

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux

Sujet : Influence de l'éclairement solaire sur les paramètres électriques d'une photopile au silicium polycristallin et effet de l'ombrage dû aux grilles de contact.

Présenté par

MOUSSA CAMARA

Sous la direction de : Dr MOUSTAPHA THIAME

Sous la supervision du Professeur Grégoire SISSOKO (FST/UCAD)

Soutenu publiquement le 25/02/2017 devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Établissement
Ibrahima SAKHO	Maître de Conférences	Président de jury	UASZ
Diouma KOBOR	Maître de Conférences	Rapporteur	UASZ
Ababacar NDIAYE	Assistant	Examineur	UASZ
Modou TINE	Assistant	Examineur	UASZ
Moustapha THIAME	Maître Assistant	Encadreur	UASZ

Dédicaces

A toute ma famille,

Ma mère, Mon père, Mon grand frère feu Malamine
Sima, Mes frères et sœurs...

Mes tuteurs feu S. Badio, W. Camara, D. Badio, G.
Badio et tous leurs enfants.

A mes amis.

A tout ceux et celles qui me sont chér(e)s



Remerciements

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire, le Docteur Moustapha THIAME du Département de physique. Vous étiez mon interlocuteur privilégié tout le long de ce travail. Vos conseils et vos encouragements ont été très bénéfiques pour moi.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux membres du jury : le président du jury Monsieur Ibrahima SAKHO, le rapporteur Monsieur Diouma KOBOR et les examinateurs Monsieur Ababacar NDIAYE et Monsieur Modou TINE qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues du laboratoire de chimie et de physique des matériaux, surtout Abraham Sambou, Abdourahmane Diallo, O. Kata Faye, A. Karim Tambidou et Ismaila Biaye et à ceux du LOSEC.

J'exprime mes profonds remerciements à Moussa Touré, Philippe B. Himbane, Rémi Dioukane et Ndeye Coumba Y. Fall tous les Doctorants au laboratoire pour leurs conseils, qui m'ont été très utiles tout au long de l'élaboration de ce travail. Merci pour tout !

Je ne saurai continuer sans remercier aussi les enseignants chercheurs du département de physique, de chimie et mathématiques de l'UASZ et ma famille qui m'a été d'un grand soutien tout au long de mes années d'études.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce travail, tant au niveau humain qu'au niveau scientifique.

Résumé :

Une étude bibliographique sur la caractérisation d'une photopile en une dimension et sur les pertes de puissance dues à la métallisation de la face avant d'une cellule solaire est présentée. Elle met en exergue l'effet de la profondeur de la base, de l'angle d'incidence et de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la densité de photocourant et sur la phototension, mais aussi l'influence de la largeur du doigt sur la puissance de collecte.

Une modélisation à trois dimensions d'une photopile au silicium polycristallin en régime statique sous l'éclairement monochromatique est ensuite réalisée. La densité des porteurs photogénérés ainsi que le photocourant, la phototension, le photocourant de court-circuit et la tension en circuit ouvert sont étudiés en mettant en exergue l'effet combiné du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence du rayonnement. Qui nous a permis de voir que pour $n \leq 0.4$ et $\Theta \geq 40^\circ$ nous avons une forte diminution du photocourant et pour $n \geq 0.6$ et $\Theta \leq 20^\circ$ nous avons une forte augmentation de la densité du photocourant.

Ensuite, une étude des pertes dues à la métallisation de la couche avant de la cellule est présentée. Dans cette étude, le taux d'ombre due à la métallisation et le taux de perte de puissance par conduction sont donnés en fonction de la longueur d'espacement (cellules carrées) et de l'angle d'espacement (cellules circulaires) des doigts. La variation de ces taux pour différentes longueurs et angles d'espacement entre les doigts est présentée. Lorsque la longueur et l'angle d'espacement augmentent, le taux d'ombre diminue tandis que le taux de perte de puissance par conduction augmente.

Enfin, l'influence de la largeur des doigts de collecte sur les taux d'ombre et taux de perte de puissance par conduction optimaux est étudiée. Cela nous a permis de comparer les taux d'ombrage optimaux et les dimensions optimales des géométries des grilles pour les cellules étudiées (deux structures carrées et deux structures circulaires). Ainsi la structure peigne a moins d'ombre suivi de la structure échelle puis circulaire simple et circulaire complexe.

Mots clés : Photopile - Densité des porteurs de charge- Photocourant- Phototension- Vitesse de recombinaison- Niveau d'éclairement - Angle d'incidence - Taux d'ombre - Taux de perte de puissance par conduction.

Abstract:

A literature study on characterization of a photovoltaic solar cell in one dimension and the power losses due to the metallization of the solar cell is presented. It puts forward the effect of the base depth, the incidence angle and the junction recombination velocity's on the carrier's density, photocurrent density and photovoltage and also the influence of the width of finger on the electrical power loss.

A three dimensional modeling of a polycrystalline silicon solar cell in static mode under monochromatic illumination has been studied. The carrier density as well as the photocurrent, the photovoltage, the short circuit photocurrent density and the open circuit photovoltage were studied by putting forward the combined effect of the illumination level and the illumination incidence angle. We have seen that for $n \leq 0.4$ and $\Theta \geq 40^\circ$ we have a high decrease of the photocurrent and for $n \geq 0.6$ and $\Theta \leq 20^\circ$ we have a high increase of the photocurrent density.

A study of the front solar cell with metallization loss is presented. In this study, the metallization shadow rate and the electrical conduction power loss rate are given according to the length of spacing (square cells) and the angle of spacing (circular cells) of the fingers. The variation of these rates for various lengths and angle of spacing between the fingers is studied. As the length and angle of spacing increases, the shadow rate decreases as the rate of power loss by conduction increases.

Lastly, the influence of the collection fingers wide on the optimal shadow rate and the optimal electrical conduction power loss rate are studied. It allowed us to compare the optimal shadow's rates and the optimal dimensions of the geometry metallization grids of our four solar cells structures studied (two square structures and two circular structures). Thus the comb structure has less shadow followed by the scale structure then circular simple and circular complex.

Keywords: Solar cell – Carrier's density- Photocurrent density- photovoltage- recombination velocity - illumination Level - illumination incidence angle – shadow Rate – electrical power loss rate.

Table des matières

SOMMAIRE.....	V
NOMMENCLATURE.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	X
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
Introduction.....	4
I.1 : Généralités sur le silicium polycristallin.....	4
I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	5
I.3 : Etude de la densité de porteurs minoritaires pour le modèle unidimensionnel.....	6
I.4 Etude de la densité de photocourant pour le modèle unidimensionnel.....	8
I.5 : Etude du courant de court circuit pour le modèle unidimensionnel.....	8
I.6 : Etude de la phototension pour le modèle unidimensionnel.....	8
I.7 : Etude de la densité des porteurs minoritaires pour une modèle tridimensionnel.....	9
I.8 : Etude de la densité de photocourant pour le modèle tridimensionnel.....	10
I.9 : Etude de la phototension pour le modèle tridimensionnel.....	10
I.10 : Etude de la tension de circuit ouvert pour le modèle tridimensionnel.....	10
I.11 : Optimisation de la cellule.....	11
Conclusion.....	13
CHAPITRE II : ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR UNE PHOTOPILE AU SILICIUM POLYCRISTALLIN EN REGIME STATIQUE	14
Introduction.....	15
II.1 : Présentation du modèle d'étude	15
II.2 : Présentation du logiciel	17
II.3 : Etude de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base.....	18
II.3.1 : Taux de génération.....	18
II.3.2 : Taux de recombinaison.....	19
II.3.3 : Equation de continuité.....	19
II.3.4 : Condition aux limites.....	20
II.3.5 : Densité des porteurs minoritaires de charge en excès.....	21
II.4 : Etude de la densité des porteurs minoritaires en excès.....	22

II.4. 1: Influence de la profondeur et niveau d'éclairement sur la densité de porteur minoritaires en excès dans la base	23
II.4.2 : Influence de la profondeur et l'angle d'incidence sur la densité de porteurs minoritaire dans la base.....	24
II.4.3 : Influence du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence sur la densité des porteurs minoritaires dans la base.....	25
II.5 : Etude de la densité de photocourant.....	26
II.5.1 : Expression photocourant.....	26
II.5.2 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et le niveau d'éclairement sur le photocourant	27
II.5.3 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et l'angle d'incidence sur le photocourant	28
II.5.4 : Influence du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence sur le photocourant.....	29
II.5.5 : Etude du photocourant de court-circuit.....	30
II.6 : Etude de la phototension.....	31
II.6.1 : Expression de la phototension	31
II.6.2 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et niveau d'éclairement sur la phototension.....	32
II.6.3 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et l'angle d'incidence sur la phototension.....	33
II.6.4 : Influence du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence sur la phototension.....	34
II.6.5 : Etude de la tension de circuit ouvert.....	35
Conclusion.....	36
CHAPITRE III : EFFET D'OMBRAGE DU AUX GRILLES DE COLLECTE DE LA FACE AVANT D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	38
Introduction.....	39
III.1 : Présentation des cellules.....	39
III.2 : Modélisation.....	39
III.2.1 : Grille échelle	41
III.2.1.1 : Perte due à la résistance de couche avant.....	41
III.2.1.2 : Perte de puissance dans la métallisation de la grille	42
III.2.1.3: Perte due à la résistance de contact métal/semi-conducteur.....	42
III.2.1.4 : Taux d'ombrage.....	43

III.2.2 : Grille en peigne.....	43
III.2.2.1 : Taux de perte de puissance par conduction.....	43
III.2.2.2 : Taux d'ombrage.....	43
III.2.3 : Grille circulaire simple	44
III.2.3.1 : Taux de perte de puissance par conduction.....	44
III.2.3.2 : Taux d'ombrage dû à la métallisation	46
III.2.4 : Grille circulaire à n collecteurs.....	46
III.2.4.1: Taux de perte de puissance par conduction.....	46
III.2.4.2 : Taux d'ombre.....	47
III.3 : Résultats et discussions.....	47
III.3.1 : Influence de la longueur d'espacement des doigts sur les taux d'ombre	48
III.3.2 : Influence de l'angle d'espacement entre deux doigts sur les taux d'ombre	49
III.3.3 : Etude de l'influence de la longueur d'espacement sur les taux de perte de puissance par conduction pour échelle et peigne.....	50
III.3.4 : Etude de l'influence de l'angle d'espacement sur les taux de perte de puissance par conduction pour circulaire simple et circulaire complexe	51
III.3.5 : Influence du taux d'ombre sur le taux de perte de puissance par conduction pour échelle et peigne	52
III.3.6 : Influence du taux d'ombre sur le taux de perte de puissance par conduction pour circulaire simple et circulaire complexe.....	52
III.3.7 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal de la structure échelle	53
III.3.8 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal de la grille peigne.....	55
III.3.9 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal d'une grille circulaire simple	56
III.3.10 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal d'une grille circulaire complexe à n collecteurs	57
Conclusion.....	59
CONCLUSION GENERAL.....	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	62
ANNEXE MATHEMATIQUEII DU CHAPITRE III.....	65

NOMENCLATURE

x (cm)	Abscisse dans le grain, à la profondeur z
y (cm)	Ordonnée dans le grain, à la profondeur z
z (cm)	Profondeur dans la base, comptée à partir de la jonction ($z = 0$)
g_x	Dimension du grain dans la direction $x'ox$
g_y	Dimension du grain dans la direction $y'oy$
δn (cm ⁻³)	Densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile
$F_{ph}(\lambda)$	Flux de photons incident sur la face avant pour un éclairage monochromatique
D_n (cm ² /s)	Coefficient de diffusion des porteurs de charge dans la base de la photopile
H (cm)	Épaisseur de la base de la photopile
L_n (cm)	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge dans la base de la photopile
K, j	Indices relatives aux directions x et y respectivement
C_k, C_j	Solutions des équations transcendantes
L_{kj}	Pseudo longueur de diffusion associée aux modes k et j dans la base
S_f (cm/s)	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction
S_b (cm/s)	Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière de la photopile
τ (s)	Durée de vie des porteurs minoritaires de charge dans la base de la photopile
J_{ph} (A/cm ²)	Densité de photocourant
N_B (cm ⁻³)	Taux de dopage de la base en atomes d'impureté
n_i (cm ⁻³)	Concentration intrinsèque des porteurs dans la base
K_B (J/°K)	Constante de Boltzmann
T (K)	Température
V_{ph} (V)	Phototension
V_{phCO}	Phototension de circuit ouvert
J_{cc} (A/cm ²)	Densité de courant de court-circuit
J_m (A/cm)	Densité de courant à la puissance maximale
V_m (V)	Tension à la puissance maximale
L (cm)	Longueur entre deux doigts
Θ (rad)	Angle entre deux doigts
ρ_s (Ω/carré)	Résistance carrée de la couche avant
ρ_M (Ω.cm)	Résistivité du métal
ρ_c (Ω.cm ⁻²)	Résistance spécifique du contact

$\tau_{cav}(\%)$	Taux de perte de la résistance de la couche avant
$\tau_{ms}(\%)$	Perte due à la métallisation métal/semi-conducteur
$\tau_R(\%)$	Taux de perte de puissance par conduction
$\tau_0(\%)$	Taux d'ombre

Liste des figures

Figure(I.1) : Lingot de silicium polycristallin	5
Figure(I.2) : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure(I.3) : Schéma de principe de la photopile monofaciale sous éclairement avec variation de l'angle d'incidence [6].....	7
Figure(II.1) : Schéma illustratif des joints de grain d'un silicium polycristallin [26].....	15
Figure(II.2) : Schéma du modèle colonnaire des joints de grain d'un silicium polycristallin [26].....	16
Figure(II.3) : Schéma de description d'un grain de silicium.....	16
Figure(II.4) : Grain isolé	17
Figure(II.5) : Menu des barres d'outils.....	18
Figure(II.6) : Zone de travail.....	18
Figure(II.7) : Profile de la densité de porteurs minoritaires de charges en excès dans la base en fonction de la profondeur et du niveau d'éclairment	23
Figure(II.8) : Profile de la densité de porteurs minoritaires de charges en excès dans la base en fonction de la profondeur et l'angle d'incidence	24
Figure(II.9) : Profile de la densité de porteurs minoritaires de charges en excès dans la base en fonction du niveau d'éclairment et l'angle d'incidence	25
Figure(II.10) : Schéma illustrative du fonctionnement d'une photopile sous éclairement [30]	26
Figure(II.11) : Profile de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et du niveau d'éclairment.....	27
Figure(II.12) : Profile de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et l'angle d'incidence	28
Figure(II.13) : Profile de la densité de photocourant en fonction du niveau d'éclairment et de l'angle d'incidence.....	29
Figure(II.14) : Profil du courant de court-circuit en fonction du niveau d'éclairment et l'angle d'incidence	31

