des porteurs minoritaires de charges en excès**

Dans ce paragraphe nous allons faire une étude théorique de la densité des porteurs minoritaires en excès. Lorsque la photopile est éclairée par un flux lumineux incident ( $h\nu > E_g$ ), il y'a création de paires électron-trou. La distribution des porteurs minoritaires photocrées (trous et électrons) dans l'émetteur et dans la base est régie par l'équation de continuité.

#### **II-3-1) Densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans l'émetteur.**

Pour un éclairage convenable par la face avant de la photopile, il se produit de façon simultanée une génération d'exciton (paire électron-trou) à des phénomènes de pertes (recombinaisons) en surface, en volume,

##### **II-3-1-1) Taux de génération**

Lorsqu'une photopile est éclairée par la face avant, elle absorbe les photons incidents d'énergie supérieure à celle du « gap » du matériau semiconducteur qui la constitue. Si la photopile se trouve dans un circuit fermé, l'électron ainsi excité peut passer dans un état énergétique correspondant à la bande de conduction et pourra contribuer à la génération d'un photocourant dès que la paire électron-trou sera séparée à la rencontre du champ électrique qui règne au niveau de la jonction [46].

Sous un éclairage multispectral constant en régime statique par la face avant, le taux de génération des porteurs (trous et électrons) à la profondeur  $x$  dans l'émetteur et la base de notre photopile est donné par l'expression (II.1) :

$$G(x) = n \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-b_i x} \quad (\text{II.1})$$

Les termes de l'équation du taux de génération pour un éclairage par la face avant sont définis comme suit :

$a_i, b_i$ : Coefficients obtenus à travers des valeurs tabulées de l'éclairage solaire.

Pour un éclairage se faisant sous AM 1.5 donné (voir tableau (I.1)) :

$n$  : Nombre de soleil liant la puissance incidente réelle à la puissance de référence pour un spectre solaire donné. Ce terme permet de connaître les conditions d'éclairage de la photopile. Il est défini par l'expression (II.2) :

$$n = \frac{I_{cc_i}}{I_{cc_o}} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$I_{cc_i}$  : le courant de court-circuit correspondant au fonctionnement de la photopile sous un A.M donné ;

$I_{cc_o}$  , le courant (référentiel) de court-circuit mesuré d'un éclairage donné.

Dans le model d'étude on a choisi le nombre de soleil ( $n = 1$ )

### **II-3-1-2) Taux de recombinaison**

La génération des porteurs dans la photopile éclairée s'accompagne de phénomènes de pertes ou recombinaisons en volume, en surface ainsi qu'aux joints de grain.

Pour ce qui est des pertes en volume, le modèle linéaire de Schockley-Read-Hall permet, en faible injection, d'en mesurer la vitesse par la donnée du taux de recombinaison  $R_n$  ( $R_p$ ) en ( $atomes.cm^3 .s^{-1}$ ) des électrons (des trous) :

$$R_n = \frac{\delta_n}{\tau_n} \quad (II.3)$$

$$R_p = \frac{\delta_p}{\tau_p} \quad (II.4)$$

Dans cette équation :

$\delta_n$  est la densité des porteurs minoritaires (électrons) en excès ;

$\delta_p$  est la densité des porteurs minoritaires (trous) en excès ;

$\tau_n$  est la durée de vie des électrons ;

$\tau_p$  est la durée de vie des trous.

### **II-3-1-3) Equation de continuité**

Les porteurs minoritaires de charge générés dans l'émetteur de la photopile (émetteur dopée de type n+) sous l'effet de l'éclairage multispectral sont des trous de charge +q.

En régime statique, sous éclairage multispectral constant, les porteurs minoritaires de charge en excès dans l'émetteur obéissent à une équation différentielle du second ordre avec second membre, dite équation de continuité [47]:

$$\frac{\partial^2 \delta_p(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_p(x)}{\tau_p . D_p} = - \frac{1}{D_p} . G(x) \quad (II.5)$$

Avec :

$$L_p^2 = \tau_p . D_p \quad (II.6)$$

$D_p$  est le coefficient de diffusion donner par l'expression (II.7) suivante :

$$D_p = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \mu_p \quad (\text{II.7})$$

Pour la suite de notre modélisation nous allons utiliser  $\mu_p(\text{ZnO}) = 200 \text{cm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\mu_p(\text{Si}) = 500 \text{cm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  [48]. En exploitant la formule précédente on parvient à trouver  $D_p(\text{Si}) = 13 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $D_p(\text{ZnO}) = 5,172 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$V_T$  est la tension thermique,  $k_B = 1,38.10^{-23} \text{J} / \text{K}$ ,

$q$  est la charge élémentaire,

$k_B$  est la constante de Boltzmann ( $\text{J} / \text{K}$ )

$\tau_p$  est la durée de vie moyenne des trous générés dans l'émetteur ;

$L_p$  est la longueur de diffusion des trous générés dans l'émetteur ;

On obtient

$$\frac{\partial^2 \delta_p(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_p(x)}{L_p^2} = -\frac{1}{D_p} \cdot G(x) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$\delta_p(x)$  est la densité des porteurs minoritaires au niveau de l'émetteur ;

$G(x)$  taux de génération des porteurs de charge sous éclairage multispectral (par la face avant) donner dans l'expression (II.1).

Nous allons faire une résolution de cette équation du second degré avec second membre

L'équation (II.7) a pour solution générale :

$$\delta_p(x) = A \cdot \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) + \sum_{i=1}^3 K_i e^{-b_i x} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$K_i = -\frac{a_i \cdot L_p^2}{D_p (L_p^2 \cdot b_i^2 - 1)} \cdot n \quad (\text{II.10})$$

$$D_p (L_p^2 \cdot b_i^2 - 1) \neq 0 \quad (\text{II.11})$$

Les constantes A et B sont obtenus à partir des conditions aux limites au niveau de l'émetteur.

#### **II-3-1-4) Conditions aux limites**

Au niveau de la face avant de l'émetteur ( $x=0$ ) [49, 50]:

$$D_p \cdot \left. \frac{\partial \delta_p(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = S_{av} \cdot \delta_p(x=0) \quad (\text{II.12})$$

Au niveau de la face arrière de l'émetteur (jonction x=d)

$$D_p \cdot \left. \frac{\partial \delta_p(x)}{\partial x} \right|_{x=d} = -S_{fe} \cdot \delta_p(x=d) \quad (\text{II.13})$$

L'utilisation des conditions aux limites nous permet de donner l'expression des constantes A et B :

$$A = \sum_{i=1}^3 K_i \frac{\left( b_i - \frac{S_{fe}}{D_p} \right) \cdot e^{-b_i d} - \left( \frac{S_{av}}{D_p} + b_i \right) \cdot Z_1}{X_1 + \frac{S_{fe}}{D_p} \cdot Y_1} \quad (\text{II.14})$$

$$B = \frac{L_p \cdot S_{av}}{D_p} \cdot \sum_{i=1}^3 K_i \frac{\left( b_i - \frac{S_{fe}}{D_p} \right) \cdot e^{-b_i d} - \left( \frac{S_{av}}{D_p} + b_i \right) \cdot Z_1 + \left( \frac{D_p b_i}{S_{av}} + 1 \right) \cdot X_1 + \left( \frac{S_{fe}}{D_p} + \frac{S_{fe} b_i}{S_{av}} \right) \cdot Y_1}{X_1 + \frac{S_{fe}}{D_p} \cdot Y_1} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$X_1 = \frac{1}{L_p} \sinh\left(\frac{d}{L_p}\right) + \frac{S_{av}}{D_p} \cosh\left(\frac{d}{L_p}\right) \quad (\text{II.16})$$

$$Y_1 = \cosh\left(\frac{d}{L_p}\right) + \frac{S_{av} \cdot L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{d}{L_p}\right) \quad (\text{II.17})$$

$$Z_1 = \cosh\left(\frac{d}{L_p}\right) + \frac{S_{fe} \cdot L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{d}{L_p}\right) \quad (\text{II.18})$$

### **II-3-2) Densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base.**

En régime statique, sous éclairage multispectral constant, les porteurs minoritaires de charge en excès (électrons) obéissent à une équation différentielle du second ordre avec second membre, dite équation de continuité.

#### **II-3-2-1) Equation de continuité**

Les porteurs minoritaires de charge générés dans la base de la photopile (base dopée de type p) sous l'effet de l'éclairage multispectral sont des électrons de charge  $-q$ .

La densité de ces porteurs qui prend naissance dans la base obéit à l'équation de continuité qui traduit la conservation des charges.



En tenant compte des phénomènes de génération, de recombinaison, de diffusion et de conduction dans la cellule photovoltaïque en fonctionnement en régime statique, l'équation de continuité des porteurs qui sont générés dans la base de la photopile est [47] :

$$\frac{\partial^2 \delta_n(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_n(x)}{L_n^2} = -\frac{1}{D_n} \cdot G(x) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$L_n^2 = \tau_n \cdot D_n \quad (\text{II.20})$$

$$D_n = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \mu_n \quad (\text{II.21})$$

Dans les équations (II.19), (II.20) et (II.21):

$\delta_n(x)$  est la densité des porteurs minoritaires (électrons) au niveau de la base ;

$D_n$  est le coefficient de diffusion des électrons dans la base ;

$\tau_n$  est la durée de vie moyenne des électrons générés dans la base ;

$L_n$  est la longueur de diffusion des électrons générés dans la base ;

$\mu_n$  mobilité des électrons dans le matériau de silicium.

La solution générale de l'équation de continuité (II.19) est de la forme suivante :

$$\delta_n(x) = C \cdot \cosh\left(\frac{x}{L_n}\right) + D \cdot \sinh\left(\frac{x}{L_n}\right) + \sum_{i=1}^3 K_i e^{-b_i x} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$K_i = -\frac{a_i \cdot L_n^2}{D_n (L_n^2 \cdot b_i^2 - 1)} \cdot n \quad (\text{II.23})$$

$$D_n (L_n^2 \cdot b_i^2 - 1) \neq 0 \quad (\text{II.24})$$

Où les constantes C et D sont obtenus à partir des conditions aux limites au niveau de la base.

### **II-3-2-2) Conditions aux limites**

Au niveau de la jonction (x=d) [49, 50, 51]

$$D_n \cdot \left. \frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x} \right|_{x=d} = S_f \cdot \delta_n(x=d) \quad (\text{II.25})$$

Au niveau de la face arrière (x=H) [50, 52, 53,] :

$$D_n \cdot \frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = -S_b \cdot \delta_p(x=H) \quad (\text{II.26})$$

D'après les équations (II.25) et (II.26) nous avons déduit les équations (II.27) et (II.28)

suivantes :

$$C = \sum_{i=1}^3 K_i \frac{(D_n b_i - S_b) e^{-b_i H} \cdot Y_2 - (D_n b_i + S_f) e^{-b_i d} \cdot Z_2}{X_3 \cdot Y_2 - X_2 \cdot Z_2} \quad (\text{II.27})$$

$$D = \sum_{i=1}^3 K_i \frac{(D_n b_i + S_f) e^{-b_i d} \cdot X_3 - (D_n b_i - S_b) e^{-b_i H} \cdot X_2}{X_3 \cdot Y_2 - X_2 \cdot Z_2} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$X_2 = \frac{D_n}{L_n} \sinh\left(\frac{d}{L_n}\right) - S_f \cosh\left(\frac{d}{L_n}\right) \quad (\text{II.29})$$

$$X_3 = \frac{D_n}{L_n} \sinh\left(\frac{H}{L_n}\right) + S_b \cosh\left(\frac{H}{L_n}\right) \quad (\text{II.30})$$

$$Y_2 = \frac{D_n}{L_n} \cosh\left(\frac{d}{L_n}\right) - S_f \sinh\left(\frac{d}{L_n}\right) \quad (\text{II.31})$$

$$Z_2 = \frac{D_n}{L_n} \cosh\left(\frac{H}{L_n}\right) - S_b \sinh\left(\frac{H}{L_n}\right) \quad (\text{II.32})$$

#### **II-4- Etude théorique de la densité de photocourant**

L'absorption de la lumière par la photopile entraîne la création d'excitons dans l'émetteur et dans la base. Cette photopile est un photo-générateur qui débite un courant sous une différence de potentiel créée par l'éclairement solaire.

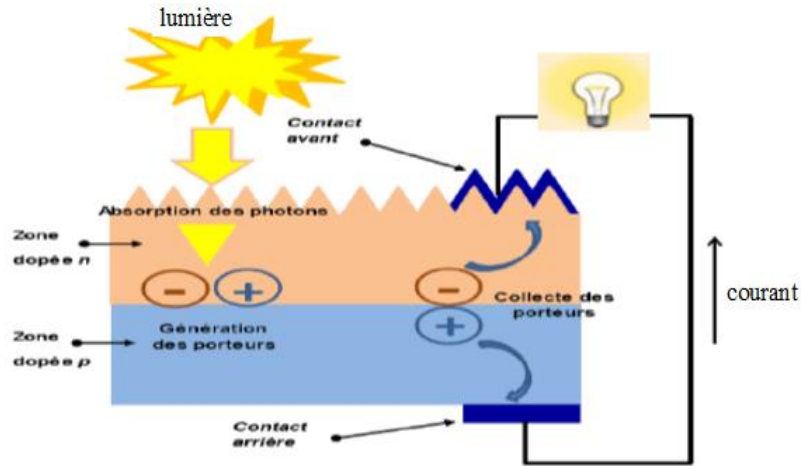


Figure (II-6) : Fonctionnement d'une photopile sous éclairage [54]

#### II-4-1) Etude théorique de la densité de photocourant au niveau de l'émetteur.

Le photocourant de la photopile, est obtenu par le gradient de porteurs minoritaires à la jonction et est donné par l'expression (II.33) [41, 55, 56, 57]

$$J_{ph1} = q \cdot D_p \cdot \left. \frac{\partial \delta_p(x)}{\partial x} \right|_{x=d} \quad (II.33)$$

D'après l'équation (II.33) nous avons déduit l'équation (II.34) suivante :

$$J_{ph1} = -q \cdot S_{fe} \sum_{i=1}^3 K_i \frac{\left[ Y' \cdot e^{-b_i d} + Z'Z \right] \cosh\left(\frac{d}{L_p}\right) + \left[ \frac{S_{av} L_p Y'}{D_p} \cdot e^{-b_i d} + \left( \frac{D_p b_i}{S_{av}} + 1 \right) X + X'Y \right] \sinh\left(\frac{d}{L_p}\right) + \left( X + \frac{S_{fe}}{D_p} Y \right) b_i e^{-b_i d}}{X + \frac{S_{fe}}{D_p} Y} \quad (II.34)$$

Avec :

$$Y' = b_i - \frac{S_{fe}}{D_p} \quad (II.35)$$

$$X' = \frac{S_{fe} b_i}{S_{av}} + \frac{S_{fe}}{D_p} \quad (II.36)$$

$$Z' = \frac{S_{av}}{D_p} + b_i \quad (II.37)$$

#### II-4-2) Etude théorique de la densité de photocourant au niveau de la base.

Le photocourant de la photopile, est obtenu par le gradient de porteurs minoritaires à la jonction et est donné par l'expression (II.38) [55, 56, 57, 58].

$$J_{ph2} = q.D_n \cdot \left. \frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x} \right|_{x=d} \quad (\text{II.38})$$

D'après l'équation (II.38) nous avons déduit l'équation (II-39) suivante :

$$J_{ph2} = q.S_f \sum_{i=1}^3 K_i \frac{(D_n b_i - S_b) e^{-b_i H} . F + (X_3 Y_2 - X_2 Z_2) e^{-b_i H} + (D_n b_i + S_f) e^{-b_i d} . F'}{X_3 Y_2 - X_2 Z_2} \quad (\text{II.39})$$

$$F = Y_2 \cosh\left(\frac{d}{L_n}\right) - X_2 \sinh\left(\frac{d}{L_n}\right) \quad (\text{II.40})$$

$$F' = X_3 \sinh\left(\frac{d}{L_n}\right) - Z_2 \cosh\left(\frac{d}{L_n}\right) \quad (\text{II.41})$$

## **II-5/ Etude théorique de la phototension**

### **II-5-1) Etude théorique de la densité phototension au niveau de l'émetteur.**

Lorsque la photopile est éclairée, il apparaît aux bornes de celle-ci une phototension

$V_{ph1}$  dont l'expression est donnée par la relation de Boltzmann [55, 56, 57, 59]:

$$V_{ph1} = V_T \cdot \ln \left[ \frac{Na}{p_i^2} \delta_p(x=d) + 1 \right] \quad (\text{II.42})$$

Avec :

$$V_T = \frac{k_B \cdot T}{q} \quad (\text{II.43})$$

$V_T$  la tension thermique,  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$ ,

$q$  : est la charge élémentaire,

$k_B$  : est la constante de Boltzmann ( $\text{J / K}$ )

$Na$  : le taux de dopage des impuretés (concentration en donneurs) dans l'émetteur,

$p_i$  la concentration intrinsèque des porteurs dans l'émetteur

D'après l'équation (II.42) nous avons déduit l'équation (II.44) suivante :

$$V_{ph1} = V_T \cdot \ln \left[ \frac{Na}{p_i^2} \sum_{i=1}^3 K_i \frac{(Y' e^{-b_i d} - Z' Z) \cosh\left(\frac{d}{L_p}\right) + (E Y' e^{-b_i d} + E' X + X Y - Z' Z) \sinh\left(\frac{d}{L_p}\right) + \left(X + \frac{S_{fe} Y}{D_p}\right) b_i e^{-b_i d}}{X + \frac{S_{fe} Y}{D_p}} + 1 \right] \quad (\text{II.44})$$

Avec :

$$E = \frac{L_p S_{av}}{D_p} \quad (\text{II.45})$$

$$E' = \frac{D_p b_i}{S_{av}} + 1 \quad (\text{II.46})$$

### II-5-2) Etude théorique de la phototension au niveau de la base

Lorsque la photopile est éclairée, il apparaît aux bornes de celle-ci une phototension

$V_{ph2}$  dont l'expression est donnée par la relation de Boltzmann [55, 56, 57, 59] :

$$V_{ph2} = V_T \cdot \ln \left[ \frac{Nd}{n_i^2} \delta_n(x=d) + 1 \right] \quad (\text{II.47})$$

$Nd$  Le taux de dopage des impuretés (concentration en accepteurs) dans la base,

$n_i$  la concentration intrinsèque des porteurs dans la base

D'après l'équation (II.47) nous avons déduit l'équation (II.48) suivante :

$$V_{ph2} = V_T \cdot \ln \left[ \frac{Nd}{n_i^2} \sum_{i=1}^3 K_i \frac{(He^{-b_i H} Y_2 - H'e^{-b_i d} Z_2) \cosh\left(\frac{d}{L_n}\right) + (HX_3 e^{-b_i d} - HX_2 e^{-b_i H}) \sinh\left(\frac{d}{L_n}\right) + (X_3 Y_2 - X_2 Z_2) b_i e^{-b_i d}}{X_3 Y_2 - X_2 Z_2} + 1 \right] \quad (\text{II.48})$$

$$H = D_n b_i - S_b \quad (\text{II.49})$$

$$H' = D_n b_i - S_f \quad (\text{II.50})$$

### II-6/ Etude théorique du courant de la photopile

Le photocourant de charge est la différence entre le photocourant total de la photopile  $J_{ph}$  et du courant de diode  $J_d$ . [55, 60, 61]

$$I = I_1 + I_2 \quad (\text{II.51})$$

$$I_1 = J_{ph1} - J_{d1} \quad (\text{II.52})$$

$$I_2 = J_{ph2} - J_{d2} \quad (\text{II.53})$$

Avec :

$I_2$  courant de charge de l'émetteur

$I_2$  courant de charge de la base

$J_{d1}$  courant de diode de l'émetteur,

$J_{d2}$  courant de diode de la base

$$J_{d1} = q \cdot S_{fe} \cdot \frac{Na}{p_i^2} \left[ e^{\left(\frac{V_{ph1}}{V_T}\right)} - 1 \right] \quad (\text{II.54})$$

$$J_{d2} = q \cdot S_f \cdot \frac{Nd}{n_i^2} \left[ e^{\left(\frac{V_{ph2}}{V_T}\right)} - 1 \right] \quad (\text{II.55})$$

### **II-7/ Puissance de la photopile**

En général les études des caractéristiques I-V s'intéressent aux paramètres macroscopiques (résistance série, résistance shunt...) [63], [64], [65].

La puissance fournie par la photopile sous éclairage multispectral en régime statique.

L'expression de la puissance électrique recueillie par la charge extérieure est le produit du photocourant qui traverse la charge  $I$  et de la phototension  $V_{ph}$ . L'intensité courant de sortie de la cellule est la différence entre le photocourant de la photopile  $J_{ph}$  et du courant de diode  $J_d$  qui traduit les effets de shunt et qui est caractérisé par la vitesse de recombinaison intrinsèque  $S_f$  [66].

$$P = I \cdot V_{ph} \quad (\text{II.56})$$

### **II-8/ Etude théorique du rendement**

Le rendement de la photopile sous éclairage multispectral en régime statique est donné par l'expression (II.57) suivante [67, 68]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} \quad (\text{II.57})$$

$S_{be}$  Cette expression ci-dessus nous permet d'évaluer le rendement de la photopile (rendement de conversion de la lumière en énergie photovoltaïque). Pour un éclairage, le rendement est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la photopile et la puissance du flux lumineux incident reçu par cette photopile.

### **II-9/ Facteur de forme (FF)**

Le facteur de forme représente la fraction de la puissance perdue dans le matériau semiconducteur soit par effet de résistance soit par phénomènes de recombinaison des porteurs de charge photo générés. Pour un facteur de forme FF tendant vers l'unité, la caractéristique courant-tension (I-V) tend à adopter une forme rectangulaire [69].

Le facteur de forme est donné par la relation (II.59) suivante [67,69] :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.59})$$

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle de structure de notre cellule solaire de type ZnO (n<sup>+</sup>) /Si(p)/Si (p<sup>+</sup>) sous éclairage multispectral par la face avant en régime statique. Par la suite, on a établi une expression de la densité des porteurs minoritaires en excès dans l'émetteur et la base tenant compte des conditions aux limites. Elle a permis de déterminer quelques paramètres électriques tels que : le photocourant, la phototension, le courant électrique, la puissance électrique et le rendement de la photopile.

## **CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION**

### **INTRODUCTION**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de notre travail concernant l'étude en modélisation et simulation de la cellule solaire de type ZnO (n<sup>+</sup>) /Si(p)/Si (p<sup>+</sup>) sous éclairage multispectral constant en régime statique.

Nous commençons d'abord, par une simulation de la densité des porteurs en mettant en exergue l'épaisseur de l'émetteur, la concentration des impuretés, la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur pour mieux comprendre la répartition des porteurs dans l'émetteur.

Ensuite, une étude des recombinaisons des porteurs de charge aux interfaces sera également effectuée afin de déterminer l'influence de ces recombinaisons et de l'épaisseur de l'émetteur sur le photocourant et la phototension. Puis, une étude de la caractéristique I-V de l'émetteur de la photopile est présentée. Une étude comparative du photocourant, de la phototension de



l'émetteur de la photopile pour les deux types de matériaux utilisés de type ZnO ( $n^+$ ) et Si ( $n^+$ ) est aussi présentée.

Enfin, nous examinerons l'influence de l'épaisseur de l'émetteur et les effets des phénomènes d'interface sur la puissance électrique de l'émetteur de la photopile de type ZnO ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ ).

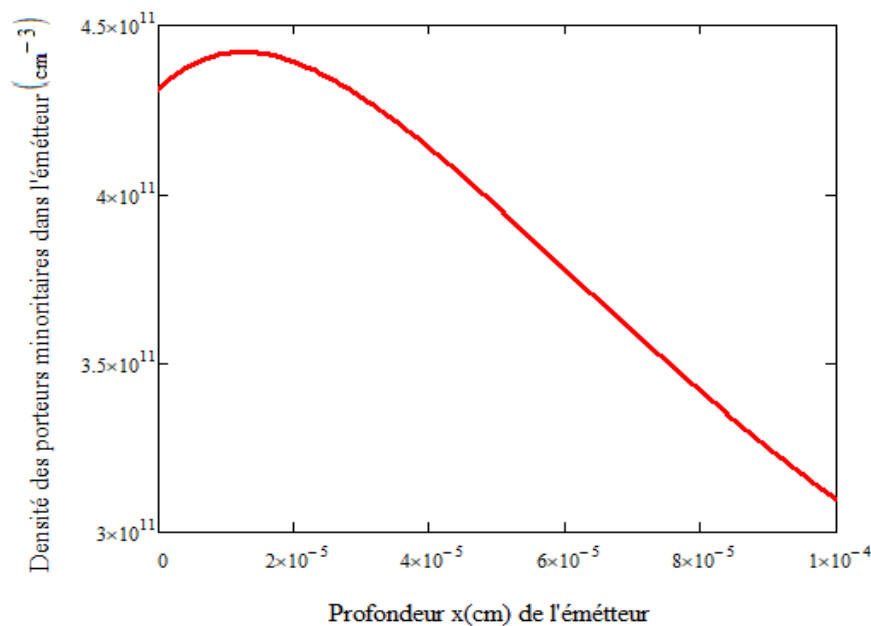
### **III-1/ Densité des porteurs minoritaires en excès**

A l'aide des expressions (II.6) et (II.18) respectivement des densités de porteurs minoritaires en excès (trous et électrons), nous allons étudier leurs profils en fonction de la profondeur de l'émetteur et de la base respectivement. Les courbes de simulation des profils des densités de porteurs minoritaires en excès nous aideront à analyser les mécanismes (paramètres de recombinaisons) qui les gouvernent dans les différentes zones de la photopile.

#### **III-1-1) Densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur de l'émetteur.**

Dans l'émetteur de type ZnO ( $n^+$ ), les porteurs minoritaires sont des trous de charge  $q$ . Nous faisons une étude de la densité des trous générés dans l'émetteur en fonction de la profondeur de l'émetteur de la photopile à l'aide de l'équation (II.9) munie de ses conditions aux limites.

La figure (III.1) représente le profil de la densité des porteurs minoritaires en excès (trous) en fonction de la profondeur de l'émetteur de la photopile, dans le cas d'un éclairage par la face avant.



*Figure (III.1) : Profil de la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur dans l'émetteur  $S_{fe} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $S_{av} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $d = 0,0001 \text{ cm}$*

La figure (III.1) montre que la répartition de la densité des porteurs minoritaires en excès (trous) présente deux régions :

Dans la première région qui est proche de la jonction où le gradient des porteurs est négatif. Les porteurs de charge situés dans cette région peuvent participer à la production du photocourant du fait de la faible épaisseur de l'émetteur. Plus cette région est large plus le courant collecter est important (effet de champ électrique favorable à la collecte de porteurs à la jonction).

Dans la deuxième partie, le gradient des porteurs est positif. Dans cette zone nous avons le maximum de porteurs de charge. Ils interviennent de façon naturelle au courant recueilli.

Pour la suite, il serait important de voir l'influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur sur la densité des porteurs générés en fonction de la profondeur de l'émetteur de la photopile de type ZnO (n<sup>+</sup>)/Si (p)/Si (p<sup>+</sup>).

### **III-1-2) Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la densité des porteurs**

La figure (III.2), représente la variation de la densité des porteurs de charge en fonction de la profondeur de l'émetteur pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur.