Figure(II.15) : Profile de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et le niveau d'éclairement.....	32
Figure(II.16) : Profile de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et l'angle incidence	33
Figure(II.17) : Profile de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.....	34
Figure(II.18) : Profile de la phototension en fonction du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence.....	35
Figure(II.19) : Profile de la phototension de circuit ouvert en fonction du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence	36
Figure(III.1) : Exemple de géométrie de grille de la face avant	40
Figure(III.2) : Motif de grille échelle.....	41
Figure(III.3) : Motif de grille peigne.....	44
Figure(III.4) : Motif de grille circulaire simple	45
Figure(III.5) : Motif de grille circulaire complexe.....	46
Figure(III.6) : Profils du Taux d'ombre en fonction de la longueur d'espacement entre deux doigts pour a) échelle et b) peigne.....	48
Figure(III.7) : Profils du Taux d'ombre en fonction de l'angle d'espacement entre deux doigts de c)circulaire simple et d) circulaire complexe.....	49
Figure(III.8) : Profils du taux de perte de puissance par conduction en fonction de la longueur d'espacement L pour a) échelle et b) peigne.....	50
Figure(III.9) : Profils du taux de perte de puissance par conduction en fonction de l'angle inter doigt pour circulaire simple et circulaire complexe.....	51
Figure(III.10) : Profils du taux de perte de puissance par condition en fonction du taux d'ombre pour échelle et peigne.....	52
Figure(III.11) : Profils du taux de perte de puissance par conduction en fonction du taux d'ombre pour circulaire simple et circulaire complexe à n collecteurs.....	53
Figure(III.12) : Profile des taux de perte de puissance par conduction et d'ombre en fonction de la longueur d'espacement pour différentes valeurs de la largeur du doigt (W) d'une grille linéaire simple.....	54
Figure(III.13) : Profile des taux d'ombre et perte de puissance par conduction en fonction de la longueur d'espacement pour différentes valeurs de la largeur du doigt d'une grille peigne	55

Figure(III.14) : Profils des taux d'ombre et perte de puissance par conduction en fonction de la longueur d'espacement pour différentes valeurs de la largeur du doigt d'une grille circulaire simple.....57

Figure(III.15) : Profile des taux d'ombre et perte de puissance par conduction en fonction de la longueur d'espacement pour différentes valeurs de la largeur du doigt d'une grille circulaire complexe à n collecteur.....58

Liste des tableaux

Tableau(III.1) : Dimension et paramètres électriques utilisés48

Tableau(III.2) : Valeurs de τ_{0op} , τ_{Rop} et L_{op} pour différentes largeur du doigt de la structure échelle.....54

Tableau(III.3) : Valeurs de τ_{0op} , τ_{Rop} et L_{op} pour différentes valeurs de la largeur du doigt pour la structure peigne.....56

Tableau(III.4) : Valeurs de τ_{0op} , τ_{Rop} et Θ_{op} pour différentes largeur du doigt d'une grille circulaire simple.....57

Tableau(III.5) : Valeurs de τ_{0op} , τ_{Rop} et Θ_{op} pour différentes largeur du doigt d'une grille circulaire complexe.....58

Tableau(III.6) : Valeurs optimaux de W_{op} , τ_{0op} , τ_{Rop} , L_{op} et Θ_{op} pour les quatre géométries de grille.....59

INTRODUCTION GENERALE.

La situation énergétique mondiale actuelle et son évolution dans le futur sont des problématiques extrêmement importantes qui concernent l'ensemble de l'humanité. L'utilisation massive des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) dont les réserves sont par ailleurs limitées, entraîne l'émission de gaz carbonique. Ce gaz aggravant l'effet de serre, est responsable d'un bouleversement climatique qui entrainera d'après les plus récentes modélisations une hausse de la température de la planète de 1,5 à 6° C au cours des cents prochaines années [1]. Cette hausse de température aura des conséquences désastreuses pour l'humanité. Des territoires risquent d'être submergés par la montée du niveau des océans. Quant à l'énergie nucléaire, celle-ci est performante pour la production d'énergie électrique, mais le problème de la gestion des déchets radioactif à longue durée de vie (plusieurs millions d'années) n'est toujours pas résolu. De plus les risques de détournement du nucléaire civil à des fins militaires ou terroristes sont à prendre en compte.

Les énergies renouvelables sont donc amenées à jouer un rôle important dans la crise énergétique mondiale. L'une des énergies renouvelables très utilisées dans le monde, non polluante est l'énergie photovoltaïque. Cette dernière repose sur la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique et possède un potentiel important parmi les différentes énergies renouvelables. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 W.m^{-2} [2]. L'énergie solaire présente, en plus de tous les avantages des énergies renouvelables, ces propres avantages.

De nos jours, la plupart des cellules solaires commercialisées sont fabriquées en utilisant du silicium monocristallin ou polycristallin. Ces cellules solaires peuvent atteindre des rendements photovoltaïques de l'ordre de 24,7 % [3]. La mise en place des contacts métalliques permettant de recueillir les porteurs photogénérés est l'une des étapes clés de la fabrication de ces cellules. La présence de ces contacts entraîne toute fois certaines limitations : résistance élevée correspondante à une perte de puissance, taux d'ombre important qui constitue une forme de perte, etc...

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 optimiser les dimensions géométriques des grilles de collectes afin de minimiser les pertes dues à l'ombrage et à la conduction.

Dans le cadre de ce mémoire, notre étude porte sur une cellule au silicium Polycristallin.

Elle est fondée sur le dimensionnement et la simulation qui prend en compte l'influence de la profondeur dans la base de la cellule, de la vitesse de recombinaison des porteurs, du niveau d'éclairement, de l'angle d'incidence sur les paramètres électriques de la cellule et de l'influence du taux d'ombre, de la largeur et de l'espacement des grilles sur le taux de perte par conduction.

Au chapitre I, nous ferons une étude bibliographique sur les cellules au silicium Polycristallin, où nous passerons en revue quelques travaux sur la caractérisation des photopiles en fonction de l'éclairement, et sur l'optimisation de la géométrie de la grille de collecte d'une cellule solaire.

Le chapitre II sera consacré à l'étude en modélisation et simulation à 3D en régime statique d'une photopile polycristalline sous éclairement monochromatique. Ici nous étudierons l'effet combiné de l'angle d'inclinaison du rayonnement solaire et le niveau d'éclairement sur la densité des porteurs minoritaires dans la base, le photocourant, la phototension, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

Dans le chapitre III nous ferons une étude de modélisation et de simulation pour comparer différentes structures de métallisation d'une cellule photovoltaïque. Partant de l'optimisation de la distance entre les grilles de métallisation en exploitant le taux de conduction et le taux d'ombrage dû à la métallisation, nous étudierons l'influence de la largeur sur celle-ci. Nous comparerons aussi l'influence du taux d'ombrage sur le taux de conduction pour différentes géométries de la métallisation.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Toute amélioration de sa performance est un surplus pour la production d'énergie. C'est dans le but d'améliorer leur rendement que différentes techniques de caractérisation ont été mises en œuvre notamment en régime statique, dynamique transitoire, et dynamique fréquentiel. La détermination des paramètres phénoménologiques et électriques permet de mieux appréhender le fonctionnement de la photopile et d'en améliorer à la fois sa fabrication et sa structure.

Dans ce chapitre nous allons d'abord donner les généralités sur le silicium polycristallin puis expliquer le principe de fonctionnement de la photopile et enfin nous présenterons quelques travaux importants sur la caractérisation des photopiles.

I.1 : Généralités sur le silicium Polycristallin.

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Il est extrait de la silice (SiO_2) grâce à la réaction chimique suivante : $SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$. Cette réaction se réalise dans un four à arc, car elle nécessite de faire fondre la silice. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW [4], afin de déclencher les réactions chimiques. Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeurs afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium [4].

Pour obtenir le silicium polycristallin, le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. La technique est simple et peut être énergétiquement coûteuse. Le silicium Polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. On obtient au final des lingots parallélépipédiques. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaques seront placées en série sur un module photovoltaïque [4].

Les lingots parallélépipédiques de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelés « wafer ».

La coupe des lingots peut s'effectuer avec plusieurs méthodes. Compte tenu de la faible épaisseur des tranches à découper (300 μm), le principal problème du sciage est la perte du découpage. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil [4].

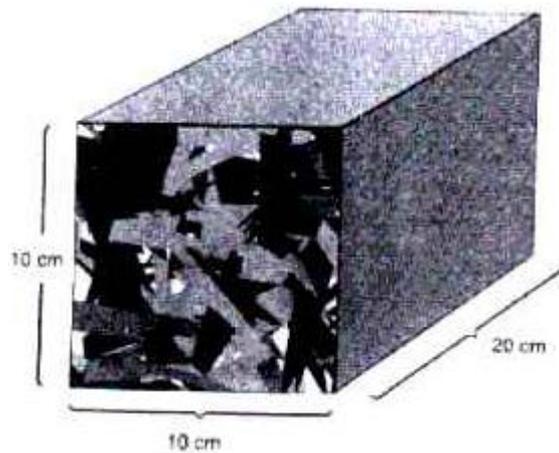


Figure (I.1) : Lingot de silicium polycristallin

I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [5] :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif ;

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergies et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires d'électron/trou créées est nécessaire. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures, comme les hétérojonctions sont également utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure I.2

Les photons incidents créent des porteurs des zones N et P et dans la zone de charge d'espace.

Les porteurs minoritaires 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) ou ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/trous créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : Les électrons vont aller vers la région N et les trous vers la région P. On aura un photocourant de génération [6].

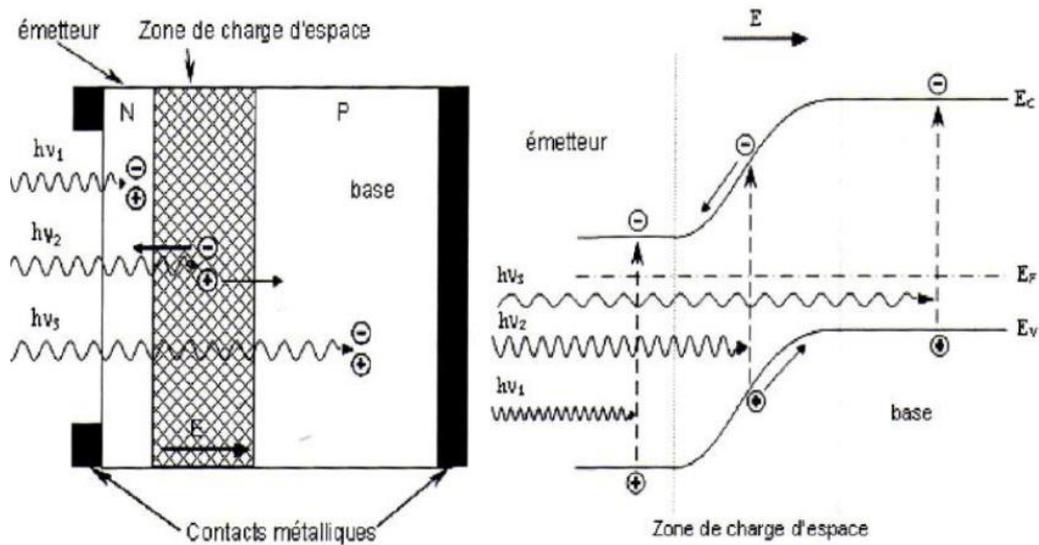


Figure. I.2 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les dimensions respectives de différentes zones ne sont pas respectées [6].

I.3: Etude de la densité de porteurs minoritaires pour le modèle unidimensionnel

L'étude porte sur une photopile de type n⁺-p-p⁺ et sa structure unidimensionnelle est présentée sur la figure (I.3).

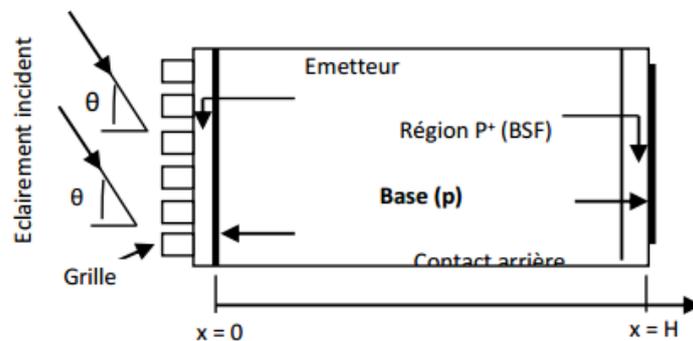


Figure (I.3) : Schéma de principe de la photopile monofaciale sous éclairage avec variation de l'angle d'incidence [7].

Elle est composée de trois parties essentielles qui sont l'émetteur (zone n⁺), la base (zone p), une zone arrière surdopée (zone p⁺) et entre l'émetteur et la base y'a la zone de charge d'espace. Sur les faces avant et arrière il y'a des contacts électriques sous forme de grille métalliques obtenues par dépôt chimique de Nickel sur silicium, par sérigraphie d'une pâte à base d'argent (face avant) ou d'aluminium (face arrière) qui permettent de récupérer les porteurs de charges. En plus du modèle une, des approximations ont été faites :

La contribution de l'émetteur est négligée par rapport à celle de la base [8].

La densité des électrons générés dans la base sous l'effet de l'éclairement obéit à l'équation de continuité suivante [8, 9, 10, 11] :

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{G(x, \theta)}{D} \quad (\text{I.1})$$

D (cm².s⁻¹) et L (cm) sont respectivement le coefficient de diffusion et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base ;

x: la profondeur dans la base mesurée à partir de la jonction émetteur/base (x=0) jusqu'à la face arrière (x=H=300µm) ;

Θ : angle d'incidence de l'éclairement en degré;

δ(x) : densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de x ;

G(x, θ) : taux de génération des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base, à une distance x de la jonction émetteur/base et son expression est :

$$G(x, \theta) = \cos(\theta) \cdot \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-b_i x} \quad (\text{I.2})$$

a_i et b_i : Les coefficients tabulés du rayonnement solaire sous AM = 1.5.

L'équation (I.3) donnant l'expression de la densité des porteurs minoritaire en excès en fonction de la profondeur x et l'angle d'incidence est la solution générale de l'équation (I.1).

$$\delta(x, \theta) = A \cdot \text{ch}\left(\frac{x}{L}\right) + B \cdot \text{sh}\left(\frac{x}{L}\right) + \cos(\theta) \cdot \sum_{i=1}^3 [K_i \cdot e^{-b_i x}] \quad (\text{I.3})$$

$$\text{Avec } K_i = \frac{-a_i \cdot L^2}{D \cdot [L^2 \cdot b_i^2 - 1]} \quad (\text{I.4})$$

Avec A et B : Des coefficients obtenus à partir des conditions aux limites :

A la jonction, à x=0

$$\left(\frac{\partial \delta(x)}{\partial x}\right)_{x=0} = \frac{Sf}{D} \cdot \delta(0) \quad (\text{I.5})$$

A la face arrière, à x=H

$$\left(\frac{\partial \delta(x)}{\partial x}\right)_{x=H} = -\frac{Sb}{D} \cdot \delta(H) \quad (\text{I.6})$$

Sf : Vitesse de recombinaison à la jonction (cm.s⁻¹) ;

Sb : Vitesse de recombinaison à la face arrière (cm.s⁻¹) ;

H : Profondeur de la base (cm).