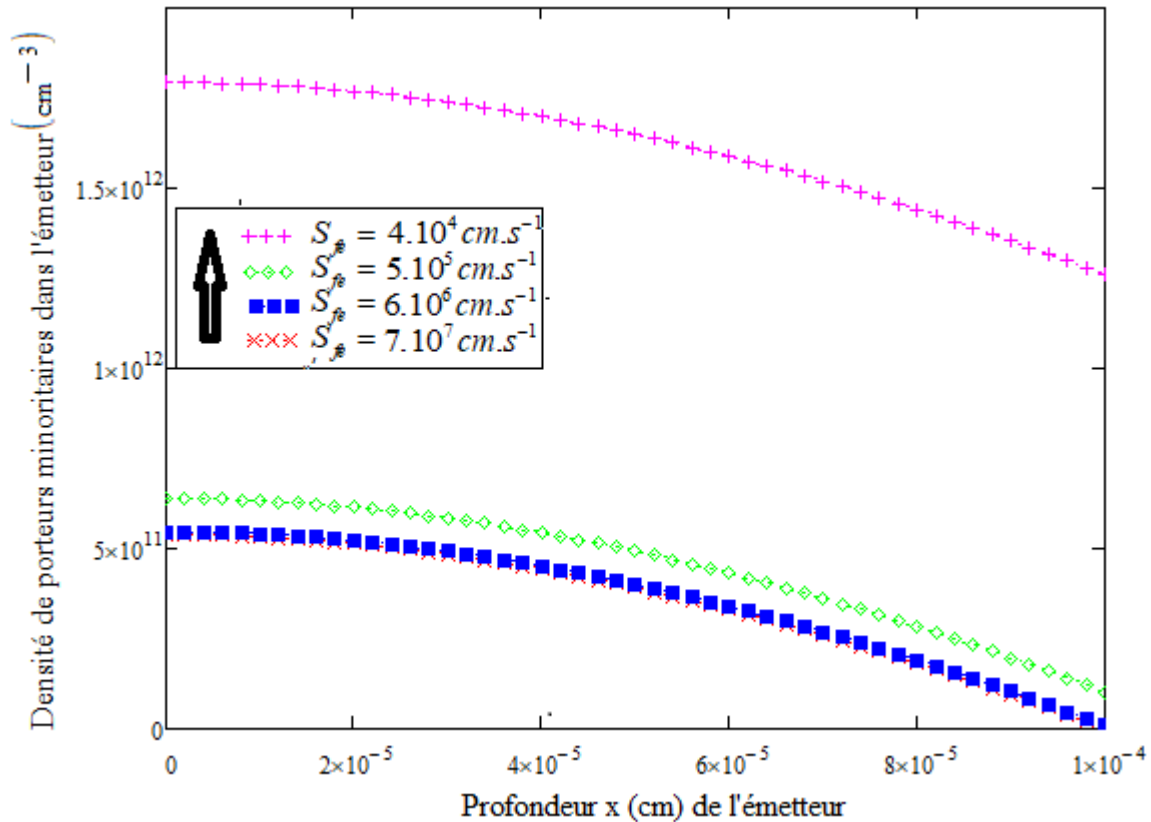


Figure (III.2): Influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur sur la densité de porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de l'émetteur  
 $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $d = 0.0001 \text{ cm}$ ,

On constate que si le point de fonctionnement tend vers le circuit ouvert on a un maximum de porteurs car il y a blocage des porteurs. Alors que plus la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur est grande plus on tend vers le fonctionnement de court-circuit, le maximum de porteurs est libéré ce qui entraîne la diminution de la densité des porteurs.

### III-1-3) Densité des porteurs minoritaires dans l'émetteur pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)

La figure (III.3) ci-dessous correspond au profil de la densité des porteurs minoritaires en excès dans l'émetteur, pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n<sup>+</sup>) dopé à l'Aluminium et Si (n<sup>+</sup>) dopé au phosphore, en fonction de la profondeur de l'émetteur.

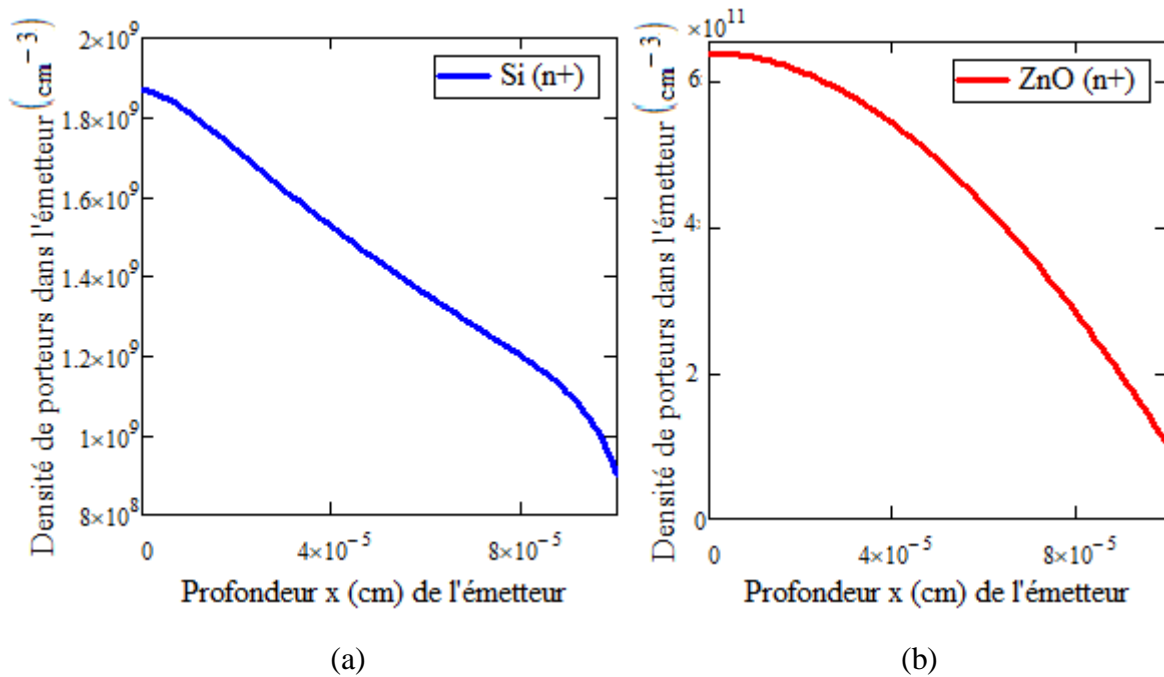


Figure (III-3) : Profil de la densité des porteurs minoritaires en excès dans (a) l'émetteur de type Si (n+) et (b) l'émetteur de type ZnO (n+) en fonction de la profondeur de l'émetteur.

$$S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}, S_{fe} = 5.10^5 \text{ cm.s}^{-1}, d = 0.0001 \text{ cm}$$

Pour les deux matériaux semiconducteurs, l'analyse de ces courbes montre que la densité des porteurs décroît en fonction de la profondeur de l'émetteur. Dans l'émetteur de type ZnO (n+) on parvient à avoir une densité des porteurs qui est plus importante que dans le matériau Si (n+). On parvient à avoir une augmentation très considérable de la densité maximale des porteurs minoritaires en remplaçant le silicium par le ZnO dans l'émetteur. Ce phénomène pourrait être dû au fait que les porteurs de charges s'accumulent plus facilement à l'interface de la jonction de l'émetteur, en termes de différence de mobilité des porteurs de charges dans ces deux types de matériaux. Pour la suite nous allons étudier la densité de photocourant.

### III-2/ Etude de la densité de photocourant

Pour un éclaircissement par la face avant et à partir de l'expression (II.33) de densité de photocourant de l'émetteur, nous allons étudier leurs profils en fonction de  $S_{fe}$  pour de différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur. Les courbes de simulation des profils des densités de photocourant nous aideront à analyser les mécanismes qui les gouvernent dans les différentes zones de la photopile.

### III-2-1) Photocourant de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur

La figure (III.4) représente la variation de la densité de photocourant dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison ( $S_{fe}$ ).

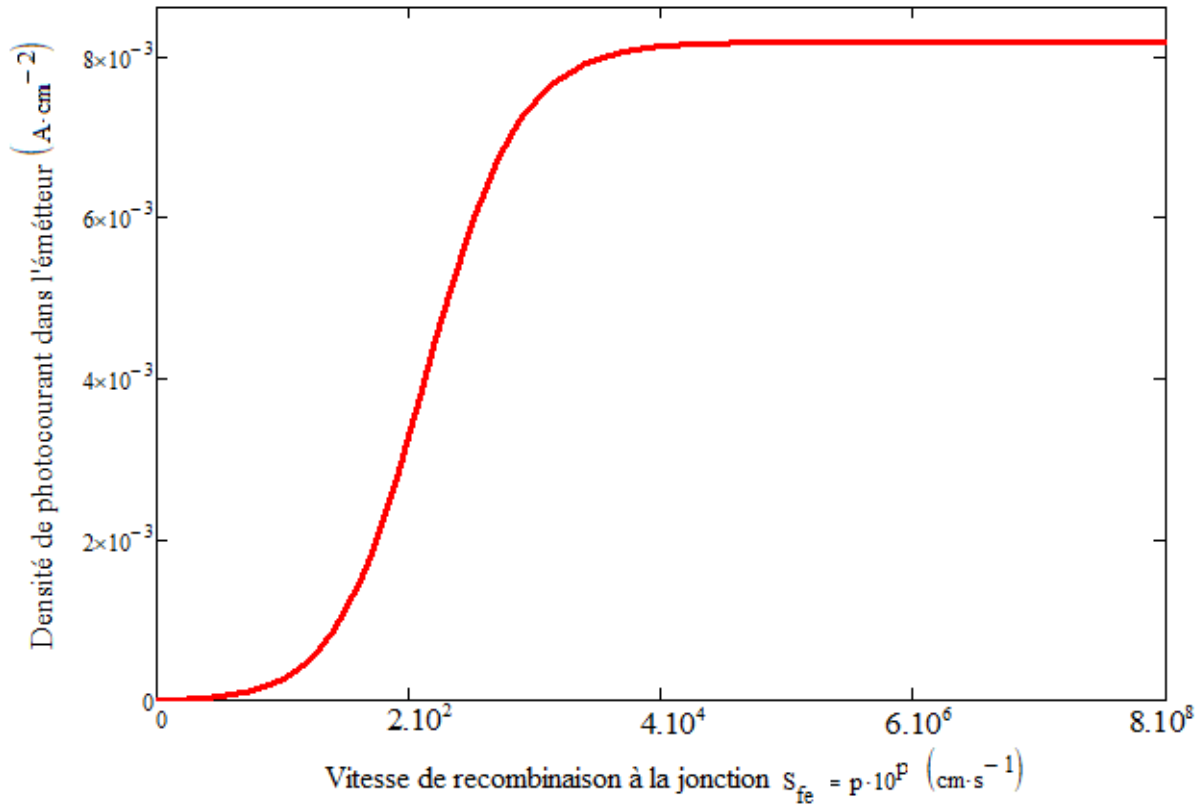


Figure (III-4) : Profil de la densité de photocourant dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison  $S_{fe}$   $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\tau_p = 0,8.10^{-9} \text{ s}$ ,  $d = 0.0001 \text{ cm}$

Dans le figure (III.4), une analyse de la densité de photocourant en fonction de  $S_{fe}$ , montre que pour des faibles valeurs de vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur, la densité de photocourant est pratiquement nulle : ce qui correspond au fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. La densité de photocourant devient constante et maximale pour les valeurs de  $S_{fe}$  très grandes ( $S_{fe} \geq 10^5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Ce palier montre le fonctionnement en générateur de courant de la photopile sous éclaircissement et correspond au courant de court-circuit.

Cette variation de la densité de photocourant en fonction, nous permet d'étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur et la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur sur celle-ci.

### III-2-2) Influence de l'épaisseur de l'émetteur

La figure (III.5) représente le profil de la densité de photocourant dans l'émetteur en fonction de  $S_{fe}$ , pour différentes valeurs de son épaisseur.

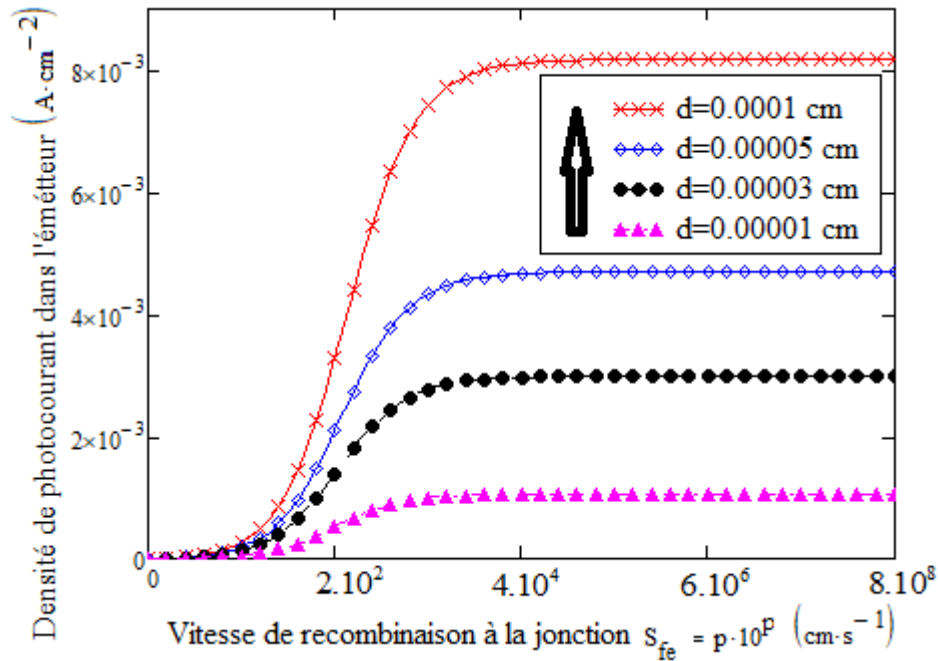


Figure (III-5) : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de photocourant dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur  $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p = 0,8.10^{-9} \text{ s}$

On note que la variation de l'épaisseur de l'émetteur n'a pas d'influence au voisinage du circuit ouvert. Par contre on note une forte influence lorsqu'on est en fonctionnement de court-circuit. On constate que pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur, la densité de photocourant augmente en amplitude quand celles-ci augmente. Lorsque l'épaisseur varie de  $d = 0.00001 \text{ cm}$  à  $d = 0.0001 \text{ cm}$ , le photocourant augmente de 87,9%.