Les profils de la densité de porteurs minoritaire de charge en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeur de l'angle d'incidence et respectivement pour de faible et fortes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction permet de conclure que :

Dans la zone de gradient négatif, les porteurs minoritaires de charge ne traversent pas la jonction. Il y'a stockage de porteurs au niveau de la jonction pour les faibles valeurs de Sf.

Dans la zone de gradient positif au voisinage de la jonction, les porteurs minoritaires situés à ce niveau traversent la jonction pour participer à la production du photocourant.

La densité des porteurs minoritaires de charges augmente quand l'angle d'incidence diminue.

I.4 : Etude de la densité de photocourant pour le modèle unidimensionnel

La densité de photocourant est donnée par l'équation suivante [11, 12].

$$J_{\alpha} = q \cdot D \frac{\partial \delta_{\alpha}(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (I.7)$$

Pour un éclaircissement de la face avant nous avons :

$$J_1 = qSj \sum_1^3 K_i \frac{\frac{(Sb - b_i D) \exp(-b_i H)}{Y} + b_i L - \frac{X}{Y}}{\frac{X}{Y} + \frac{SjL}{D}} \quad (I.8)$$

Le profile de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sj et du niveau d'éclaircissement montre que la densité de photocourant est nulle pour les faibles valeurs de Sj puis augmente rapidement pour atteindre une valeur de saturation à $Sj = 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ qui corresponde à la densité de courant de court circuit. Mais aussi, elle augmente avec le niveau d'éclaircissement [11, 13, 14].

I.5 : Etude du courant de court circuit pour le modèle unidimensionnel

L'expression du courant de court circuit est donnée par [11, 15, 16, 17] :

$$\frac{\partial J_{ph_{\alpha}}}{\partial S_{\alpha}} = 0 \quad (I.9)$$

I.6 : Etude de la phototension pour le modèle unidimensionnel

Pour ce qui concerne la phototension, la relation de Boltzmann permet de donner son expression comme suit [7, 10, 11, 17] :

$$V_{ph} = V_T \ln \left[\frac{N_b}{n_i^2} \delta(0) + 1 \right] \quad (I.10)$$

V_T : Est la tension thermique en volt ;

$$V_T = \frac{K_B \cdot T}{q} \quad (\text{I.11})$$

K_B : Est la constante de Boltzmann en J.K^{-1} ;

T : Est la température absolue en kelvin ;

n_i : La densité intrinsèque en cm^{-3} ;

N_b : Le taux de dopage de la base en cm^{-3} .

L'expression de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et l'angle d'incidence est :

$$V_{ph} = V_T \ln \left[\frac{N_b}{n_i} \left[A + \cos(\theta) \sum_{i=1}^3 K_i \cdot e^{-b_i H} \right] + 1 \right] \quad (\text{I.12})$$

Le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence permet de conclure que l'angle d'incidence a un impact faible sur la phototension [7].

I.7 : Etude de la densité des porteurs minoritaires pour le modèle tridimensionnel

L'équation de continuité correspondante au modèle 3D est [18] :

$$D \left[\frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial z^2} \right] - \frac{\delta(x, y, z)}{\tau} + G(z) = 0 \quad (\text{I.13})$$

Pour diverses directions angulaires(θ) de la lumière incidente, $G(z)$ est donnée comme suite :

$$G(z) = (n \cdot \cos(\theta)) \times \sum_{i=1}^3 a_i \exp(-b_i z) \quad (\text{I.14})$$

La solution mathématique pour l'équation de continuité ci-dessus est [18, 19] :

$$\delta(x, y, z) = \sum_k \sum_j Z_{kj}(z) \times \cos(C_k x) \cos(C_j y) \quad (\text{I.15})$$

C_k et C_j étant des valeurs propres, elles sont dérivées par des données liées aux conditions au limites des grains données ci-dessous [18, 19]

$$D \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial x} \right]_{x=\pm \frac{gx}{2}} = \mp Sgb \delta \left(\pm \frac{gx}{2}, y, z \right) \quad (\text{I.16})$$

$$D \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial y} \right]_{y=\pm \frac{gy}{2}} = \mp Sgb \delta \left(x, \pm \frac{gy}{2}, z \right) \quad (\text{I.17})$$

En exploitant des propriétés d'orthogonalité du cosinus et en injectant $\delta(x, y, z)$ dans l'équation (I.13) les relations clés sont dérivées comme suites :

$$Z_{kj}(z) = A_{kj} \cdot \cosh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) + B_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) + \sum_{i=1}^3 C_i \exp(-b_i z) \quad (\text{I.18})$$

$$C_i = \frac{a_i L_{kj}^2 n \cdot \cos(\theta)}{D_{kj} (1 - b_i^2 L_{kj}^2)} \quad (\text{I.19})$$

Avec

$$D_{kj} = \frac{D [C_k gx + \sin(C_k gx)] [C_j gy + \sin(C_j gy)]}{16 \sin\left(C_k \frac{gx}{2}\right) \sin\left(C_j \frac{gy}{2}\right)} \quad (\text{I.20})$$

A_{kj} et B_{kj} sont donnés à travers les conditions aux limites :

à la jonction ($z = 0$)

$$D \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} = Sf \delta(x, y, 0) \quad (\text{I.21})$$

à la jonction ($z = H$)

$$D \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=H} = -Sb \delta(x, y, H) \quad (\text{I.22})$$

I.8 : Etude de la densité de photocourant pour le modèle tridimensionnel

La densité de photocourant est donnée par l'équation suivante [17, 15, 21]

$$J = \frac{qD}{g_x g_y} \int_{-\frac{g_x}{2}}^{+\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{+\frac{g_y}{2}} \left[\frac{\partial \delta(x, y, z)}{\partial z} \right]_{z=0} dx dy \quad (\text{I.23})$$

I.9 : Etude de phototension pour le modèle tridimensionnel

L'expression de la phototension est donnée par la relation de Boltzmann [18, 15, 20, 21] :

$$V = V_T \ln \left(1 + \frac{N_b}{n_i^2} \cdot \delta \left(\frac{g_x}{2}, \frac{g_y}{2}, 0 \right) \right) \quad (\text{I.24})$$

I.10 : Etude de la tension de circuit ouvert pour le modèle tridimensionnel

L'expression générale de la tension de circuit ouvert est donnée par [15, 16, 17] :

$$V_{co} = V(Sf \leq 2 \cdot 10^2 \text{ cm.s}^{-1}) \quad (\text{I.25})$$

I.11 : Optimisation de la cellule

Un modèle mathématique a été développé pour mettre en œuvre l'optimisation des dimensions de la grille de collecte. Pour trouver un compromis entre l'effet de l'ombre et l'effet de la résistance série. Il existe trois sortes de perte dues à la résistance série : résistance de la couche émissive, résistance de la grille et résistance du contact métal/semi-conducteur [22, 23, 24]. L'ombrage de la grille contribue également à la perte de puissance.

Pour le calcul de ces pertes, un motif de grille linéaire était proposé. La cellule unitaire a une largeur $d/2$, une longueur L . La perte de cette cellule photovoltaïque comprenant un collecteur et n doigts est donnée par [25] :

$$P_T = P_e + P_{gav} + P_{subav} + P_b + P_F \quad (I.26)$$

P_e : Puissance dissipée dans l'émetteur (W)

P_{gav} : Puissance dissipée dans le doigt (W)

P_{busav} : Puissance dissipée dans le collecteur avant (W)

P_{cav} : Puissance dissipée dans le contact avant (W)

P_b : Puissance dissipée dans la base (W)

P_F : Perte liée au taux d'ombre (W).

Puissance dissipée dans l'émetteur est donnée par:

$$P_e = J^2 \cdot R_e \cdot L^2 \quad (I.28)$$

$$R_e = \frac{R_{se} \cdot d^2}{12 \cdot L^2} \quad (I.29)$$

$$R_{se} = \frac{\rho_c}{e} \quad (I.30)$$

R_e : Résistance de l'émetteur (Ω).

R_{se} : Résistance de la couche émettrice (Ω .carré).

d : Distance entre les doigts (cm).

L : Longueur de la cellule (cm).

J : Densité de courant ($A.cm^{-2}$).

e : Epaisseur de la grille (μm)

ρ_e : Résistivité de la couche ($\Omega.cm$)

Puissance dissipée dans la base est :

$$P_b = J^2 \cdot R_b \cdot L^4 \quad (I.31)$$

$$R_b = \frac{\rho^c \cdot W_b}{L^2} \quad (I.32)$$

R_b : Résistance de la base (Ω).

ρ_b : Résistivité de la base (Ωcm).

w_b : L'épaisseur de la base (cm).

Puissance dissipée dans le doigt est donnée comme suite :

$$P_{gav} = J^2 \cdot R_{gav} \cdot L^2 \quad (\text{I.33})$$

$$R_{gav} = \frac{d}{48} \cdot \frac{R_m}{W} \quad (\text{I.34})$$

$$R_m = \frac{\rho_m}{h} \quad (\text{I.35})$$

R_{gav} : Résistance de la grille avant (Ω).

R_m : Résistance du méta (Ω).

ρ_m : Résistivité du métal ($\Omega.\text{cm}$).

w : Largeur du doigt (μm).

h : Epaisseur du métal (cm).

Puissance dissipée dans le collecteur avant est donnée par:

$$P_{bus} = J^2 \cdot R_{bus} \cdot L^4 \quad (\text{I.36})$$

$$R_{bus} = \frac{r_{bus} \cdot d^2}{12 \cdot L \cdot w_{bus}} \cdot \left(\frac{L^2}{2 \cdot m^2 \cdot d^2} + 3 \cdot \frac{L}{2 \cdot m \cdot d} + 1 \right) \quad (\text{I.37})$$

$$r_{bus} = \frac{\rho_m}{h_{bus}} \quad (\text{I.38})$$

R_{bus} : Résistance du collecteur (Ω).

w_{bus} : Largeur du collecteur (cm).

m : Nombre de points de soudure sur les lignes de mesure du courant.

Puissance dissipée dans la résistance de contact est :

$$P_{cav} = J^2 \cdot R_{cav} \cdot L^4 \quad (\text{I.39})$$

$$R_{cav} = \frac{d}{2 \cdot L^2} \cdot L_T \cdot R_{cav} \cdot \cos th \left(\frac{w}{2 \cdot L_T} \right) \quad (\text{I.40})$$

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho^c}{R_{cav}}} \quad (\text{I.41})$$

R_{cav} : Résistance du contact avant (Ω).

L_T : Longueur de transfère de la densité de courant (cm).

ρ_c : Résistance de contact de la face avant ($\Omega.\text{cm}^2$).

Les pertes par effet d'ombre (ou pertes optique) sont causées par la présence de métal sur la surface supérieure de la cellule solaire. Qui empêche la lumière de pénétrer. Le chevauchement F également appelé taux d'ombre est le rapport entre la surface supérieur de la grille métallique et la surface totale de la cellule.

$$F = \frac{S_{rav}}{L^2} \quad (I.41)$$

$$F = \left(w + \frac{2 \cdot W_{bus} \cdot (d - w)}{L} \right) \cdot \frac{1}{d} \quad (I.42)$$

Puissance due par les pertes optiques est :

$$P_F = F \cdot I_m \cdot V_m \quad (I.43)$$

Avec

I_m : est le courant fourni par la cellule (A).

V_m : est la tension fournie par la cellule (V).

Puissance collectée par la cellule est :

$$P_{col} = P_{ed} - P_T \quad (I.41)$$

Avec :

P_{ed} : Puissance de la cellule éclairée ($W \cdot m^{-2}$).

P_T : Puissance totale dissipée par les pertes résistives et d'ombrage (W).

Sur le profil de la puissance collecté en fonction de la largeur du doigt, nous notons que le maximum de la puissance reçue est de 21 W, pour une puissance d'éclairage de $1300 W \cdot m^{-2}$. Elle correspond à une largeur de doigt égale à $60 \mu m$.

Conclusion.

Cette étude bibliographique donne une idée sur les méthodes de caractérisation des photopiles à base de silicium Polycristallin. Ces méthodes se fondent principalement sur des théories mathématiques permettant de caractériser quelques paramètres électriques de la cellule solaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire et d'évaluer les pertes de puissance au sein de la cellule solaire en présence des grilles de collection afin d'en déduire les dimensions optimales de la grille. En se basant sur cette étude bibliographique, nous allons étudier l'influence simultanée du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence sur les paramètres électriques mais aussi du taux d'ombre sur le taux de perte de puissance par conduction de même que l'effet de la largeur du doigt sur les paramètres optimaux.

CHAPITRE II :
ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR UNE PHOTOPILE AU
SILICIUM POLYCRISTALLIN EN REGIME STATIQUE.

Introduction.

Dans ce chapitre nous ferons une étude de modélisation et simulation à 3D d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage monochromatique.

Nous allons dans un premier temps présenter le modèle d'étude à partir duquel nous ferons une étude à trois dimensions de la photopile bifaciale. A travers cette étude, nous allons présenter l'outil utilisé puis nous donnerons l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base de la photopile pour un éclairage de la face avant. La résolution de cette équation de continuité en régime statique va nous permettre de déterminer l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base. A partir de cette expression de la densité de porteurs minoritaires que nous obtenons, les grandeurs telles que la densité de photocourant et la phototension seront déterminées. Nous en déduisons les expressions du courant de court-circuit et la phototension en circuit ouvert.

Les effets de la profondeur dans la base, du niveau d'éclairage, de l'angle d'incidence de l'éclairage et de la vitesse de recombinaison à la jonction sur ces grandeurs seront étudiés et discutés.

II.1.Présentation du modèle d'étude.

Notre étude porte sur une photopile à base de silicium Polycristallin. Le substrat Polycristallin est constitué par l'association de plusieurs grains de très petites tailles. Ces grains sont séparés par des zones de transition appelées joints de grains. Aussi, bien que chaque grain soit caractérisé par un arrangement tridimensionnel périodique des atomes, il n'y a pas de cohérence entre les orientations cristallines des différents grains de l'échantillon qui sont séparés par des zones de transition où l'arrangement atomique est perturbé [26]. Les joints de grain sont de grands centres de recombinaison, donc des facteurs influençant des paramètres macroscopiques et microscopiques de la photopile.

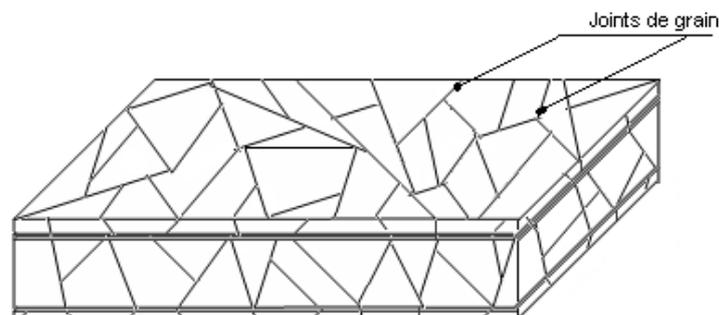


Figure II.1 : Schéma illustratif des joints de grain d'un silicium Polycristallin [26].

Comme le montre la figure II.1, les cristaux sont de tailles et de formes différentes. Ainsi, nous considérons dans notre modélisation que tous les grains ont une forme parallélépipédique et sont de même taille comme le montre la figure II.2.

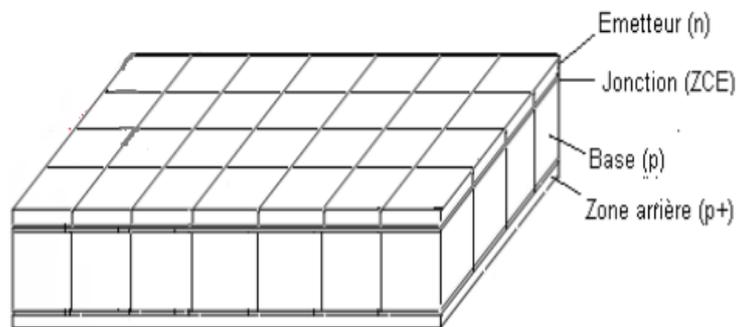


Figure II.2 : Schéma du modèle colonnaire des joints de grain d'un silicium Polycristallin [26].

Dans notre modèle, chaque grain a une forme parallélépipédique avec $g_x=g_y$ comme l'indique la figure II.3. Les plans de recombinaison sont les surfaces adjacentes de deux grains et sont localisés aux positions $x = \pm \frac{g_x}{2}$ et $y = \pm \frac{g_y}{2}$. Ces plans sont perpendiculaires aux axes (Ox) et (Oy) dans le système de coordonnées cartésiennes.

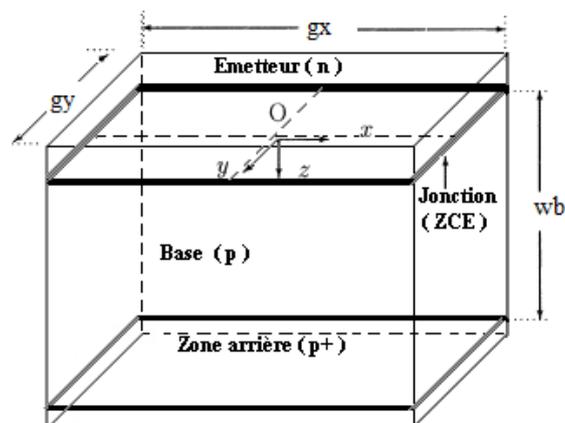


Figure II.3 : Schéma d'un grain de silicium de la photopile

La photopile bifaciale est composée de trois parties qui sont l'émetteur dopé (n), la base dopée (p) et la zone arrière surdopée (p⁺). Entre l'émetteur et la base se trouve la zone de charge d'espace (ZCE) où règne un champ électrique intense qui sépare les paires électron-trou arrivant à la jonction. Les porteurs de charge dans la base de la photopile peuvent se déplacer dans les trois directions. Le taux de génération des porteurs de la base à une position z est proportionnel à la quantité de lumière reçue à cette position. Le taux d'absorption de la lumière étant fonction de la profondeur de la base, il s'ensuit une génération non uniforme

dans le volume de la base. Le maximum de photogénération se fait dans la région proche de la surface éclairée puis se réduit progressivement quand on s'éloigne de cette région.

Ce gradient de concentration des porteurs le long de l'axe (Oz) fait apparaître un champ électrique de direction (Oz) que l'on suppose négligeable. La pénétration de la lumière se faisant le long de l'axe (Oz), la photogénération des porteurs se fait suivant cet axe. Par conséquent, nous considérons que la concentration des électrons est uniforme le long des axes (Ox) et (Oy).

La photopile est éclairée par la face avant. On considère que les rayons lumineux peuvent arriver suivant une inclinaison variable d'un angle θ comme illustre la figure suivante.

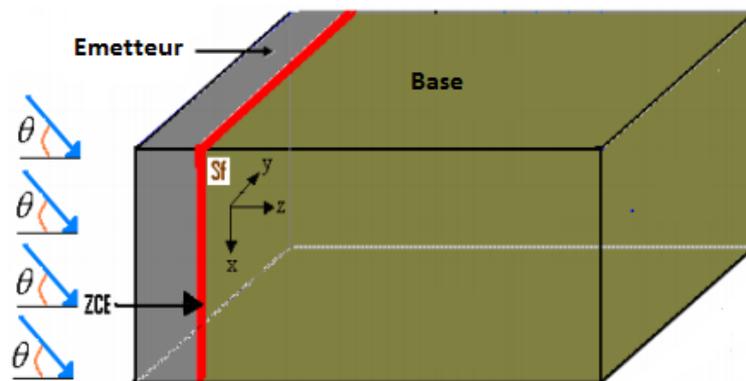


Figure (II.4) : Illustration de l'éclairage de la photopile

II.2 : Présentation du logiciel.

Mathcad est un produit de Math Soft Inc. C'est un logiciel permettant de réaliser des calculs scientifiques. Il permet en une étape de concevoir et de documenter le calcul technique.

En effet, Mathcad mixe dans un même document du calcul numérique, du calcul symbolique et des graphiques 2D et 3D tout en gérant les unités de mesures et insérant nos commentaires. C'est une boîte à outils polyvalente, facile à prendre en main avec les notations mathématiques standards. Ceci rend la note de calcul lisible et compréhensible permettant de réduire les erreurs de calculs. Il permet ainsi à une équipe d'échanger des documents et de collaborer de manière totalement transversale sur l'ensemble des corps de métiers.

La barre d'outils supérieure comprend neuf fenêtres. Ces fenêtres nous permettent d'entrer des formules mathématiques, symboles mathématiques, graphiques, programmations, etc. Nous pouvons choisir chacun au besoin ou afficher le menu contextuel en sélectionnant Math. En bas du menu des barres d'outils, se trouve une zone vide qui est la zone de travail qui nous permet de taper et d'évaluer l'expression mathématique, graphique, calcul symbolique et la saisie de texte ordinaire (Figure. II.6).

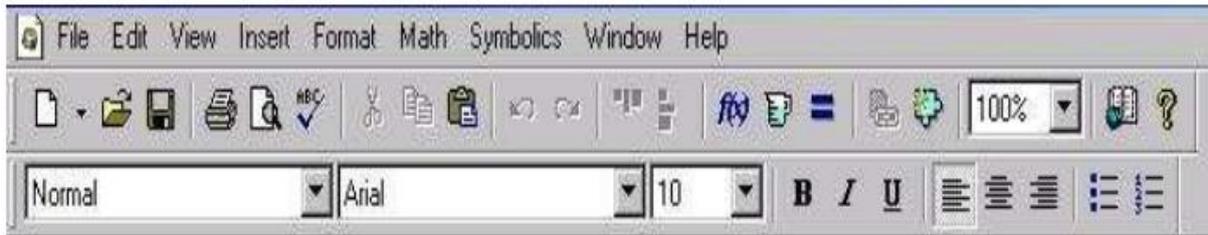


Figure. II.5 : Menu des barres d'outils.



Figure. II.6 : zone de travail dans Mathcad.

Après avoir présenté le logiciel de travail, nous allons passer à la théorie mathématique permettant d'obtenir les expressions des grandeurs physiques à étudier.

II.3 Etude théorique de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base.

Dans cette partie nous allons faire une étude théorique de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès. Nous nous attacherons, à partir du modèle tridimensionnel, d'établir l'équation de continuité de la concentration des électrons. Nous résolvons ensuite l'équation différentielle obtenue pour enfin donner l'expression de cette densité des porteurs minoritaires de charge en excès.

II.3.1.Taux de génération.

Lorsque la photopile est éclairée par une radiation convenable ($h\nu > E_g$), il y a créations de paires électron-trou sous une vitesse diminuant de façon exponentielle en profondeur de la base ; cette vitesse de génération est mesurée par le taux de génération G . En considérant que la réflexion est négligée, il est donné par la relation qui suit :

$$G(z) = \alpha \cdot n \cdot F_{ph} \cdot \cos \theta \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \quad (\text{II.1})$$

Avec : α Étant le coefficient d'absorption du matériau en cm^{-1} , donné dans l'intervalle de longueur d'onde λ appartenant à $[0,7 ; 1,04] \mu\text{m}$ par la relation ci-dessus :

$$\alpha = \left[\frac{84.732}{\lambda} - 76.417 \right] \text{cm}^{-1}; \alpha \text{ ne dépend ainsi que de la longueur d'onde [27].} \quad (\text{II.2})$$

F_{ph} représente l'intensité du flux incident en Watt (W) et z la profondeur dans la base en cm.

II.3.2. Taux de recombinaison.

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

Pour ce qui est des pertes en volume, le modèle linéaire de Schrockley-Read-Hall permet, en faible injection, d'en mesurer la vitesse par la donnée du taux de recombinaison $R(z)$:

$$R = \frac{\delta n}{\tau} \text{ En atomes.cm}^{-3}.\text{s}^{-1} [28]. \quad (\text{II.3})$$

δn : est la densité des porteurs minoritaires en excès.

τ : leur durée de vie.

II.3.3. Equation de continuité

Pour établir l'équation de continuité de la concentration des porteurs minoritaires dans la base, nous ferons les hypothèses suivantes :

- La contribution de l'émetteur est négligée [29].
- L'étude sera limitée à l'éclairage de la photopile par la face avant seule.
- L'éclairage par la face avant de la photopile sera uniforme. Nous aurons alors un taux de génération ne dépendant que de la profondeur z dans la base.
- La face avant qui reçoit le rayonnement est recouverte d'une couche antireflet (A.R.C : Antireflection coating) [30].
- Les vitesses de recombinaison aux joints de grains sont perpendiculaires à la jonction leur vitesse constante et indépendante du taux de génération sous un éclairage AM1,5. Les conditions aux limites aux joints de grains seront alors des équations différentielles linéaires à coefficients constants [30]
- Les porteurs sont réparties uniformément le long des axes (Ox) et (Oy) à chaque niveau de la profondeur de la base ; par conséquent, il n'existe pas de courant de conduction le long de ces axes : $E(x) = E(y) = 0$.

Ainsi l'équation de continuité en régime stationnaire suivant l'éclairement en face avant devient :

$$D_n \left[\frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \delta n}{\partial z^2} \right] - \frac{\delta n}{\tau} = -\alpha \cdot n \cdot F_{ph} \cdot \cos(\theta) \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \quad (\text{II.4})$$

D_n est le coefficient de diffusion en $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Comme nous pouvons le constater, cette équation prend bien compte des processus de diffusion, de génération et de recombinaisons en volume des porteurs dont nous faisons état précédemment.

II.3.4 Conditions aux limites

Les phénomènes de recombinaison surfacique auxquels les porteurs photocréés sont soumis, au niveau des faces de la photopile et des frontières du grain conduisent à considérer les conditions aux limites ci-dessous :

- ✓ A la jonction Emetteur-Base

$$D_n \cdot \left(\frac{\partial \delta n}{\partial z} \right)_{z=0} = S_f \cdot \delta n(x, y, 0) \quad (\text{II.5})$$

S_f est la vitesse de recombinaison à la jonction en $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

- ✓ En face arrière.

$$D_n \cdot \left(\frac{\partial \delta n}{\partial z} \right)_{z=H} = -S_b \cdot \delta n(x, y, H) \quad (\text{II.6})$$

S_b est la vitesse de recombinaison en face arrière en $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

- ✓ Aux joints de grains.

Les conditions aux limites prises aux joints de grain (frontière du grain), tiennent compte de l'effet de capture, sur les porteurs minoritaires, de ces interfaces au niveau desquelles règnent d'intenses champs électriques qui les attirent augmentant de fait leur taux de recombinaisons. Ces champs électriques sont caractéristiques des courbures de bandes existant à ce niveau et qui sont dues à des liaisons dépendantes, des dislocations ou tout simplement, des impuretés.

Les conditions aux limites proprement dites sont données par les équations (II.5) et (II.6)

$$D_n \cdot \left(\frac{\partial \delta n}{\partial x} \right)_{x=\mp \frac{g_x}{2}} = \pm S_{gb} \cdot \delta n(\mp \frac{g_x}{2}, y, z) \quad (\text{II.7})$$

$$D_n \cdot \left(\frac{\partial \delta n}{\partial y} \right)_{y=\mp \frac{g_y}{2}} = \pm S_{gb} \cdot \delta n(x, \mp \frac{g_y}{2}, z) \quad (\text{II.8})$$

Sgb est la vitesse de recombinaisons aux joints de grain en cm.s^{-1} ; g_x et g_y sont respectivement la longueur et la largeur du grain que nous prendrons, pour la suite égales à g . Quant aux signes \pm , ils découlent simplement du repère choisi au centre du grain.

II.3.5 Densité des porteurs minoritaires de charges en excès.

La densité des porteurs δn est solution de l'équation aux dérivées partielles elliptiques (II.4) dont la résolution pourrait se faire par l'approche des fonctions de Green. Dans cette étude, nous nous contenterons, seulement de présenter la solution générale donnée par l'équation :

$$\delta n(x, y, z) = \sum_k \sum_j Z_{kj} \cos(C_k x) \cos(C_j y) \quad (\text{II.9})$$

Où : Z_{kj} Est la dépendance en z de δn donnée par la résolution de l'équation différentielle (II.10), déduite de la condition d'orthogonalité des fonctions $\cos(C_k x)$ et $\cos(C_j y)$.

- Condition d'orthogonalité des fonctions $\cos(C_k x)$ et $\cos(C_j y)$

$$\int_{-g_x/2}^{+g_x/2} \cos(C_k x) \cos(C_m x) dx = 0 \text{ Pour } k \neq m \quad \text{Idem pour } \int_{-g_y/2}^{+g_y/2} \cos(C_j y) \cos(C_n y) dy = 0 \text{ } j \neq m \text{ et } n$$

étant des entiers.

Il vient donc de cette condition l'équation (II.10).

$$Z''_{kj} - \frac{1}{L_{kj}^2} Z_{kj} = D_{kj} \exp(-\alpha z) \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Où : } D_{kj} = -16 \cdot \alpha \cdot n \cdot Fph \cdot \cos \theta \times \frac{\sin\left(C_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \cdot \sin\left(C_j \cdot \frac{g_y}{2}\right)}{Dn \cdot \left(\sin\left(C_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) + C_k \cdot g_x\right) \cdot \left(\sin\left(C_j \cdot \frac{g_y}{2}\right) + C_j \cdot g_y\right)} \quad (\text{II.11})$$

Avec : L_{kj} est une pseudo-longueur de diffusion donnée par la relation suivante :

$$L_{kj} = \left(L_n^{-2} + C_k^2 + C_j^2\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{II.12})$$

L_n étant la longueur de diffusion volumique des électrons. Le qualificatif pseudo utilisé dans la nomination de L_{kj} , provient des coefficients c_k et c_j , relatifs à une diffusion surfacique (vers les frontières du grain), respectivement, suivant les directions x et y . Ces coefficients c_k et c_j seront déterminés à partir des équations transcendantes (II.13) et (II.14), déduites des conditions aux limites (II.5) et (II.6).