Pour la suite nous allons étudier la phototension.

### III-3/ Phototension

A l'aide de l'expression (II.44) de la phototension de l'émetteur, nous allons étudier la variation de la phototension en fonction de  $S_{fe}$ , l'effet de différentes valeurs du taux de dopage des impuretés et de l'épaisseur de l'émetteur sur cette dernière.

### **III-3-1) Phototension de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur**

La figure (III.6) représente le profil de la phototension dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur ( $S_{fe}$ ).

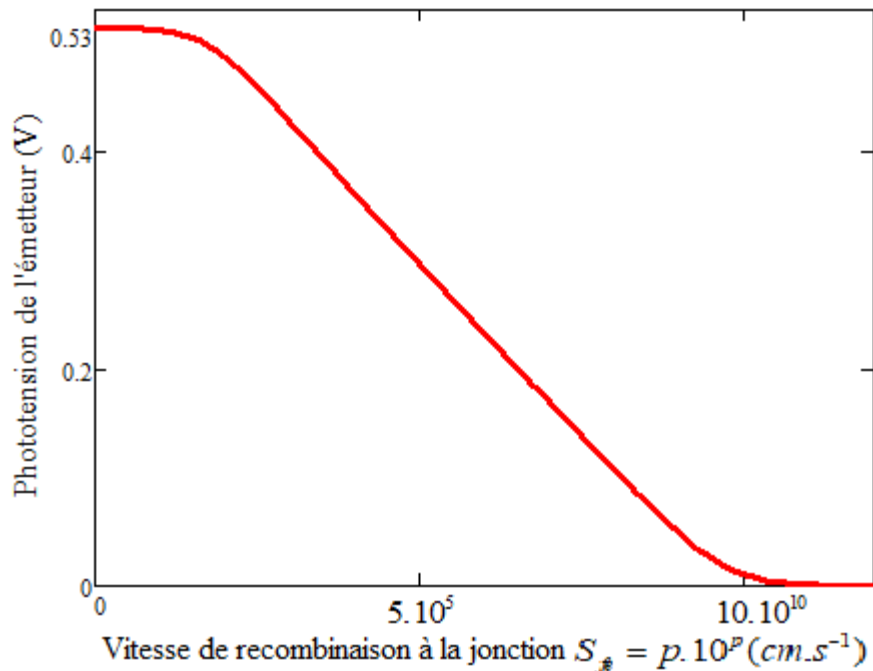


Figure (III-6) : Profil de la phototension dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur,  $S_{av} = 10cm.s^{-1}$ ,  $\tau_p = 10^{-6}s$ ,  $d = 0,0001cm$ ,  $N_a = 10^{22}cm^{-3}$

La figure (III.6) indique que la phototension est maximale pour des points de fonctionnements ( $S_{fe} \leq 2.10^2 cm.s^{-1}$ ). Elle décroît lorsque  $S_{fe}$  augmente. La valeur de la phototension atteinte pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur, qui définit le point de fonctionnement en circuit ouvert, est la tension de circuit ouvert. C'est la tension maximale que peut délivrer la photopile. Aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction à la face arrière de l'émetteur, la tension prend une valeur nulle. En effet, en mode de court-circuit, la photopile ne délivre pas de tension. Par la suite nous allons étudier la variation de la phototension de l'émetteur en fonction de  $S_{fe}$ , pour différents valeurs de l'épaisseur de l'émetteur.

### **III-3-2) Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la phototension de l'émetteur**

Le profil de la phototension dans l'émetteur en fonction de  $S_{fe}$  pour différentes valeurs de profondeur de l'émetteur ( $d$ ), est représenté à la figure (III.7) ci-après.

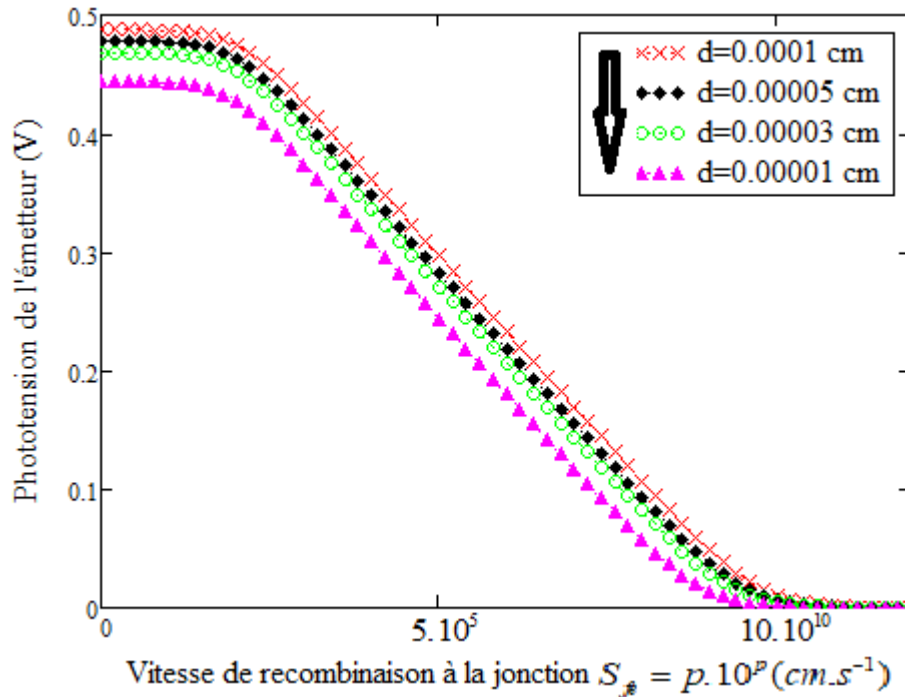


Figure (III-7) : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la phototension de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur,  $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $N_a = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

La figure (III.7) indique le même phénomène que dans la figure précédente pour chaque valeur de  $d$ . Lorsque l'épaisseur varie de  $d = 0.00001 \text{ cm}$  à  $d = 0.0001 \text{ cm}$ , on a une augmentation de 3% de la tension de circuit ouvert. Par contre la variation de l'épaisseur de l'émetteur n'a pas d'influence au voisinage du point de fonctionnement de grande valeurs de  $S_{je}$  c'est à dire au court-circuit.

La variation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne l'augmentation des porteurs de charges photocrées. Le phénomène qui se produit est le stockage des porteurs de charges à la face avant de l'émetteur.

### III-3-3) Influence du taux de dopage des impuretés sur la phototension de l'émetteur

En pratique, on utilise souvent pour l'émetteur un dopage élevé pour avoir une bonne semi conductivité. Les taux de dopage obtenus peuvent être très élevés (de l'ordre de  $10^{20}$  atomes/ $\text{cm}^3$ ), permettant d'atteindre des résistivités très faibles (de l'ordre de  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ) [70]. En général, la grande conductivité des couches d'oxydes pures est due à la forte concentration en porteurs (électrons), étant donné que la mobilité est affectée avec le dopage.



Pour un éclairage par la face avant le profil de la phototension de l'émetteur en fonction de  $S_{je}$  pour différentes valeurs du taux de dopage des impuretés, est représentée à la figure (III.8) ci-après.

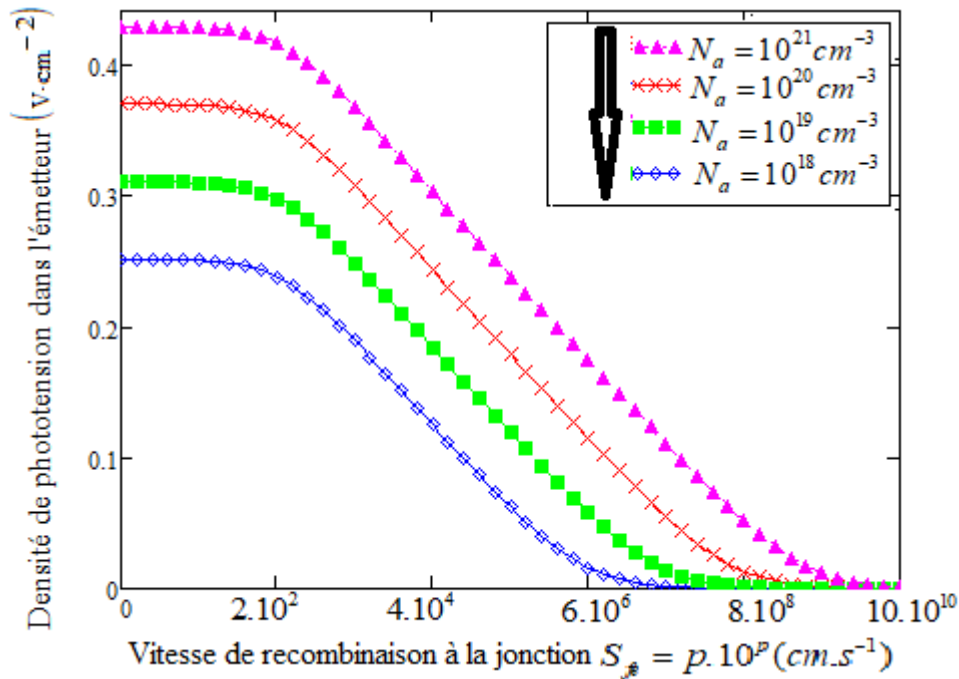


Figure (III-8) : Influence du taux de dopage des impuretés sur la phototension dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur  $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p(\text{ZnO}) = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $d = 10^{-4} \text{ cm}$

La figure (III.8) montre que la valeur de la phototension est maximale lorsque la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur est faible ( $S_{je} \leq 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ) quel que soit le taux de dopage.

Lorsque le taux de dopage en impureté varie de  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  à  $N_a = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  on a une augmentation de 41,1% de la tension de circuit ouvert. Par contre la variation du taux de dopage n'a pas d'influence au voisinage de court-circuit.

Pour optimiser la phototension de la cellule, il va falloir utiliser un taux de dopage très élevé.

### III-4/ Comparaison des structures de cellules ZnO (n<sup>+</sup>)/Si(p)/Si (p<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)/Si(p)/Si (p<sup>+</sup>)

#### III-4-1) Photocourant dans l'émetteur pour les matériaux de type ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)

La figure (III.9) ci-dessous correspond au profil de photocourant dans l'émetteur, pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n<sup>+</sup>) dopé à l'Aluminium et Si (n<sup>+</sup>) dopé au phosphore, en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur.

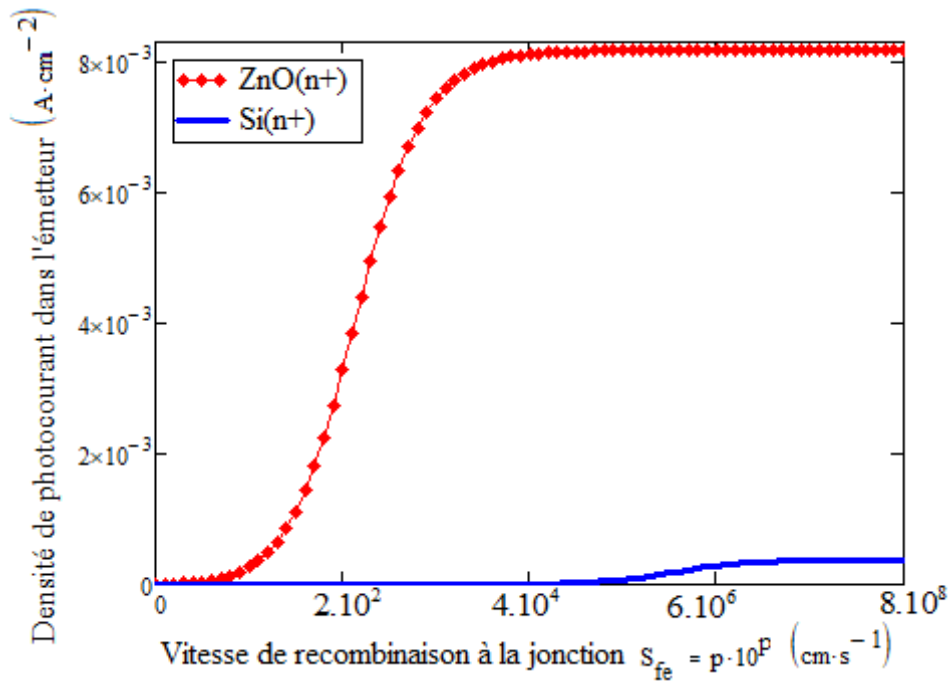


Figure (III-9) : Profil du photocourant dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>),  $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p(\text{ZnO}) = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $\tau_p(\text{Si}) = 0,8.10^{-9} \text{ s}$ ,  $d = 0.0001 \text{ cm}$

On note que, lors que  $S_{fe}$  croît le point de fonctionnement en court-circuit est atteint plus rapidement avec ZnO (n<sup>+</sup>) qu'avec le Si (n<sup>+</sup>). Le fonctionnement en court-circuit de ZnO (n<sup>+</sup>) est atteint dès la valeur  $S_{fe} \geq 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$  alors que pour le Si (n<sup>+</sup>) la valeur est  $S_{fe} \geq 7.10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ . Nous notons aussi que la plage du point de fonctionnement en circuit ouvert est beaucoup plus vaste pour Si (n<sup>+</sup>) le comparé au ZnO (n<sup>+</sup>).

Quel que soit le point de fonctionnement en dehors du circuit-ouvert, le courant obtenu est plus important avec le ZnO. On note une augmentation de 95,8% de courant de court-circuit de l'émetteur de type ZnO (n<sup>+</sup>) par rapport à celui de l'émetteur de type Si (n<sup>+</sup>).

Pour la suite nous allons étudier le photocourant totale des deux types de photopiles ZnO (n<sup>+</sup>)/Si (p)/Si (p<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)/Si (p)/Si (p<sup>+</sup>).

### III-4-2) Photocourant des cellules de type ZnO (n<sup>+</sup>)/Si(p)/Si (p<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)/Si(p)/Si (p<sup>+</sup>)

Pour comparer le photocourant fourni par les deux photopiles pour différents point de fonctionnement on considèrera que pour un point de fonctionnement donné  $S_{fe} = S_f$ . La variation de ce photocourant total en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour ces types de cellules est représentée à la figure (III-10) suivante :

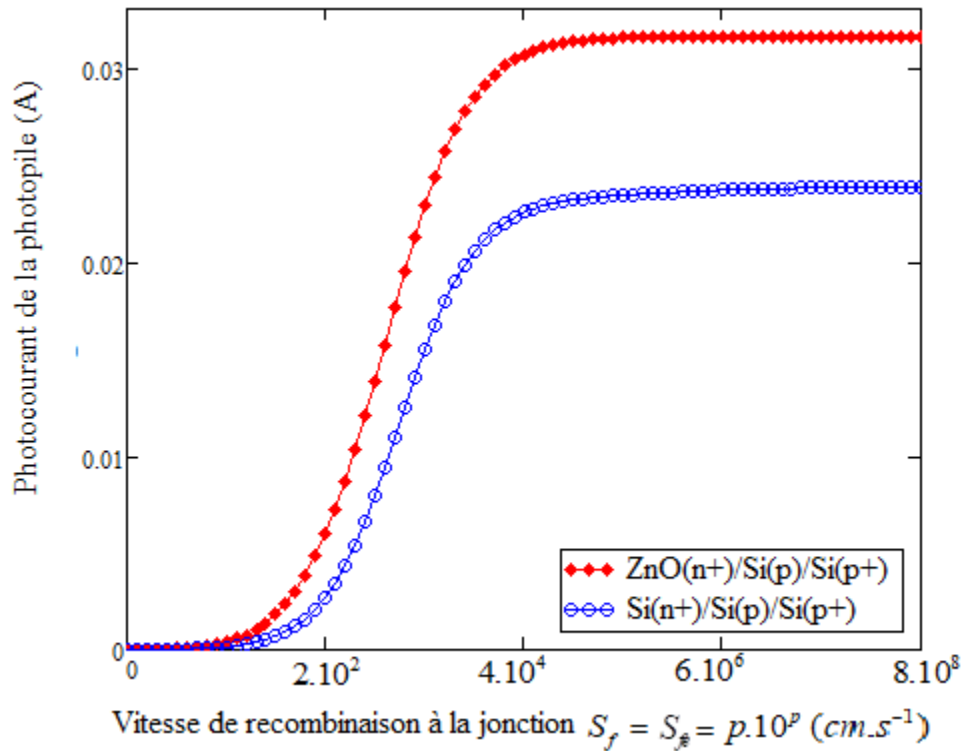


Figure (III-10): Profil de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour ces deux type de cellules  $ZnO$  ( $n^+$ )/ $Si$  ( $p$ )/ $Si$  ( $p^+$ ) et  $Si$  ( $n^+$ )/ $Si$  ( $p$ )/ $Si$  ( $p^+$ ),  $S_b = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p(ZnO) = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $\tau_p(Si) = 0,8.10^{-9} \text{ s}$ ,  $d = 0.0001 \text{ cm}$

La figure (III.10) indique que, pour les deux type de cellules  $ZnO$  ( $n^+$ )/ $Si$  ( $p$ )/ $Si$  ( $p^+$ ) et  $Si$  ( $n^+$ )/ $Si$  ( $p$ )/ $Si$  ( $p^+$ ), le photocourant croit progressivement avec la vitesse de recombinaison à la jonction, c'est à dire quand le point de fonctionnement passe du circuit ouvert au court-circuit.

Pour les grandes valeurs de vitesse de recombinaison à la jonction, le point de fonctionnement en court-circuit est atteint plus rapidement avec la photopile de type  $ZnO$  ( $n^+$ )/ $Si$  ( $p$ )/ $Si$  ( $p^+$ ). Le courant de court-circuit global augmente de 24,7% de la photopile  $Si$  ( $n^+$ )/ $Si$  ( $p$ )/ $Si$  ( $p^+$ ) à la photopile  $ZnO$  ( $n^+$ )/ $Si$  ( $p$ )/ $Si$  ( $p^+$ ).

Cette différence de photocourant, dans le cas de court-circuit, s'explique par le fait que la densité des porteurs minoritaires traversant la jonction est plus importante dans la cellule à hétérojonction due à la différence de coefficient de diffusion des porteurs que celle à monojonction [71].

Pour la suite on fera une étude de la phototension de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour les deux types de matériaux utilisés.

### III-4-3) Phototension dans l'émetteur pour les matériaux de type ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)

L'étude comparative de la phototension dans l'émetteur pour les deux types de substrats (ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)) va nous permettre à comprendre le phénomène de stockage des porteurs de charge dans l'émetteur selon le substrat utilisé.

Pour un éclairage par la face avant, nous étudierons l'influence de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur sur la tension délivrée par l'émetteur de la photopile.

La figure (III.11) ci-dessous correspond au profil de la phototension dans l'émetteur, pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n<sup>+</sup>) dopé à l'Aluminium et Si (n<sup>+</sup>) dopé au phosphore, en fonction de  $S_{je}$ .

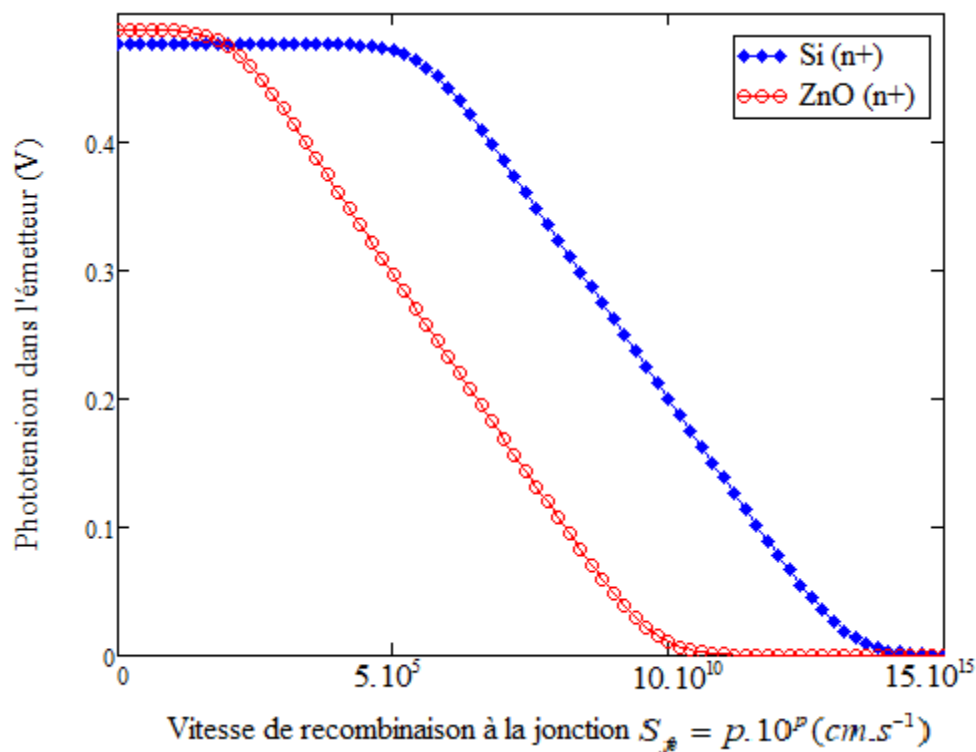


Figure (III-11) : Profil de la phototension dans l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur pour les matériaux semiconducteurs ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>),  $S_{av} = 2 \cdot 10^2 cm \cdot s^{-1}$ ,  $D_p(ZnO) = 5.172 cm^2 \cdot s^{-1}$ ,  $D_p(Si) = 13 cm^2 \cdot s^{-1}$

La figure (III.11) nous confirme que la plage de fonctionnement en circuit ouvert est plus large pour le Si (n<sup>+</sup>) comparé au ZnO (n<sup>+</sup>). Pour le point de fonctionnement en circuit ouvert, la phototension de circuit ouvert de l'émetteur conçu avec du ZnO est légèrement plus élevée comparé à l'émetteur conçu avec du Si. La tension de circuit ouvert augmente de 2,1% du Si (n<sup>+</sup>) au ZnO (n<sup>+</sup>).

Dans le paragraphe suivant nous allons étudier la caractéristique courant-tension.

### III-5/ Caractéristique courant-tension

Pour les études du photocourant et de la phototension délivrés par une cellule solaire de type  $\text{ZnO} (n^+)/\text{Si} (p) /\text{Si} (p^+)$  sous éclairage multispectral en régime statique sont fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi pour un éclairage par la face avant, on peut relier ces deux paramètres macroscopiques avec le paramètre phénoménologique (vitesse de recombinaison à la jonction). Nous étudions dans ce paragraphe les caractéristiques I-V de la photopile de type  $\text{ZnO} (n^+)/\text{Si} (p) /\text{Si} (p^+)$ .

#### III-5-1) Caractéristique courant-tension de l'émetteur

Pour un éclairage par la face avant, la caractéristique courant-tension de l'émetteur de la photopile peut être obtenue en liant le photocourant et la phototension de l'émetteur par le paramètre phénoménologique commun qui est la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur ( $S_{fe}$ ).

La figure (III.12) représente le profil de la caractéristique courant-tension de l'émetteur de type  $\text{ZnO} (n^+)$ .

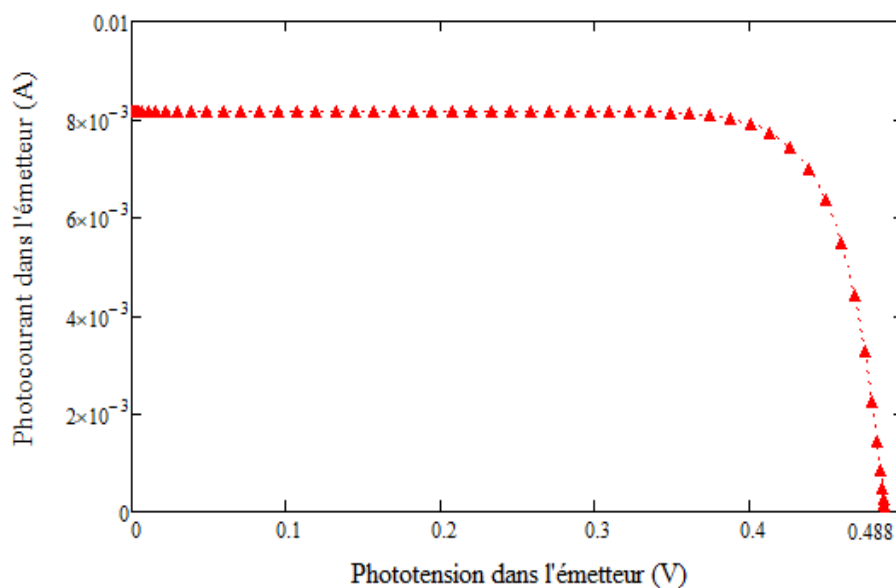


Figure (III-12) : Profil de la caractéristique courant-tension dans l'émetteur de matériau  $\text{ZnO} (n^+)$ .  $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $d = 0.0001 \text{ cm}$

La figure (III.12) montre que lorsque la tension délivrée par l'émetteur de type  $\text{ZnO} (n^+)$ , le courant est maximal : c'est le cas du fonctionnement en court-circuit de l'émetteur de la

photopile. Inversement, lorsque la tension délivrée par l'émetteur est maximale, le courant est minimal : ceci est le cas du fonctionnement en circuit ouvert de l'émetteur de la photopile. Pour la suite, on peut faire une simulation de la caractéristique courant-tension de l'émetteur pour différents valeurs de l'épaisseur de l'émetteur de type  $ZnO (n^+)$ .

### **III-5-2) Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique courant-tension de l'émetteur.**

La figure (III.13) représente le profil de la caractéristique courant-tension de l'émetteur pour différents valeurs de l'épaisseur de l'émetteur.

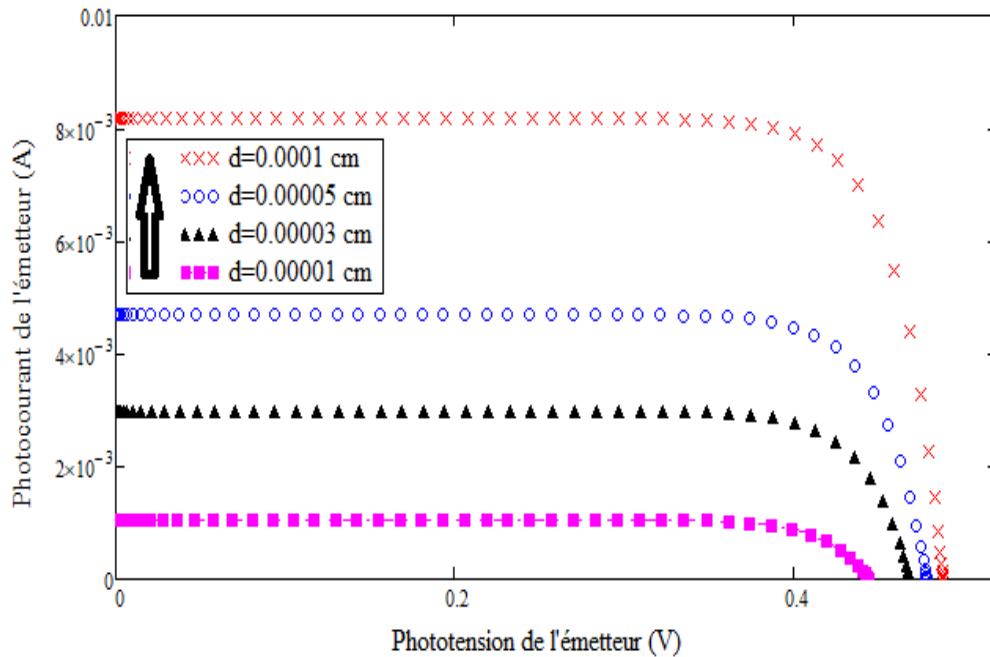


Figure (III.13) : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique courant-tension de l'émetteur  $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $\tau_p(ZnO) = 10^{-6} \text{ s}$ ,  $d = 0,0001 \text{ cm}$

On note que la variation de l'épaisseur de l'émetteur a une forte influence sur le courant de court-circuit par contre une petite influence sur la tension de circuit ouvert. Lorsque l'épaisseur varie de  $d = 0.00001 \text{ cm}$  à  $d = 0.0001 \text{ cm}$  le courant de court-circuit augmente de 87,5% d'une part et de 4,5% de la tension de circuit ouvert. Donc le photocourant reste plus sensible que phototension face à la variation de l'épaisseur de l'émetteur.