- Equations transcendantes

$$C_k \tan\left(C_k \frac{gx}{2}\right) = \frac{S_{gb}}{Dn} \quad (\text{II.13})$$

$$C_j \cdot \tan\left(C_j \cdot \frac{gy}{2}\right) = \frac{S_{gb}}{Dn} \quad (\text{II.14})$$

En définitive, l'expression de Z_{kj} est donnée par l'équation (II.10) :

$$Z_{kj} = A_{kj} \cdot \left[a_{kj} \cdot \cos\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) + b_{kj} \cdot \sin\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) - \exp(-\alpha \cdot z) \right] \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec : } A_{kj} = -D_{kj} \quad (\text{II.16})$$

a_{kj} et b_{kj} étant des coefficients déterminés à partir des conditions aux limites (II.5) et (II.6)

$$a_{kj} = \frac{(Dn \cdot \alpha + Sf) \left[\frac{Dn}{L_{kj}} \cdot \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + Sb \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right] - \left(\frac{\alpha \cdot Dn^2 - Sb \cdot Dn}{L_{kj}} \right)}{\frac{Dn}{L_{kj}} \cdot \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \cdot (Sb + Sf) + \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \cdot \left(\frac{Dn^2}{L_{kj}^2} + Sb \cdot Sf \right)} \quad (\text{III.17})$$

$$b_{kj} = Sf \cdot \frac{L_{kj}}{Dn} \cdot (a_{kj} - 1) - \alpha \cdot L_{kj} \quad (\text{III.18})$$

La densité des porteurs minoritaires en profondeur de la base est donnée par la moyenne de $\delta n(x, y, z)$ établie à la surface $gx \times gy$ définissant le contour du grain ; soit donc :

$$\delta n(z) = \frac{1}{g_x g_y} \cdot \int_{-gx/2-gy/2}^{+gx/2+gy/2} \int \delta n(x, y, z) dx dy \quad (\text{II.19})$$

En somme l'expression de $\delta n(z)$ est donnée par la relation (II.18)

$$\delta n(z) = \frac{4}{g_x g_y} \sum_k \sum_j Z_{kj} \times \frac{\sin\left(C_k \cdot \frac{gx}{2}\right) \sin\left(C_j \cdot \frac{gy}{2}\right)}{C_k \cdot C_j} \quad (\text{II.20})$$

Z_{kj} Étant la dépendance en z de $\delta n(z)$ donnée ci-haut.

Ce calcul que nous venons d'effectuer a pour unique finalité une meilleure représentation de l'effet des paramètres comme la profondeur, l'ensoleillement et l'angle d'incidence sur la distribution des porteurs dans la base.

II.4 : Etude de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès.

Après avoir établi l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de notre modèle tridimensionnel de photopile au silicium polycristallin, nous nous

attacherons maintenant à l'étude de son comportement par rapport à l'influence de la profondeur, du niveau d'éclairement et d'angle d'incidence.

II.4.1 : Influence du niveau d'éclairement et de la profondeur sur la densité de porteurs minoritaire en excès dans la base.

La figure (II.7) met en évidence l'influence de la profondeur (z) et du niveau d'éclairement sur la densité des porteurs minoritaires de la jonction.

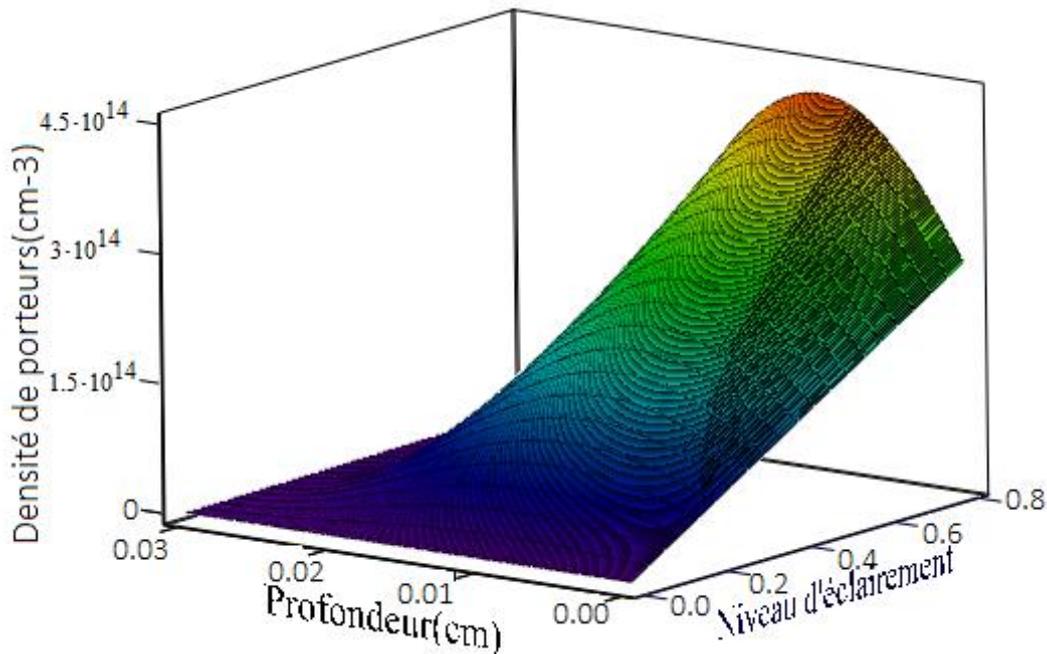


Figure (II.7) : Profil de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base en fonction de la profondeur et du niveau d'éclairement : $S_f = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $S_b = 2 \cdot 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $S_{gb} = 3 \cdot 10^3$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $g = 0.019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{S}$, $\Theta = 0 \text{ radian}$.

La figure (II.7) montre pour un éclairement par la face avant, le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur présente trois régions :

- Une première région proche de la jonction où le gradient de la densité des porteurs est positif. Les porteurs situés dans cette région sont susceptibles d'être renvoyés à la jonction afin de la traverser pour participer à la production du photocourant.
- Une seconde région correspondant au maximum de la courbe où le gradient des porteurs est nul.
- Une troisième région où le gradient des porteurs est négatif. Les porteurs situés dans cette région ne disposent pas d'assez d'énergie pour remonter la base et participer au photocourant. Ils se recombinent en volume et en face arrière [7].

Nous notons une augmentation de la densité des porteurs en fonction du niveau d'éclairement. L'éclairement intensif de la photopile augmente à la fois le nombre de porteurs photogénérés et le nombre de porteurs capables d'atteindre la jonction [10].

Nous allons dans le paragraphe suivant étudier l'influence de l'angle d'incidence et de la profondeur sur le profil de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans le volume de la base.

II.4.2 : Influence de l'angle d'incidence et de la profondeur sur la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base.

Sur la figure (II.8) le profil de la densité des porteurs de charge en fonction de la profondeur dans la base et l'angle d'incidence du rayonnement, pour un éclairement de la face avant est présenté.

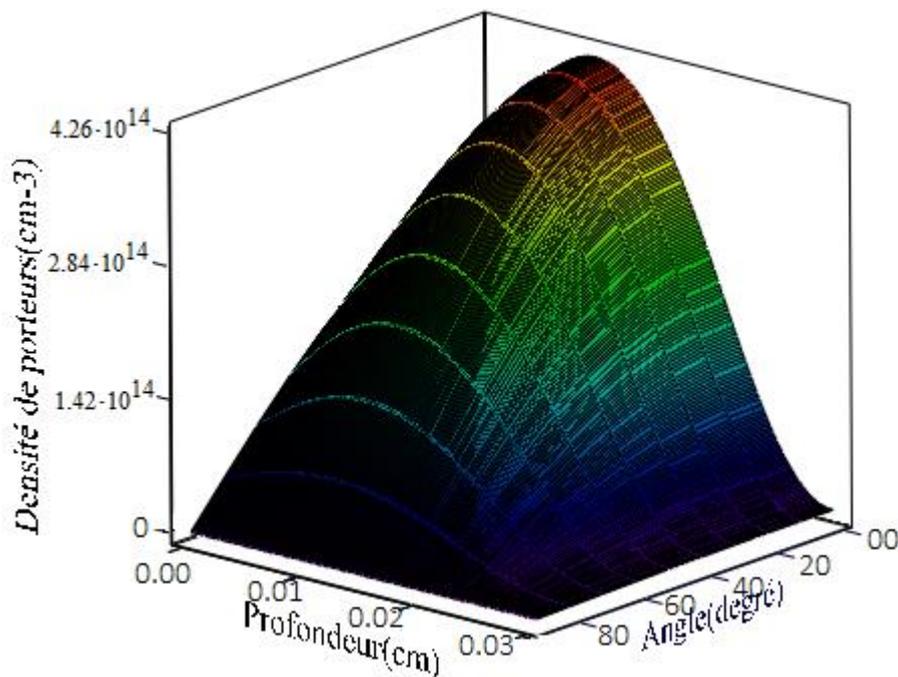


Figure (II.8) : Profil de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base en fonction de la profondeur et l'angle d'incidence : $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_b = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.995 \text{ nm}$, $g = 0.019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $n=1$.

Nous observons sur la Figure (II.8) que la densité des porteurs photogénérés diminue de la zone proche de la jonction vers la profondeur de la photopile. Par contre elle diminue lorsque l'angle d'incidence augmente [18]. Cela s'explique par le fait que toute augmentation de l'angle d'incidence signifie que la composante normale (perpendiculaire à la jonction) provoque des baisses d'éclairage et affecte négativement la génération de porteurs dans le volume de la base.

II.4.3 : Effet combiné du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur la densité des porteurs minoritaire dans la base.

Pour mieux apprécier les influences combinées de l'ensoleillement et de l'angle d'incidence sur la densité des porteurs minoritaires dans le volume de la base, nous présentons à la figure (II.9) sa variation en fonction du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence.

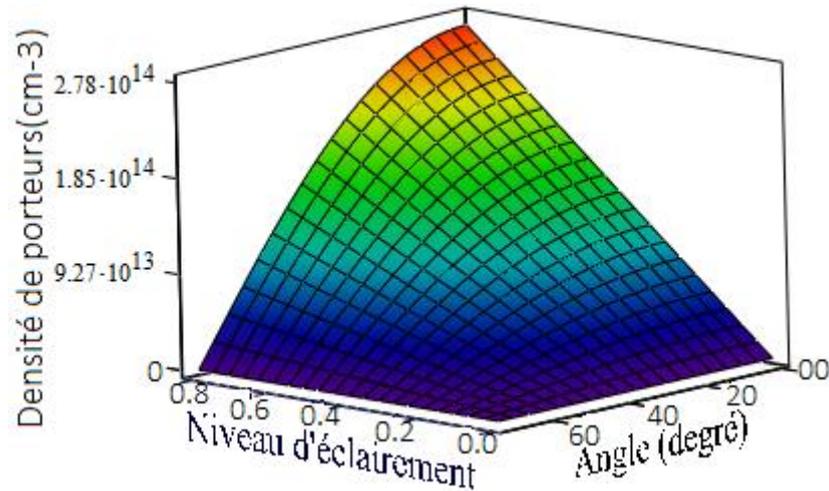


Figure (II.9) : Profile de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base en fonction du niveau d'éclairement (n) et d'angle incidence (Θ) : $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_b = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0,995 \text{ nm}$, $g = 0.019$, $z = 0.0001 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

La figure (II.9) nous montre que la densité de porteurs minoritaires dans le volume de la base croît linéairement avec le niveau d'éclairement pour un angle variant entre 90° C à 0° C. Cela confirme ce qui a été dit précédemment, l'intensification du niveau d'éclairement augmente le nombre de porteurs photogénérés dans le volume de la base et donc le nombre de porteurs pouvant atteindre la jonction. Ce qui explique l'augmentation de la densité des porteurs minoritaires dans la base. Nous notons aussi une diminution de la densité des porteurs lorsque l'angle d'incidence augmente. Cela s'explique par le fait que toute augmentation de l'angle d'incidence signifie que la composante normale provoque des baisses d'éclairage et affecte négativement la génération de porteurs dans la base.

Ainsi, nous avons une forte diminution (environ 67%) de la densité des porteurs lorsque l'on passe de la zone correspondante à $n \geq 0,7$ et $\Theta \leq 20^\circ$ à la zone correspondante à $n \leq 0,3$ et $\Theta \geq 40^\circ$.

Nous allons dans la partie suivante, faire une étude de la densité de photocourant pour la photopile bifaciale soumise à un éclairage monochromatique par face avant.

II.5 : Etude de la densité de photocourant.

Dans ce paragraphe, nous ferons une étude de la densité de photocourant. L'expression de cette densité de photocourant sera établie puis étudiée en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, du niveau d'éclairement et de l'angle incidence.

II.5.1 : Expressions de la densité de photocourant.

La fraction de la lumière absorbée par la photopile provoque la création de paires électron-trou dans l'émetteur et aussi dans la base. Les porteurs libres ne sont plus uniformément distribués, mais sont plutôt soumis à un processus général de diffusion, de migration et de recombinaison. Le mouvement de ces charges s'effectue dans un sens qui tend à uniformiser leur distribution spatiale en charge électrique.

Les porteurs ayant échappé aux processus de recombinaison sont collectés par les grilles et conduits au circuit extérieur pour la production du courant.