Par ailleurs, on peut faire une étude comparative des caractéristiques courant-tension dans l'émetteur pour les matériaux  $ZnO (n^+)$  et  $Si (n^+)$  dans le cas d'un éclairage multispectral.

### III-5-3) Caractéristique courant-tension de l'émetteur pour les matériaux ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)

La caractéristique courant-tension de l'émetteur de la photopile pour les matériaux ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>) peut être obtenue en liant le courant et la tension de l'émetteur par le paramètre phénoménologique commun qui est la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur ( $S_{fe}$ ).

La figure (III.14) représente le profil de la caractéristique courant-tension dans l'émetteur pour les deux type de matériaux utilise (ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)).

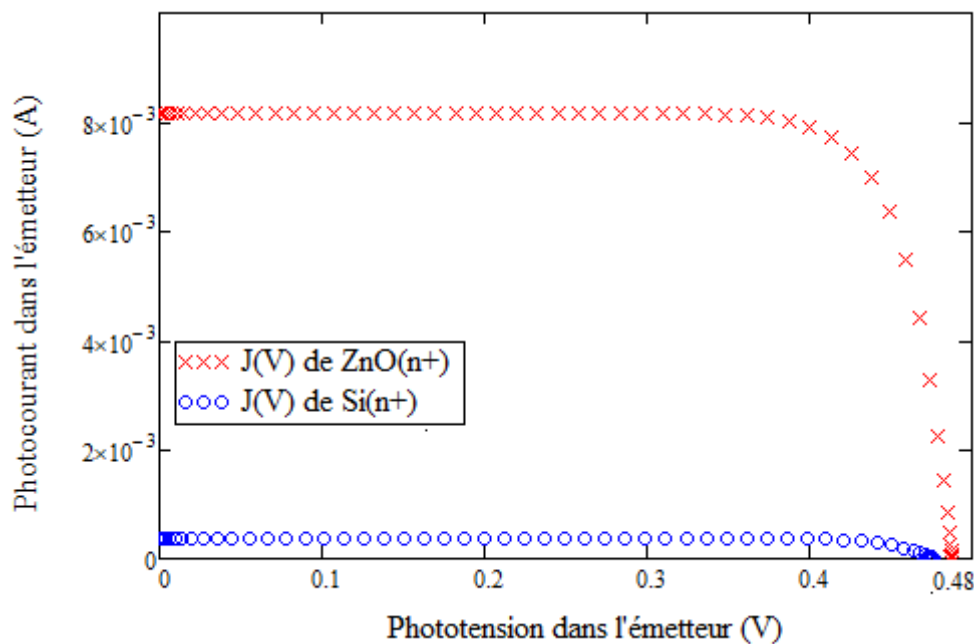


Figure (III-14) : Profil de la caractéristique courant-tension de l'émetteur des matériaux ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>).  $S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $d = 0,0001 \text{ cm}$

On constate que dans la figure (III.14), la tension de circuit ouvert augmente de 2,1% et aussi on note une augmentation de 95,3% du courant de court-circuit du Si (n<sup>+</sup>) au ZnO (n<sup>+</sup>).

Dans le paragraphe suivant on fera une étude de la puissance.

### III-6/ Puissance électrique

#### III-6-1) Puissance de l'émetteur de type ZnO (n<sup>+</sup>) en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

La figure (III.15) représente le profil de la puissance électrique dans l'émetteur de type ZnO (n<sup>+</sup>) en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction de l'émetteur.

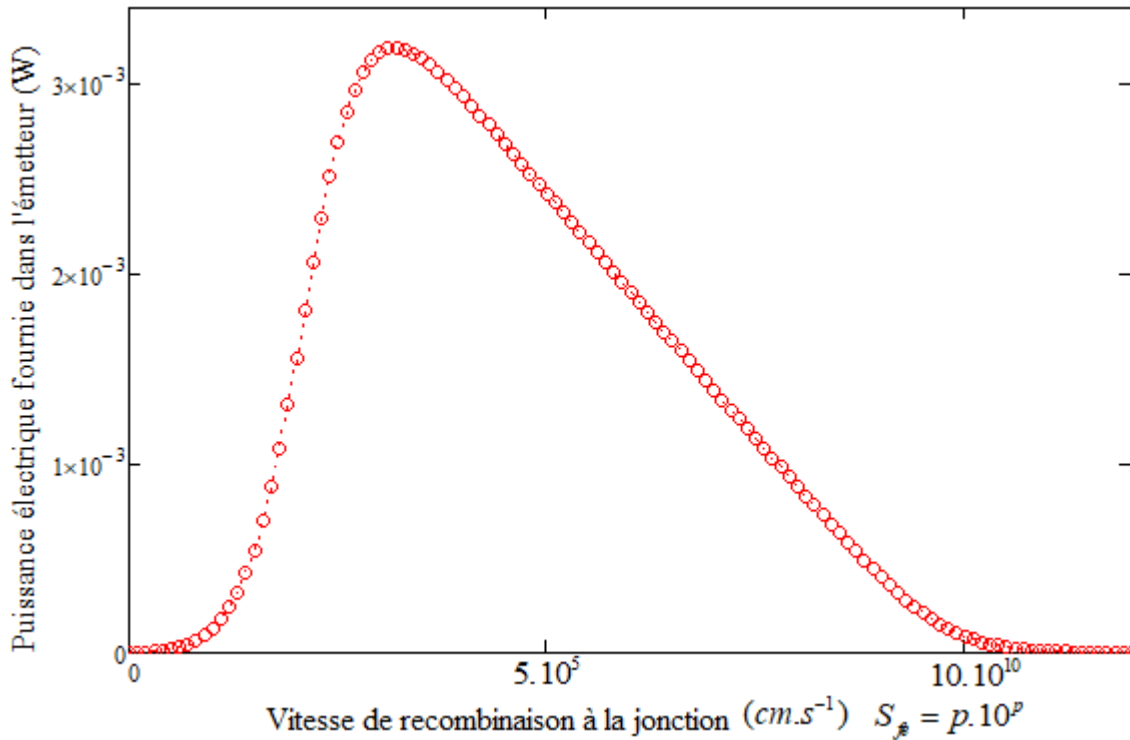


Figure (III-15): Profil de la puissance électrique dans l'émetteur de type ZnO ( $n^+$ ) en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur.

$$S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}, d = 0,0001 \text{ cm}$$

La figure (III.15) montre que pour la puissance électrique fournie par l'émetteur de type ZnO ( $n^+$ ) présente trois régions :

- Pour  $S_{fe} < 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$  ; en raison de la proximité avec le circuit ouvert, le photocourant est faible voir nul ce qui entraîne une puissance qui tend vers la valeur nulle.
- Pour  $10^2 \leq S_{fe} \leq 5.10^5 \text{ cm.s}^{-1}$  ; l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur entraîne, une augmentation de courant et également une augmentation de la puissance pour atteindre une valeur maximale ( $P_{\max} = 0,0031 \text{ W}$ ) correspondant à la puissance maximale. Cette puissance maximale correspond donc à une vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur optimale ( $S_{fe} = 3,2.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ ).
- Pour  $S_{fe} \geq 5.10^5 \text{ cm.s}^{-1}$  ; pour un point de fonctionnement de court-circuit, la tension tend vers une valeur nulle [72]. Cela provoque alors une diminution de la puissance qui s'annule pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $S_{fe} \geq 10^{10} \text{ cm.s}^{-1}$ ).



### III-6-2) Puissance de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur pour les deux types de matériaux ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>)

La figure (III.16) représente le profil de la puissance électrique de l'émetteur pour les deux types de matériaux ZnO (n<sup>+</sup>) Si (n<sup>+</sup>) en fonction de  $S_{fe}$ .

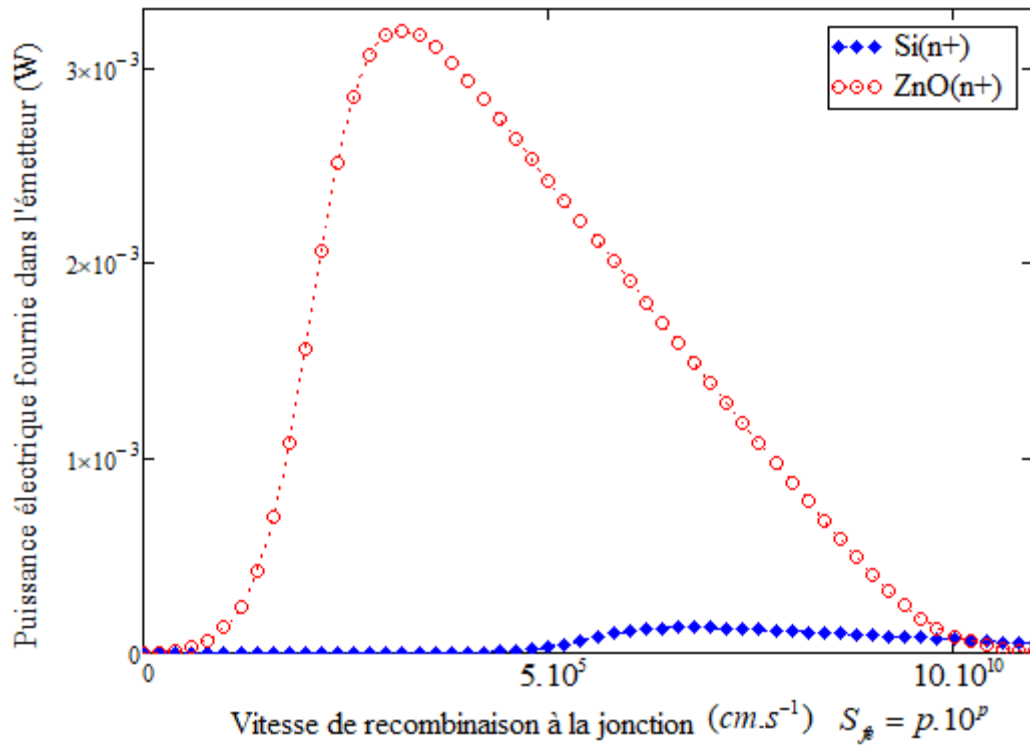


Figure (III-16): Profil de la puissance électrique dans l'émetteur pour les deux types de matériaux ZnO (n<sup>+</sup>) et Si (n<sup>+</sup>) en fonction de la vitesse de recombinaison de l'émetteur.

$$S_{av} = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}, d = 0,0001 \text{ cm}$$

Nous observons sur cette figure le même phénomène que précédemment. On note pour le ZnO (n<sup>+</sup>) la puissance maximale est atteinte dès la valeur de  $S_{fe} = 3,2.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$  alors que pour le Si (n<sup>+</sup>)  $S_{fe} = 6,8.10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ . L'augmentation de la puissance maximale dans le matériau Si (n<sup>+</sup>) au ZnO (n<sup>+</sup>) est de 95,4%.

### III-6-3) Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la puissance électrique de l'émetteur

La figure (III.17) représente le profil de la puissance électrique dans l'émetteur de type ZnO (n<sup>+</sup>) pour différents valeurs de l'épaisseur de l'émetteur en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur.

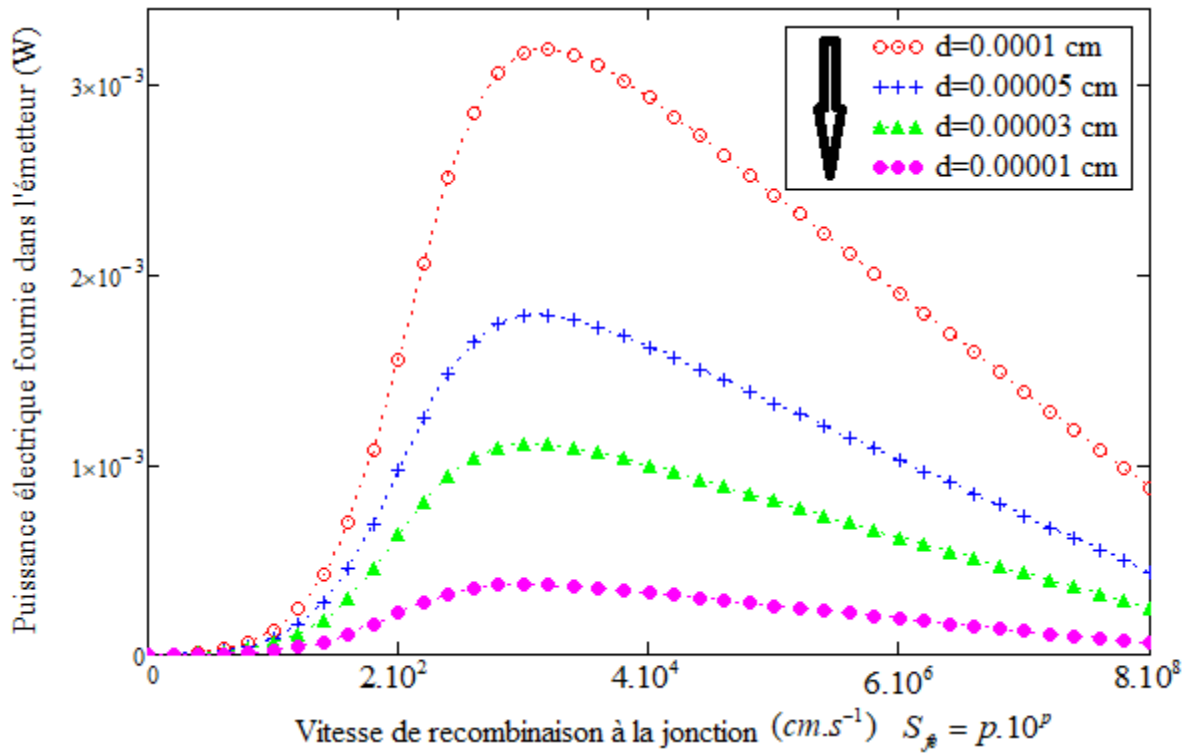


Figure (III-17): Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la puissance de l'émetteur de type ZnO (n+) en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur.

$$S_{av} = 2 \cdot 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$$

On note que la variation de l'épaisseur de l'émetteur n'a pas d'influence sur la puissance au voisinage du circuit ouvert. Par contre on note qu'elle a une forte influence sur la puissance maximale en dehors du circuit-ouvert. Ce point de fonctionnement pour lequel la puissance est maximale se déplace vers le court-circuit lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente.