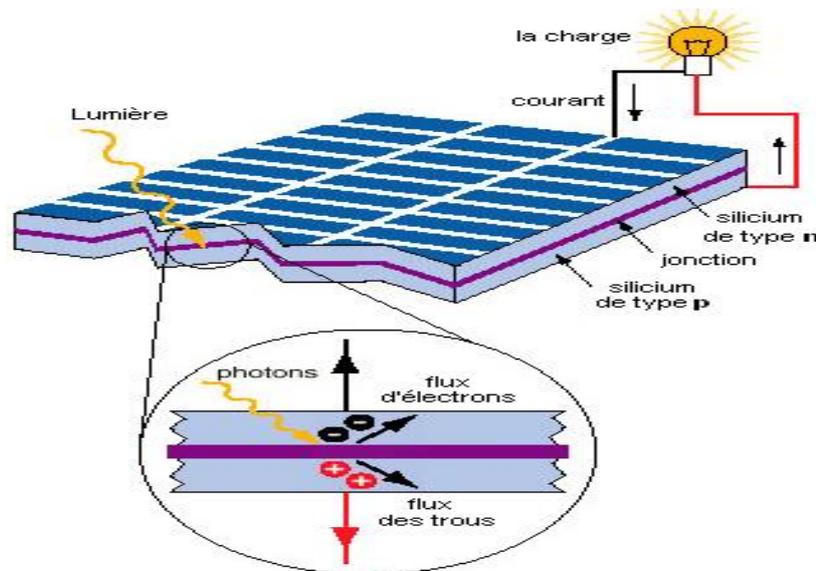


Figure (II.10) : Schéma illustratif du fonctionnement d'une photopile sous éclairement [30]

L'expression générale de la densité de photocourant pour l'éclairement de la face avant est définie par la relation suivante [30] :

$$J_{ph} = \frac{q \cdot Dn}{g_x \cdot g_y} \cdot \int_{-\frac{g_x}{2}}^{\frac{g_x}{2}} \int_{-\frac{g_y}{2}}^{\frac{g_y}{2}} \left. \frac{\partial \delta n}{\partial z} \right|_{z=0} dx \cdot dy \quad (\text{II.21})$$

En définitive la densité de photocourant global est donnée par l'équation (II.22)

$$J_{ph} = \frac{4 \cdot q \cdot Dn}{gx \cdot gy} \times \sum_k \sum_j \cdot A_{kj} \cdot \left[\frac{b_{kj}}{L_{kj}} + \alpha \right] \times \frac{\sin\left(C_k \cdot \frac{gx}{2}\right) \cdot \sin\left(C_j \cdot \frac{gy}{2}\right)}{C_k \cdot C_j} \quad (\text{II.22})$$

Où q est la valeur absolue de la charge de l'électron.

II.5.2 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'enseillement sur le photocourant.

La figure (II.11) nous montre l'influence de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f), et de l'enseillement sur le profil du photocourant.

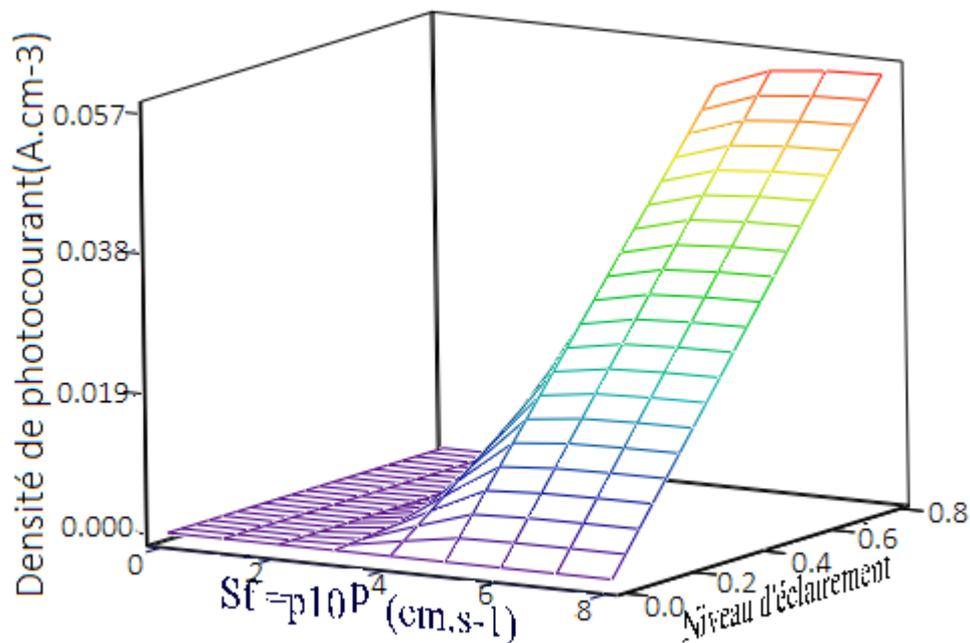


Figure (II.11) : Profile de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et du niveau d'éclairement : $S_f(p) = p \cdot 10^p \text{ cm.s}^{-1}$, $S_b = 2 \cdot 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $g = 0.0019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $Dn = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\Theta = 0^\circ$.

Nous constatons sur cette figure, que la densité de photocourant est presque nulle pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaisons à la jonction ($S_f \leq 2 \cdot 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$). Cela traduit le fonctionnement en circuit ouvert : très peu de porteurs traversent la jonction pour rejoindre le circuit extérieur. Nous notons ensuite une augmentation progressive du photocourant jusqu'à une valeur maximale correspondant au photocourant de court-circuit, ceci pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction ($S_f \geq 6 \cdot 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$) [10]. L'état de court-circuit est une situation de transfert quasi-total vers l'émetteur de tous les électrons photogénérés dans la base et parvenant à la jonction. Ensuite nous notons que la densité des porteurs augmente linéairement avec l'enseillement. Cela s'explique non seulement par

l'augmentation de la quantité de porteurs photocréés dans la base de la photopile mais aussi par celle du nombre de porteurs qui arrivent à la jonction pour participer au photocourant [10,11].

L'influence de l'éclairement sur la densité de photocourant n'est presque pas ressentie pour les faibles valeurs de vitesse de recombinaison à la jonction S_f . En effet pour ces vitesses de recombinaison à la jonction la photopile fonctionne en circuit ouvert. Donc même si on augmente le niveau d'éclairement, cela n'aura pas d'influence sur la densité de photocourant.

Nous allons, dans le paragraphe suivant, étudier l'influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et l'angle d'incidence sur le profil du photocourant.

II.5.3 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'angle d'incidence sur la densité de photocourant.

La figure (II.12) nous montre l'influence de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f) et de l'angle d'incidence sur le photocourant.

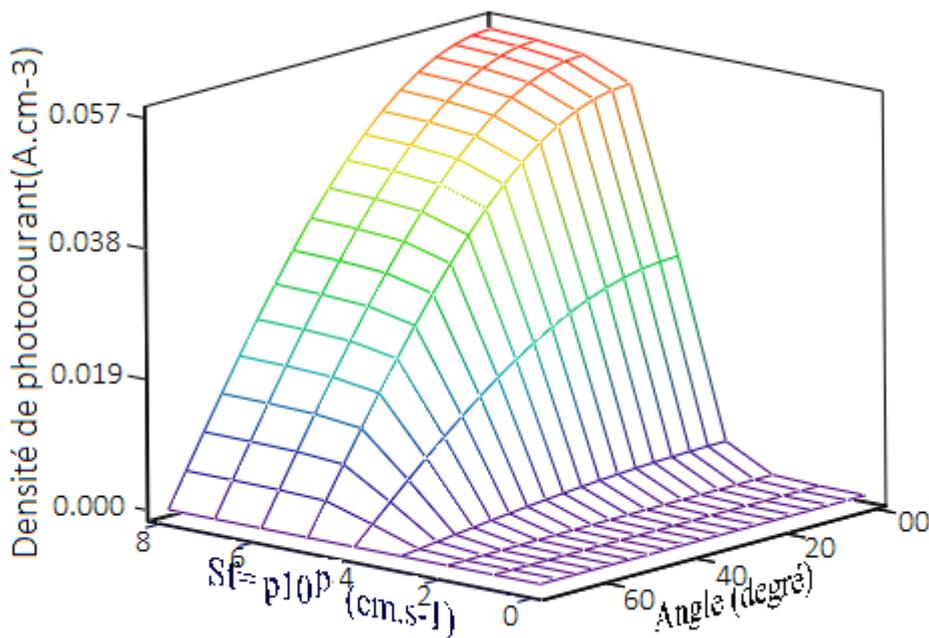


Figure (II.12) : Profile de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et l'angle d'incidence: $S_b = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $g = 0.0019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $n = 1$.

Nous observons sur cette figure le même phénomène que précédemment sur l'effet de (S_f). C'est à dire une augmentation de la densité de photocourant avec la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f). Mais elle diminue quand l'angle d'incidence augmente à condition que S_f

soit supérieure à 2.10^2 cm.s^{-1} . Cette diminution s'explique à la fois par une diminution du nombre de porteurs photogénérés et du nombre de porteurs capable d'atteindre la jonction et capable de participer au photocourant.

L'influence du niveau d'éclairement sur le photocourant n'est pas ressentie lorsqu'on est en circuit ouvert. Elle est plus élevée lorsqu'on est en situation de court-circuit ($S_f \geq 6.10^6 \text{ cm.s}^{-1}$). Nous avons dans cette situation une variation de la densité de photocourant de 0 à 0,057 lorsque l'angle d'incidence passe de 90° à 0° .

Pour mieux apprécier l'influence du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur la densité de photocourant, nous étudions leurs effets combinés sur celle-ci.

II.5.4 : Influence du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur le photocourant.

La figure (II.13) nous montre l'influence du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur la densité de photocourant.

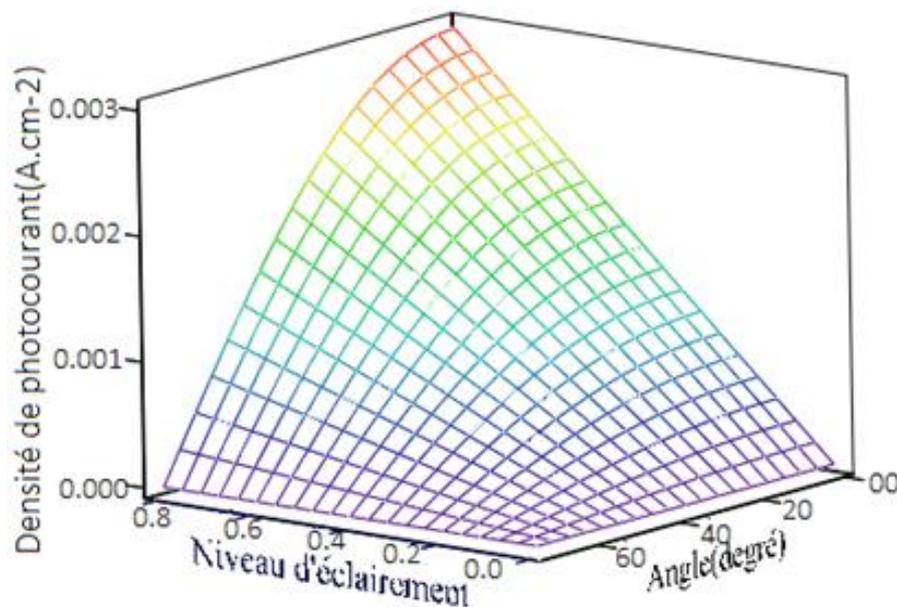


Figure (II.13) : Profile de la densité de photocourant en fonction du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence: $S_f = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_b = 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $g = 0.0019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

La figure (II.13) permet de voir que pour $n \leq 0.4$ et $\Theta \geq 40^\circ$, nous avons une forte diminution du photocourant qui est due aux effets combinés de ces deux paramètres. Par contre pour $n \geq 0.6$ et $\Theta \leq 20^\circ$, nous avons une forte augmentation de la densité de photocourant.

La densité de photocourant recueillie peut doubler quand on passe de la première zone à la deuxième.

Ce qui nous laisse entendre que plus le nombre de porteurs photogénérés augmente, plus la production de photocourant est importante. Nous constatons aussi qu'une augmentation de l'angle d'incidence correspond à une diminution du niveau d'éclairement sur notre photopile. Le photocourant fourni par la cellule se dégrade fortement pour un angle d'incidence supérieur à 60° et cela quelque soit le niveau d'éclairement.

Dans la partie suivante, nous allons faire une étude de la densité de courant de court-circuit de la photopile car étant une grandeur caractéristique intrinsèque permettant d'apprécier la photopile.

II.5.5 : Etude du photocourant de court-circuit.

Sur les figures (II.11) et (II.12) nous notons, pour de très grandes valeurs de (Sf), que les allures du photocourant tracé en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, prennent des valeurs asymptotiques correspondantes au courant de court-circuit. Mathématiquement, ce courant de court-circuit est déterminé par la limite suivante :

$$J_{cc} = \lim_{Sf \rightarrow \infty} J_{ph} \quad (II.23)$$

En considérant l'expression (II-12) de J_{ph} nous obtenons :

$$J_{cc} = \frac{4qDn}{g_x g_y} \times \sum_k \sum_j A_{kj} [C_{kj} + \alpha] \frac{\sin\left(C_k \frac{gx}{2}\right) \sin\left(C_k \frac{gy}{2}\right)}{C_k C_j} \quad (II.24)$$

Où D_{kj} est donné par la relation qui suit :

$$C_{kj} = \frac{(Sb - \alpha Dn) \cdot \exp(-\alpha H) - \left[\frac{Dn}{L_{kj}} \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + Sb \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right]}{\frac{Sb}{L_{kj}} \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + \frac{Dn}{L_{kj}} \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right)} \quad (II.25)$$

La variation du photocourant de court-circuit en fonction de l'ensoleillement et l'angle d'incidence est illustrée à la figure (II-14).

Nous notons sur cette figure que le niveau d'éclairement et l'angle d'incidence ont les mêmes effets que sur le photocourant. La seule différence est que l'amplitude du courant de court-circuit est plus importante.

Nous allons dans le paragraphe qui suit faire une étude du profil de la phototension.

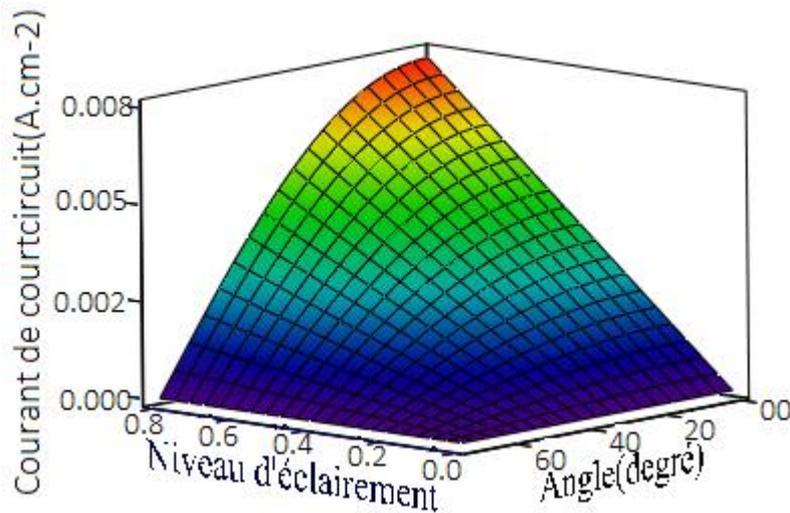


Figure (II-14) : Profile de la densité de photocourant de court-circuit en fonction du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence. $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $S_{gb} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $g = 0.0037 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$.

II.6 : Etude de la phototension

Dans ce paragraphe, nous ferons une étude de la phototension de la photopile. Son expression sera établie et étudiée en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur la phototension.

II. 6.1 : Expressions de la phototension.

La phototension caractérise la barrière de potentiel présente au niveau de la jonction émetteur-base. Son expression générale est donnée dans l'hypothèse de l'approximation de BOLTZMANN par :

$$V_{ph} = V_T \cdot \text{Log} \left[\frac{N_B}{n_i} \cdot \delta n(0) + 1 \right] \quad (\text{II.26})$$

$$\text{Avec : } \delta n(0) = \frac{1}{g_x g_y} \int_{-g_x/2}^{g_x/2} \int_{-g_y/2}^{g_y/2} \delta n(x, y, 0) dx dy \quad (\text{II.27})$$

V_T : Représente la tension thermique : $V_T = \frac{k_B T}{q}$; ($V_T = 26 \text{ mV}$ à $T = 300\text{K}$)

K_B : Constante de BOLTZMANN et est égale à $1.38.10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$

N_B : Taux de dopage de la base en atome d'impureté et est égale à 10^{17} cm^{-3} .

n_i : Concentration intrinsèque des porteurs dans la base et est égale à $1.55.10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

L'expression de la phototension est ainsi donnée par :

$$V_{ph} = V_T \cdot \text{Log} \left[\frac{4 \cdot N_B}{n_i^2 \cdot g_x \cdot g_y} \cdot \sum_k \sum_j A_{kj} (a_{kj} - 1) \times \frac{\sin\left(C_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \sin\left(C_j \cdot \frac{g_y}{2}\right)}{C_k \cdot C_j} + 1 \right] \quad (\text{II.28})$$

Nous allons, dans la partie suivante, faire une étude de l'effet de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf, du niveau d'éclairement et de l'angle incidence sur la phototension de la photopile.

II.6.2 Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'ensoleillement sur la phototension.

La figure (II.15) nous montre l'influence de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) et de l'ensoleillement sur la phototension.

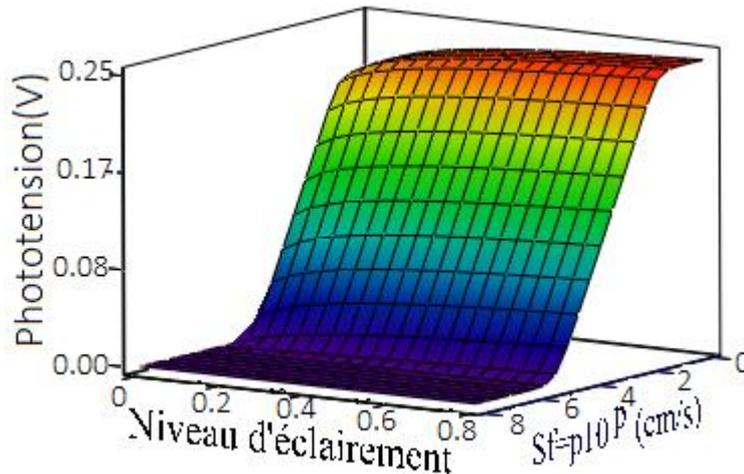


Figure (II.15) : Profile de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et du niveau d'éclairement: $S_b = 4 \cdot 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $g = 0.0019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\Theta = 0^\circ$.

Nous constatons, que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension reste pratiquement constante et maximale, traduisant la situation de circuit ouvert où les porteurs de charges sont stockés à la jonction puis au fur et à mesure que le flux de porteurs à travers la jonction ($S_f > 2 \cdot 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$) augmente, les porteurs stockés sont utilisés et la phototension diminue progressivement jusqu'à presque s'annuler, correspondent au fonctionnement de la photopile en court-circuit ($S_f \geq 6 \cdot 10^6 \text{ cm.s}^{-1}$) [10]. On note également une augmentation de la phototension avec l'intensité de la lumière [11]. En effet les porteurs dans le volume de la base et le nombre de porteurs parvenant à la jonction croît avec le niveau

d'éclairement de la lumière car lorsque cette dernière augmente nous avons un supplément d'énergie permettant d'augmenter des porteurs photogénérés. De ce fait, l'augmentation du niveau d'éclairement augmente à la fois le nombre de porteurs photogénérés et le nombre de porteurs capables d'atteindre la jonction pour participer à la phototension, ce qui explique son augmentation avec l'ensoleillement [11].

Nous allons dans le paragraphe suivant étudier l'influence de l'angle d'incidence et de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la phototension.

II.6.3 : Influence de la vitesse de recombinaison à la jonction et de l'angle d'incidence sur la phototension.

La figure (II.16) nous montre l'influence de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f), et de l'angle d'incidence sur la phototension.

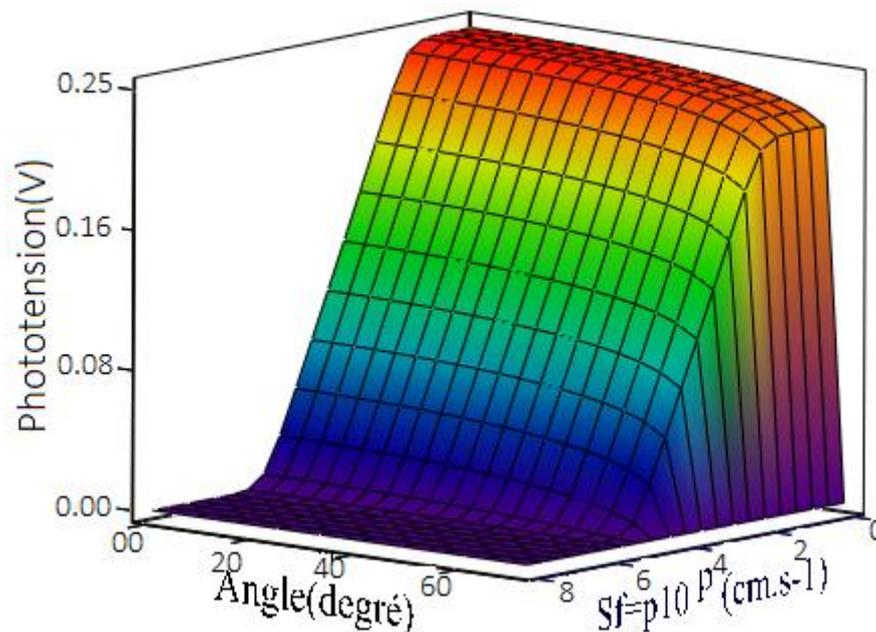


Figure (II.16) : Profile de la phototension en fonction de l'angle d'incidence et de la vitesse de recombinaison à la jonction : $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $g = 0.0019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$, $n = 1$.

Nous constatons sur la Figure (II.16) que la phototension diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction. Quel que soit le point de fonctionnement de la photopile (de circuit ouvert à court-circuit), nous avons une légère diminution de la phototension pour un angle d'incidence allant de 0 à 60 °. Elle tend à s'annuler lorsque Θ tend vers 90°.

Pour mieux apprécier la variation de la tension en fonction de l'angle d'incidence, nous représentons son profil en fonction de Sf pour différents angles Θ sur la figure (II.17).

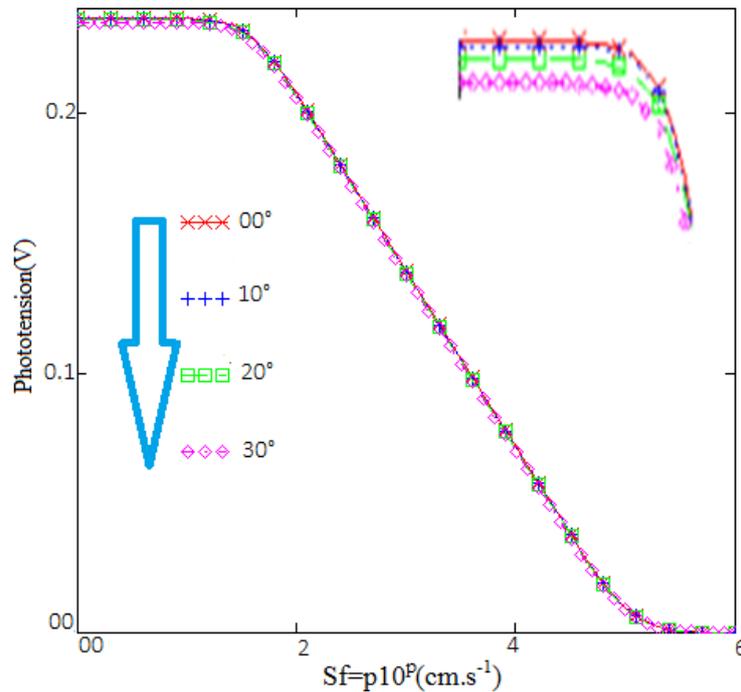


Figure (II.17) : Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

Sur cette figure, nous avons l'impression que nos quatre courbes sont superposées. Après avoir fait un zoom sur ces allures nous verrons que l'angle d'incidence a une faible influence sur la phototension [7, 8].

Nous allons, dans le paragraphe suivant, faire une étude de l'effet du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur la phototension de la photopile bifaciale pour un éclairement de la face avant.

II.6.4 : Influence du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur la phototension

La figure (II.18) nous montre l'influence du niveau d'éclairement, et de l'angle d'incidence sur la phototension.

Sur cette Figure nous notons une légère augmentation de la phototension en fonction du niveau d'éclairement. Cette observation confirme qu'une intensification de l'éclairement augmente la photogénération mais aussi le mouvement des porteurs vers la jonction par sa pénétration profonde en conséquence augmente la phototension. Aussi, quel que soit le niveau d'éclairement, la phototension tend vers zéro lorsque l'angle d'incidence tend vers 90° . En

effet à 90° tout le rayonnement est constitué que par la composante normale dont les effets néfastes sont expliqués plus haut.

Pour ce qui suit, nous allons faire une étude sur la phototension en circuit ouvert car étant une grandeur caractéristique intrinsèque permettant aussi d'apprécier la photopile.

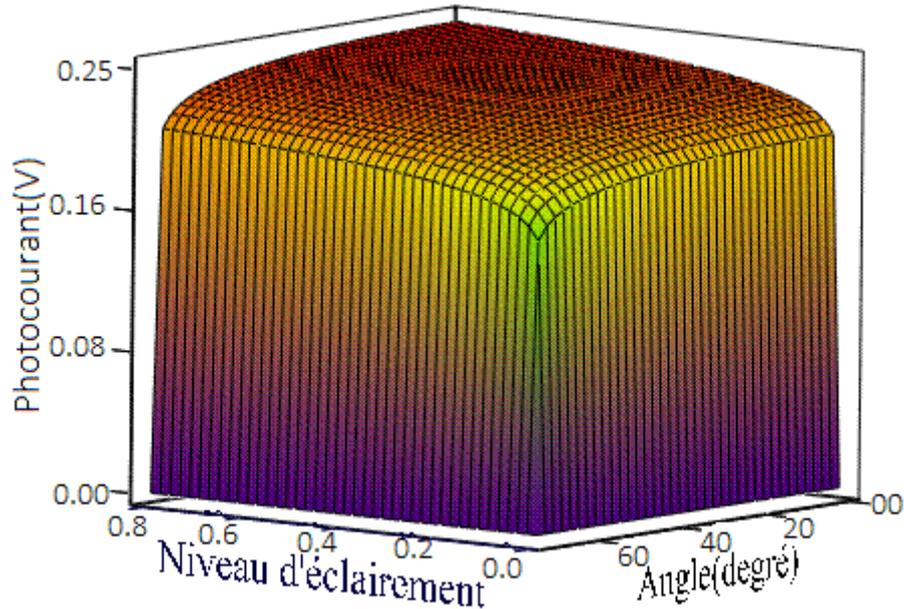


Figure (II.18) : Profile de la phototension en fonction du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence : $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_{gb} = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $g = 0.0019 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $D_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$.

II.6.5 : Etude de la tension en circuit-ouvert

Le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction est caractérisé, comme on peut l'observer sur les figures (II.9) et (II.10), par un palier remarquable pour des valeurs de S_f faibles. Ce palier définit la phototension en circuit-ouvert V_{phCO} donnée par la relation (II.7).

$$V_{phCO} = \lim_{S_f \rightarrow 0} V_{ph} \quad (II.30)$$

Nous déduisons l'expression de la tension de circuit ouvert :

$$V_{ph} = V_T \text{Log} \left[\frac{4N_B}{n_i^2 g x g y} \sum_k \sum_j A_{kj} (E_{kj} - 1) \frac{\sin\left(C_k \frac{gx}{2}\right) \sin\left(C_j \frac{gy}{2}\right)}{C_k C_j} + 1 \right] \quad (II.31)$$

Où E_{kj} est donné par l'expression ci-dessous :

$$E_{kj} = \frac{Dn\alpha \left(\frac{Dn}{L_{kj}} \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + Sb \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right) - \left(\frac{\alpha Dn^2 - SbDn}{L_{kj}} \right) \exp(-\alpha H)}{\frac{Dn}{L_{kj}} Sb \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + \frac{Dn^2}{L_{kj}^2} \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right)} \quad (\text{II.32})$$

Pour apprécier l'effet combiné des paramètres de l'éclairement que sont le niveau d'éclairement et l'angle d'incidence de l'éclairement sur la phototension en circuit ouvert, son profil en fonction de ces deux paramètres est représenté sur la figure (II.19).

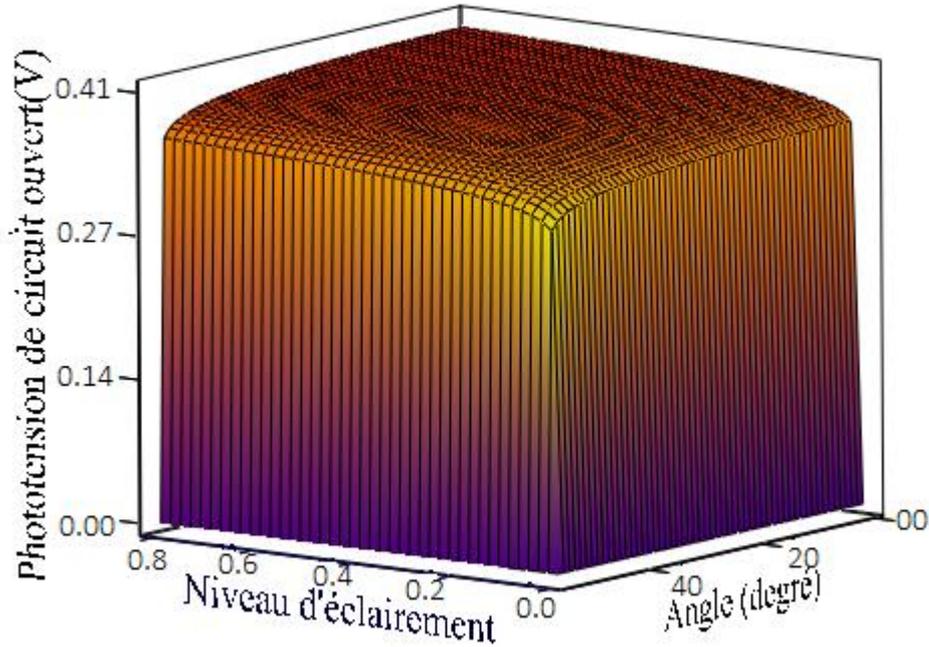


Figure (II.19) : Profile de la phototension en Circuit ouvert en fonction du niveau d'éclairement et l'angle d'incidence. $Sb = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $\lambda = 0.750 \text{ nm}$, $Sgb = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $g = 0.0037 \text{ cm}$, $H = 0.03 \text{ cm}$, $Dn = 26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$.