On constate que pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur, la puissance maximale augmente en amplitude quand celles-ci augmentent. Lorsque l'épaisseur varie de  $d = 0,00001 \text{ cm}$  à  $d = 0,0001 \text{ cm}$ , la puissance maximale augmente de 88,4%.

### III-6-4) Comparaison des paramètres électriques

Dans cette partie nous présentons l'influence des paramètres optimisés sur les caractéristiques électriques de la photopile. Pour comparer les caractéristiques électriques fournies par les deux photopiles pour différents points de fonctionnement on considèrera la phototension au niveau de la base. Les figures (III.18) et (III.19) représentent les caractéristiques  $P(V_{ph})$  et  $I_{ph}(V_{ph})$  en fonction de la phototension de la photopile de type ZnO (n+)/Si(p)/Si (p+) et Si (n+)/Si(p)/Si (p+) respectivement.

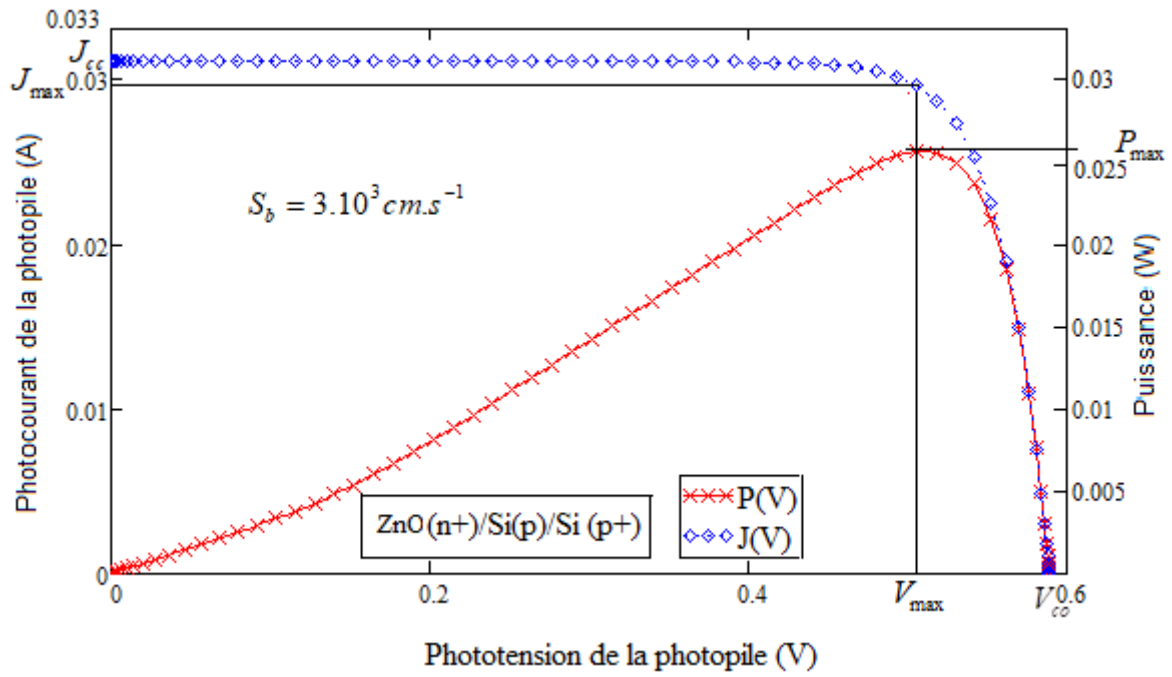


Figure (III-18): Profils de  $P(V)$  et  $J(V)$  en fonction de la phototension de la photopile de type ZnO (n+)/Si (p)/Si (p+).

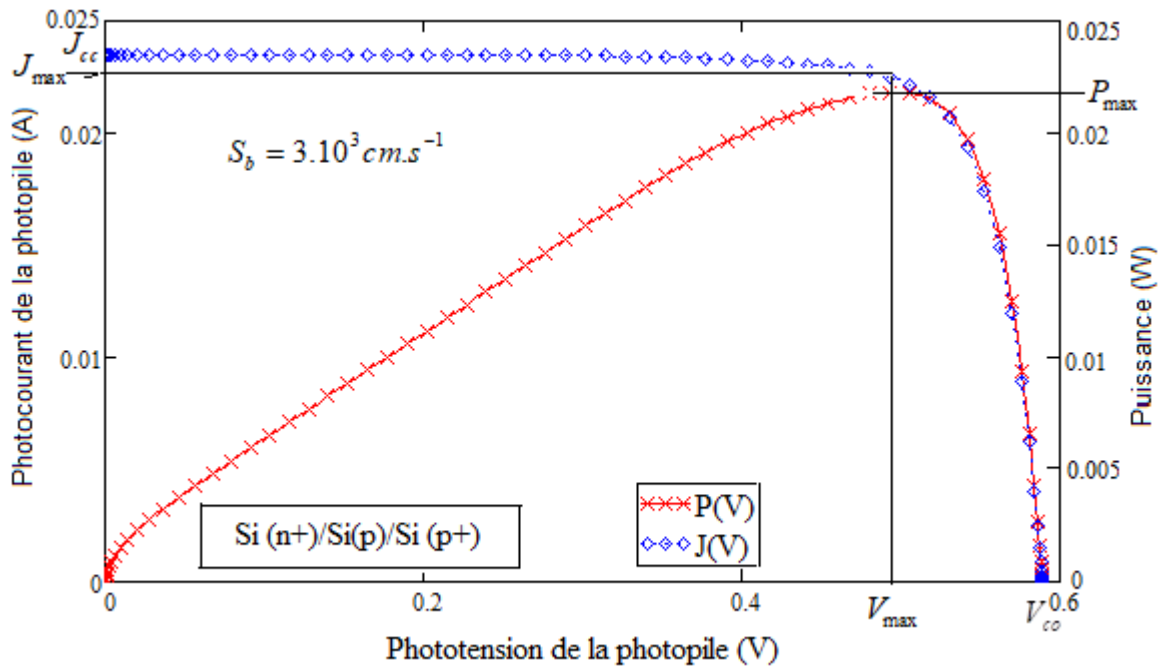


Figure (III-19): Profils de  $P(V)$  et  $J(V)$  en fonction de la phototension de la photopile de type Si (n+)/Si (p)/Si (p+).

Pour un éclairage par la face avant, la simulation des deux photopiles de type ZnO ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ ) et Si ( $n^+$ )/Si(p)/Si ( $p^+$ ) nous a permis d'avoir les paramètres de sorties qui sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau (III.1): Paramètres de sorties des photopiles de type ZnO ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ ) et Si ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ )

Photopile	Jcc(A)	Vco(V)	Jmax(A)	Vmax(V)	Pmax(W)	$\eta$ (%)	FF(%)
ZnO ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ )	0,0310	0,5888	0,0295	0,5057	0,0255	25,5	81,7
Si ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ )	0,0234	0,5888	0,0225	0,4930	0,0218	21,8	80,5

On constate que dans ce tableau, les paramètres de sorties pour les deux photopiles le rendement de la photopile de type ZnO ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ ) est meilleur que celle de Si ( $n^+$ )/Si (p)/Si ( $p^+$ ), avec une augmentation de rendement de 3,7% de notre photopile par rapport à la photopile constituée de matériau Silicium seulement.

## CONCLUSION

Ce chapitre a fait l'objet de détermination des paramètres électriques de la cellule photovoltaïque. Les profils obtenus ont permis de décrire la variation de quelques grandeurs électriques que sont le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert d'une part et de faire une comparaison des paramètres électriques entre une cellule de type ZnO ( $n^+$ )/Si(p)/Si ( $p^+$ ) et celle de type Si ( $n^+$ )/Si(p)/Si ( $p^+$ ) d'autre part. Pour un éclairage par la face avant de la photopile, on a le maximum de la densité des porteurs de charges pour le fonctionnement en circuit ouvert de notre photopile.

L'étude a également montré qu'une augmentation de l'épaisseur de l'émetteur de  $d = 0,00001cm$  à  $d = 0,0001cm$  on a une augmentation de 87,5% du photocourant de court-circuit et une augmentation de 4,5% de la tension de circuit ouvert.

La variation du taux de dopage en impureté a une influence sur la tension de circuit ouvert. Par contre elle n'a pas d'influence au voisinage de court-circuit. L'étude a montré que l'émetteur ZnO ( $n^+$ ) doit être fortement dopée pour une utilisation en PV.

L'étude de la puissance dans l'émetteur, montre que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur à une forte influence sur la puissance maximale. La diminution de l'épaisseur de l'émetteur entraîne le déplacement de la puissance maximale vers le point de fonctionnement de circuit ouvert de l'émetteur de la photopile.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Dans ce travail, nous avons présenté une étude en modélisation et simulation d'une cellule solaire de type  $ZnO (n+)/Si(p)/Si (p+)$  sous éclairage multispectral en régime statique sur les paramètres de recombinaisons, les paramètres électriques de la photopile. Après avoir présenté les généralités sur les matériaux de  $ZnO$  et du Silicium polycristallin, nous avons présenté des études faites sur les différentes méthodes de détermination des paramètres électriques et électroniques d'une photopile. La densité des porteurs minoritaires des charges est obtenue par la résolution de l'équation différentielle de second ordre avec second membre dite équation de continuité. De cette expression de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès, les expressions des densités de photocourant et de la phototension des différentes parties (émetteur et base) de la photopile, ont été établies.

L'influence de l'épaisseur de l'émetteur, et du taux de dopage en donneurs dans l'émetteur sur la densité de phototension est aussi mise en exergue. Egalement, l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière de l'émetteur, a été étudiée.

L'étude effectuée sur la photopile de type  $ZnO (n+)/ Si (p)/Si (p+)$  en régime statique sous éclairage multispectral nous a permis de comparer quantitativement la part contributive de la base et de l'émetteur au photocourant global. Il en est ressorti que, malgré la faible épaisseur de l'émetteur, le photocourant global n'est pas produit par la base de la photopile uniquement. La contribution de l'émetteur au photocourant est considérable donc non négligeable. Ce qui n'est pas lorsqu'on remplace le  $ZnO$  par le  $Si$ , c'est-à-dire pour une cellule en silicium, de même dimension.

Une étude comparative de la densité de porteurs minoritaires en excès (trous), des densités de photocourant et de phototension dans des matériaux de types  $ZnO (n+)$  et de  $Si (n+)$  d'une part et des densités de porteurs minoritaires des charges en excès, de photocourant des différentes photopile de types  $ZnO (n+)/Si(p)/Si(p+)$  et  $Si(n+)/Si(p)/Si(p+)$  permet de voir qu'il est plus intéressant d'utiliser le  $ZnO$  comme matériau de l'émetteur.

Il serait intéressant pour la suite de tenir compte de l'éclairage par la face arrière et des deux faces simultanément pour voir l'effet de l'épaisseur de l'émetteur de la photopile également faire une étude en régime transitoire. Mais aussi de faire une étude sous éclairage monochromatique.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

- [1] H. REEVES, “*Mal de terre, science ouverte*”, Edition seuil, (Mars 2003).
- [2] N. ZIANI, “*Effet de l'épaisseur de la couche antireflet à base d'un TCO sur les cellules solaires à hétérojonction à base de silicium*”, mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, tizi-ouzou, (2013), pp. 2, 3, 4.
- [3] Allem HOCINE, “*Etude de l'influence de la couche d'oxyde interfaciale sur les paramètres d'une cellule solaire à conversion photovoltaïque de type MIS*”, mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, tizi-ouzou, (2009), pp. 12, 23, 34.
- [4] M.A GREEN et al., “*Solar cell Efficiency Tables (version 28)*”, Progress in Photovoltaics: Research and applications, Vol 14 (2006) pp.455-461.
- [6] Hosni.MONGI, “*Optimisation du procédé Pyrol pour la synthèse de nanoparticules d'oxyde de Zinc : Mise à l'échelle du procédé et Applications Photovoltaïques*”, Thèse en cotutelle de l'université Paris 13-Sorbonne Paris cite Institut Galilée, (2014).
- [7] J.W. ORTOM, P. BLOOD, “*The electrical characterization of semiconductors: measurement of minority carrier properties*”, Solid-State Physics, Book 13, November (1990), pp 253-45-25.
- [8] E. D. STOKES, L.CHU, Appl.Phys.Lett. Vol.30, 8 (1977), pp 425-426.
- [9] M.K.ALAMAND, Y.T.YEOW, Solid. State.Elect. Vol. 24, n°12(1981), pp 11-17-19
- [10] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Procédé\\_de\\_Czochralski](https://fr.wikipedia.org/wiki/Procédé_de_Czochralski).
- [11] Paul A. LYNN, John WILEY & Sons “*Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*”, Hardcover, (2010).
- [12] V.SRIKANT, D.R. CLARKE, “*On the optical band gap of zinc oxide*”, Journal of Applied Physics, 83, 10, (1998), pp. 5447-5451.
- [13] Bouhalouane AMRANI, “*Elaboration et caractérisation de couches minces piézoélectrique d'oxyde de zinc obtenue par pulvérisation cathodique pour les applications SAW*”, thèse de magister, université de la science et de la technologie d'Oran, (2003).
- [14] K. L. CHOPRA. S. MAJOR, D.K. PANDAY, “*Thin Solid Films*”, (1983), pp 102.
- [15] J. ELIAS “*Réseaux de nanofils et de nanotubes d'oxyde de zinc de dimensions contrôlées obtenus par voie électrochimique*”, Application aux cellules solaires nanostructurées, thèse Université Paris 12-Val de Marne, (2008).
- [16] C. KLINGSHIM, “*ZnO: Material, Physics and Applications, Chem Phys*”, Vol 8 n°6, (2007), pp. 782-803.

- [17] P.M. CHASSAING, “*Quelques illustrations du rôle de la surface dans des nanoparticules de ZnO*”, Thèse de l'Université de Toulouse, (2009).
- [18] M.A GREEN. “*Solar cell*”, Ed, University of New South Wales, (1992), p.336
- [19] I. LY, O.H. LEMRABOTT, B. DIENG, I. GAYE, S. GUEYE, M.S. DIOUF, G. SISSOKO, “*Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique*”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 n°2, (2012), pp187 – 206.
- [20] G. SISSOKO, C. MUSERUKA, A. CORREA, I. GAYE, A. L. NDIAYE, “*Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell*”, Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Denver, USA, Part III, 15 - 21 June (1996), pp. 1487- 1490.
- [21] O. DIASSE, A. DIAO, M. WADE, M. S. DIOUF, I. DIATTA, R. MANE, Y. TRAORE, G. SISSOKO, “*Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State*”, Journal of Modern Physics, 9, ISSN Print: 2153-1196, ISSN Online: 2153-120X, (2018), pp 189-201.
- [22] J. FURLAN and S. AMON, Solid-State Electronics, Vol 28, (1985), pp 1241-1243.
- [23] G. SISSOKO, E. NANEMA, A. L. NDIAYE, Y. L. B. BOCANDE, M. ADJ, “*Minority carrier diffusion length measurement in silicon solar cell under constant white bias light*”, Renewable Energy, Vol 3, Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00, (1996), pp 1594-1597.
- [24] Y. L. B. BOCANDE, A. CORREA, I. GAYE, M. L. SOW, G. SISSOKO, “*Bulk and surfaces parameters determination in high efficiency Si solar cells*”, Renewable Energy, Vol 5, part III, (1994), pp 1698-1700.
- [25] G.SISSOKO, E. NANEMA, A. CORREA, P.M. BITEYE, M. ADJ, A. L. NDIAYE, “*Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic*”, Renewable Energy, Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#, Vol 3, (1998), pp 1848-1851.
- [26] K. JOARDAR, R. C. DONDERO, D. K. SCHRODA, ‘*Solid-State Electronics*’, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol 32 (1989), pp. 479-483.
- [27] A. CORREA, “*Modélisation de la recombinaison aux interfaces d'une photopile au silicium polycristallin en régime stationnaire*”, Thèse de doctorat de troisième cycle, UCAD, DAKAR, (1996).
- [28] Moustapha THIAME, Alassane DIENE, Boureima SEIBOU, Cheikh Tidiane SARR, Mohamed Lemine Ould Cheikh, Ibrahima DIATTA, Mayoro DIEYE, Youssou TRAORE, Gregoire Sissoko, “*3D Study of a Bifacial Polycrystalline Silicon Solar Cell Back Surface*



*Illuminated: Influence of Grain Size and Recombination Velocity*”, Journal of Scientific and Engineering Research, (2017), 4(1), pp 135-145.

[29] Abdelkader HAFDALLAH et al. “*Nature & Technologie*”, revue n° 06, Janvier (2012).

[30] A.J. YIN, G.R. LAI, J.S. CHEN, J.S. KAO, surface and coatings technology, Vol 90, (1997), pp 239 – 246.

[31] C. MARLENE, MORRIS, F. HOWARD, Mc MURDIE, H. ELOISE and C. NICOLA “*Standard X-ray Diffraction*”, International Centre for Diffraction Data, October (1981), pp 24-54-72.

[32] N. ZEBBAR, M.S. AIDA, A. HAFDALLAH, W. DARANFAD, H. LEKIKET, and M. KECHOUANE, “*Les propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de ZnO: Al élaborées par spray ultrasonique*” Materials Science Forum, Vol 609, (2009), pp 133-137.

[33] A. ASHOUR, M.A. KAID, N.Z. EL-SAYED, A.A. IBRAHIM, “*Physical properties of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique*”, Applied Surface Science, Vol 252, (2006), pp 7844–7848.

[34] B.N. PAWAR, S.R. JADKAR, M.G. TAKWAL, “*Deposition and characterization of transparent and conductive sprayed ZnO: B thin films*”, Solar Energy Materials & solar cell, Vol 91, (2007), pp 258.

[35] X.Y. LI, H.J. LI, Z.J WANG, H. XIA, Z.Y. XIONG, J.X. WANG, B.C. YANG, Optics Communications, Vol 282, (2009), pp 247.

[36] Ki-Soek AN, Wontae CHO, Byung Kook LEE, Sun Sook LEE, Chang Gyoun KIM, “*Les propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de ZnO:Al élaborées par spray ultrasonique*”, Journal of nanoscience and nanotechnology, Vol 8, (2008), pp 4856-4859.

[37] J-H. LEE, B-O, “*An evaluation of potential liner materials for eliminating FCCI in irradiated metallic nuclear fuel elements*” Park Materials Science and Engineering B 106, (2004), pp 242–245.

[38] F. BALDE, “*Etude en régime statique de la photopile monofaciale au Silicium sous polarisation électrique extérieure et sous éclairage monochromatique : détermination des paramètres électriques*” UCAD, DAKAR, (2012).

[39] J.DUGAS, “*Solar Energy Materials and Solar cells*”, North-Holland, (1994), pp 32, 71-88.

[40] A. RICAUD, “*Photopiles solaires : Physique des photopiles*”, Lausanne, Suisse (1997).

[41] D.M. BANALL et al. “*Photovoltaic technologies*”, Appl. Phys. Lett. 70 (1997) 2230.

- [42] F.GREUTER, G. BLATTER, “*Electrical properties of grain boundaries in polycrystalline compound semiconductors*”, *Semicond. Technol.* 5 (1990) 111.
- [43] S.T. LETT et al. *Appl. Phys. Lett.* 74 (1999)690.
- [44] A. SCHNEIDER et al. “*A BSF for thin screenprinted multicrystalline Si Solar Cells*”, *Proc. European PVSEC, Munich*, (2001), pp 1768 -1771.
- [45] Le QUANG NAM, “*Photopiles de haut rendement en silicium multicristallin*”, Thèse de Doctorat, Université Paris VII (1992).
- [46] H. J. MÖLLER: “*Semiconductors for solar cells*”, Artech house, (1993).
- [47] S. GUEYE, H. L. DIALLO, M. NDIAYE, M. M. DIONE and G. SISSOKO, “*Effect of the boundary recombination velocity and the Grain Size at the Phenomenological Parameters of the Monofacial Solar Cells under Multispectral Illumination in Steady State*”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, [www.ijetae.com](http://www.ijetae.com), Vol 3, (2013), pp 1-8.
- [48] D.P Norton, Y.W. HEO, M.P. IVILL, S.J. PEARTON, M.F. CHISHOLM, T. STEINER, *Mater, Today* 7 (2004), pp.34.
- [49] S. MBODJI, B. MBOW, F. I. BARRO and G. SISSOKO, “*A 3D Model for Thickness and Diffusion Capacitance of Emitter-Base Junction Determination in a Bifacial Polycrystalline Solar Cell under Real Operating Condition*”, *Turkish Journal of Physics*, (2011) 35, pp 281-291.
- [50] J.J. LIOU, F.A. LINDHOLM, and D. C. MALOCHA, “*Forward-Voltage Capacitance of heterojunction Space Charge Regions*”, *Journal of Applied Physics* <http://dx.doi.org/10.1063/1.340448>, (1988), pp 63, 5015.
- [51] H. L. DIALLO, A. S. MAIGA, A. WEREME, G. SISSOKO  
“*New approach of both junction and back surface recombination velocity in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell*”. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 42, (2008), pp 203–211.
- [52] G. SISSOKO, E. NANEMA, A. L. NDIAYE, Y. L. B. BOCANDE and M. ADJ,  
“*Minority carrier diffusion length measurement in silicon solar cell under constant white bias light*”. *Renewable Energy*, Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00. Vol 3, (1996), pp.1594-1597,
- [53] Y. L. B. BOCANDE, A. CORREA, I. GAYE, M. L. SOW and G. SISSOKO  
“*Bulk and surfaces parameters determination in high efficiency Si solar cells*”. *Renewable Energy*, Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00, Vol 5, part III, (1994) pp. 1698-1700.

- [54] FELLAHI OUARDA, “*Elaboration de nanofils de silicium par gravure assistée par un métal : caractérisation et application en photocatalyse hétérogène de l’oxyde de graphène, du chrome (VI) et de la rhodamine B*”, Thèse, Université Sétif1 Algérie, (2014), pp33-64-17-36-37.
- [55] J. DUGAS, “*3D Modelling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafers*”, Solar Energy Materials and Solar Cells , (1994), pp 32, 71-88.
- [56] M. M. DIONE, I. LY, A. DIAO, S. GUEYE, A. GUEYE, M. THIAME and G. SISSOKO. “*Determination of the Impact of the Grain Size and the Recombination Velocity at Grain Boundary on the Values of the Electrical Parameters of a Bifacial Polycrystallin Silicon Solar Cell*”, IRACST Engineering Science and Technology : An International Journal (ESTIJ), Vol 3, (2013), pp 330-334.
- [57]. H. L. DIALLO, A. WEREME, A. S. MAIGA and G. SISSOKO, “*New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modeling study of a polycrystalline silicon solar cell*”, Eur. Phys. J. Appl. Phys., 42: (2008), pp.203–211.
- [58] H. J. HOVEL, “*Semiconductors and semimetals*”, Solar Cells Academic Press, Vol 11, (1975), pp 50.
- [59] M. ZOUNGRANA, I. ZERBO, F. OUEDRAGO, B. ZOUMA and F. ZOUGMORE. “*3DModelling of Magnetic Field and Ligth Concentration Effects on a Bifacial Silicon Solar Cell Illuminated by its Rear Side*”, IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, 29, Article ID: 012020, <http://iopscience.iop.org/1757-899X/29/1/012020>, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/29/1/012020>, (2012), pp 23-41-52
- [60] K. JOARDAR, R. C. DONDERO and D. K SCHRODA. “*Critical analysis of the small-signal voltage-decay technique for minority-carrier lifetime measurement in solar Cells*”, Solid -State Electronics, Vol 32, (1989), pp-479-483.
- [61] G. SISSOKO, E. NANEMA, A. CORREA, P. M. BITEYE, M.ADJ, A. L. NDIAYE. “*Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic*”, Renewable Energy, Vol-3, Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/, pp.1848-1851
- [63] G.M. SMIRNOV and J.E. MAHAN, Solid-state electr, (1986), pp 23, 1055.
- [64] P. MIALHE, M.M. KANE, G. SISSOKO, “*A study of the minority carrier lifetimes in solar cells*”, Physics seminar proceedings Addis Abeba, (1988), pp.74-79.
- [65] M.H. IMAMURA and J.J. PORTCHELLER, 8th IEEE Photovoltaic specialist conference, (1970), pp 102.

- [66] A. DIENG, N. THIAM, M. ZOUNGRANA, S. DIALLO, F.I. BARRO and G. SISSOKO, “*Etude à 3-D d’une Photopile Polycristalline au Silicium: Influence de la Taille de Grain et de la Vitesse de Recombinaison aux Joints de Grain sur les Paramètres Electriques*”, Journal des Sciences, Vol. 9, N°1, (2009), pp. 51 – 63.
- [67] S. M. SZE, “*Physics of Semiconductor devices*”, 2nd Edition, Wiley Interscience New-York (USA), (1981), pp.807.
- [68] Y. L. B. BOCANDE, A. CORREA, I. GAYE, M. L. SOW and G. SISSOKO “*Bulk and surfaces parameters determination in high efficiency Si solar cells*”, Renewable Energy, Pergamon, 0960-1481, Vol 5, part III, (1994), pp. 1698-1700, 1994,
- [69] ADAIKA MARWA, “*Etude par simulation numérique de l’effet des couches surdopée coté contacts avant et arrière d’une cellule solaire n/p en silicium*”, mémoire de magister Université Mohammed Khiderde Biskra, (2012), pp55-68
- [70] L. Tomasini (Sollac, Groupe Usinor), La Revue de Métallurgie-CIT (2001), pp-265-459
- [71] Cheikh Tidiane SARR, Mouhamadou Moustapha DIONE, Idrissa GAYE, Sega GUEYE, Amary THIAM, Grégoire SISSOKO “*Effect of electric field on bifacial polycrystalline silicon solar cell under multispectral light*”, IPASJ- International Journal of Electrical Engineering( IJEE), Volume 2, Issue 9, september (2014), pp 10-16
- [72] Grégoire SISSOKO, E. NANEMA, A. CORREA, P.M. BITEYE, M. ADJ, A.L NDIAYE, “*Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic*” Renewable Energy, 3, Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#. (1998), pp1848-1851,