Sur cette figure, nous notons que l'angle d'incidence et le niveau d'éclairement ont une influence très faible sur la tension en circuit ouvert si ($n \neq 0$ et $\Theta \neq 90^\circ$). Elle tend vers zéro pour $n = 0$ et/ou $\Theta = 90^\circ$.

Conclusion.

A partir de la modélisation et d'une théorie mathématique, nous avons obtenu l'expression de la densité des porteurs en excès dans la base de la cellule et déduit les expressions de la densité de photocourant, de la phototension, du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert.

L'étude à trois dimensions du profil des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, de la densité de photocourant, de la densité de courant de court-circuit, de la phototension et de la phototension à circuit ouvert de photopile bifaciale soumis à un éclairage monochromatique a été faite en plusieurs étapes compte tenu de sa structure.

Nous pouvons donc retenir que l'augmentation du niveau de l'éclairage augmente considérablement le nombre de porteurs de charges, le photocourant, le courant de court-circuit. Mais ces paramètres influent faiblement sur la phototension et la phototension de circuit ouvert. Cette étude nous a permis d'apprécier l'effet de ces deux paramètres (n et Θ) sur quelques paramètres électriques de la cellule solaire à travers les processus phénoménologiques s'y déroulant.

Nous allons, dans le chapitre suivant, faire une étude comparative de l'effet de la métallisation de la face avant de quelques cellules solaires ayant des géométries différentes.

CHAPITRE III :

EFFET DE L'OMBRAGE DU AUX GRILLES DE COLLECTE DE LA FACE AVANT D'UNE CELLULE SOLAIRE

Introduction

La métallisation de la cellule solaire est l'une des étapes essentielles dans sa fabrication. Avec l'absence de matériaux semi-conducteur simultanément transparents et suffisamment conducteur, nous sommes amenés pratiquement à collecter les porteurs sur une grille métallique n'utilisant qu'une très faible partie de la surface métallique de la cellule [30]. Le rôle de cette grille est de collecter les porteurs de charge photogénérés. Elle doit permettre de réduire la résistance série de la couche diffusée et d'amener le courant le plus directement possible au contact assurant la connexion entre les cellules unitaires [31].

En plus, avec l'utilisation massive de l'énergie solaire dans les travaux domestiques, nous notons de plus en plus l'exploitation des façades de bâtiments pour poser des cellules photovoltaïques, tenant compte de l'esthétique de ces derniers à travers la géométrie des grilles. Tout cela a conduit à une multiplication des structures de grilles.

Dans le souci d'optimiser les dimensions géométriques de la grille de collection afin de minimiser les pertes de puissance, donc d'améliorer le rendement de conversion, plusieurs études sont menées. En effet le taux d'ombrage dû aux grilles constitue une sorte de perte mais sa minimisation ne doit pas se faire au détriment de la collecte des porteurs photogénérés. Pour cela un compromis est nécessaire entre le taux d'ombre et le taux de perte de puissance par conduction [31, 24].

Dans ce chapitre, nous allons faire une étude comparative sur quelques cellules de structures métalliques différentes. L'influence de l'écartement entre les doigts de collection des porteurs sur le taux de perte par conduction et le taux d'ombrage dû à la métallisation est étudiée.

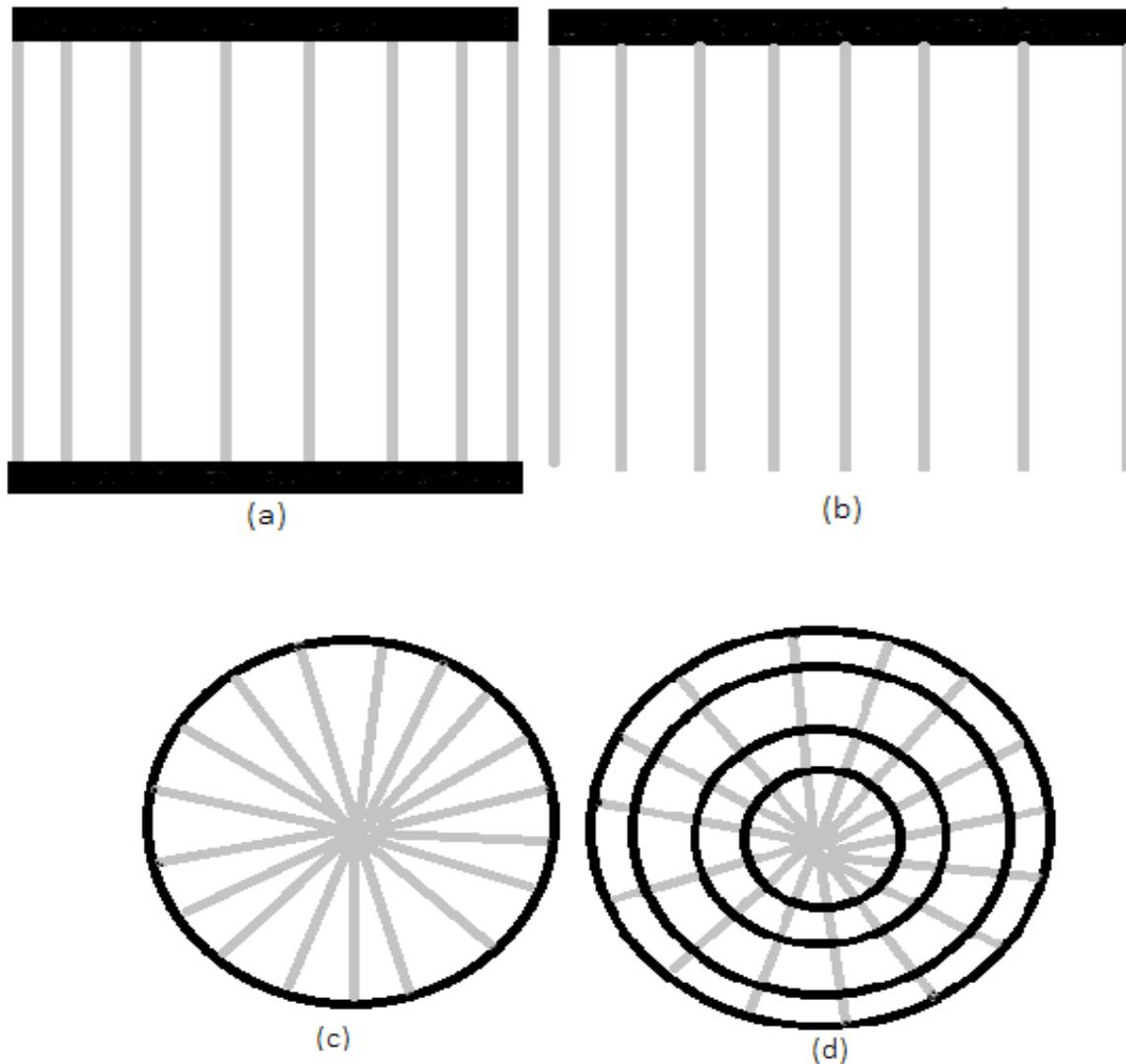
L'effet de la largeur des doigts de collecte sur le taux de conduction et le taux d'ombrage optimaux est aussi étudié. Cela va nous permettre de faire une comparaison des quatre structures de métallisation choisies.

III.1 : Présentation des cellules

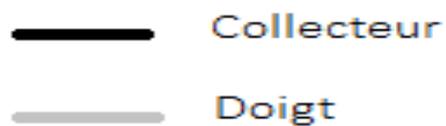
De nos jours, nous retrouvons dans la littérature plusieurs sortes de structures de métallisation de la face avant des cellules solaires photovoltaïques. Ces géométries de la métallisation dépendent souvent de la géométrie de la cellule elle-même.

Napoli et al [32] ont montré qu'une structure croisée de ligne de grille est toujours moins performante que la structure en lignes droites. Sachant qu'en générale nous retrouvons dans le marché des cellules de forme différentes (carrée ou circulaire), il serait nécessaire de faire une

comparaison qualitative plus vaste de ces structures de métallisation. Ainsi, nous avons choisi deux structures de métallisation pour la cellule carrée et deux pour la forme circulaire. La figure suivante illustre les différentes structures de métallisation sur lesquelles porte notre étude.



Figure(III.1) : Géométries de grille de la face avant utilisées



- (a) : Grille linéaire simple (échelle).
- (b) : Grille peigne
- (c) : Grille circulaire simple
- (d) : Grille circulaire complexe

La structure linéaire simple, aussi appelé échelle est constituée de deux collecteurs et plusieurs barreau ou doigts disposés perpendiculairement par rapport aux collecteurs. C'est pareille pour la structure peigne, la seule différence est qu'elle est constituée d'un seul collecteur.

Pour chaque type de structure, nous partirons d'une modélisation des taux de perte par conduction et taux d'ombre pour comparer les dimensions optimales correspondant à une perte minimale de puissance.

III.2 : Modélisation

Dans ce paragraphe nous allons donner, pour chaque structure de grille, l'expression des différentes pertes dues à la résistance série :

- ❖ Taux de perte due à la résistance de la couche avant
- ❖ Taux de perte due à la résistance de la grille
- ❖ Taux de perte due à la résistance de contact métal/semi-conducteur

Dans cette étude, nous ne tenons pas en compte des pertes dues à la métallisation de la face arrière de la cellule.

La somme de ces trois taux de pertes nous donne le taux de perte de conduction. Nous allons par suite donner l'expression du taux d'ombrage de la structure de métallisation.

III.2.1 : Grille échelle

Nous supposons que la surface de la face avant qui porte la grille est éclairée de manière homogène et le photocourant ainsi produit s'écoule uniformément dans la couche superficielle jusqu'à ce qu'il atteigne les lignes collectrices de la grille [23].

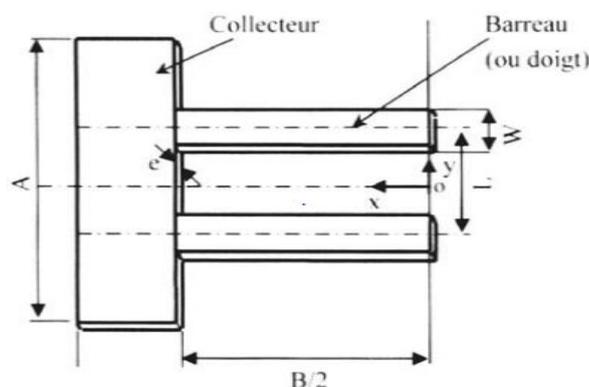


Figure.III.2 : Motif de grille échelle [23]

III.2.1. 1 : Perte due à la résistance de couche entre deux doigts

Considérons la ligne de symétrie entre les deux doigts (Ox). Le courant électrique qui circule entre ces deux doigts est collecté par la grille dans une demi-unité de cellule dépend de la distance par rapport à l'axe de symétrie. Et la résistance élémentaire de la couche dépend de la variation élémentaire de la distance entre ces deux doigts (y). Le taux de perte de la couche avant est donné par le rapport entre la puissance dissipée sur la puissance du demi-motif et est donné par [23] :

$$\tau_{ca} = \rho_s \cdot \frac{J_m^2 \cdot L^2}{12 \cdot V_m} \quad (\text{III.1})$$

L : Longueur d'espace entre les doigts (cm).

ρ_s : Résistance carré de la couche avant ($\Omega \cdot \text{carré}$).

J_m : Densité de courant à la puissance maximale ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$).

V_m : Tension à la puissance maximale (V).

III.2.1. b : Perte de puissance dans la métallisation de grille

La métallisation de la grille de collecte dans les cellules solaires entraîne une perte de puissance dans les doigts mais aussi dans les collecteurs.

Le courant qui passe dans un doigt est fonction de la distance x par rapport à l'axe de symétrie et sa résistance élémentaire dépend de la variation élémentaire de x.

Le courant qui passe dans le collecteur est fonction de la distance entre les deux doigts et sa résistance élémentaire dépend du déplacement élémentaire suivant y.

Le taux de perte de puissance due à la métallisation de la grille est donné par le rapport de la somme des puissances du doigt et du collecteur sur la puissance totale du motif [23] :

$$\tau_m = \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot L \cdot B^2}{12 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot B \cdot L^2}{24 \cdot V_m \cdot d \cdot e} \quad (\text{III.2})$$

Avec W : Largeur du doigt (μm),

B : Longueur des doigts (cm).

d: Largeur du collecteur (μm).

ρ_M : résistivité du métal ($\Omega \cdot \text{cm}$).

e: L'épaisseur des doigts et des collecteurs (μm).

III.2.1.c : Perte de puissance due à la résistance de contact entre le métal et le semi-conducteur

Le taux de perte qui correspond au contact métal/semi-conducteur dans les doigts est donné par le rapport de la puissance perdue dans les contacts sur la puissance totale du motif :

$$\tau_{ms} = \rho_C \cdot \frac{J_m \cdot L}{W \cdot V_m} \quad (\text{III.3})$$

ρ_C : Résistance spécifique du contact ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)

Le calcul des différents taux de pertes permet de déduire le taux de perte de puissance par conduction τ_R qui est donné par :

$$\tau_R = \tau_{ca} + \tau_m + \tau_{ms} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{D'où : } \tau_R = \rho_S \cdot \frac{J_m \cdot L^2}{24 \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot L \cdot B^2}{12 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot B \cdot L^2}{24 \cdot d \cdot e \cdot V_m} + \rho_C \cdot \frac{J_m \cdot L}{W \cdot V_m} \quad (\text{III.5})$$

III.2.1.d : Taux d'ombrage

Un autre type de perte est caractérisée par un paramètre appelé taux d'ombre qui est défini comme le rapport entre la surface métallisée et la surface totale de la cellule. Pour le calculer, nous avons choisi un motif délimité à partir de deux doigts consécutifs (figure (III.2)). Le taux d'ombre (τ_0) correspondant est calculé comme suite [23] :

$$\tau_0 = \frac{S_m}{S_T} \quad (\text{III.6})$$

Avec : $S_m = W \cdot B$ qui est la surface métallisée et $S_T = L \cdot \frac{B}{2}$ qui est la surface total du motif.

$$\text{D'où : } \tau_0 = 2 \cdot \frac{W}{L} \quad (\text{III.7})$$

III.2.2 : Grille peigne

III.2.2.1 : Taux de perte de puissance par conduction

Pour la structure grille peigne, le motif utilisé est représenté sur la figure (III.5).

Les différents taux de pertes de puissance dépendent des paramètres du motif que sont L (distance entre deux doigts), B (longueur du doigt), W (largeur du doigt), W_E (largeur du collecteur) et e (épaisseur du doigt et du collecteur).

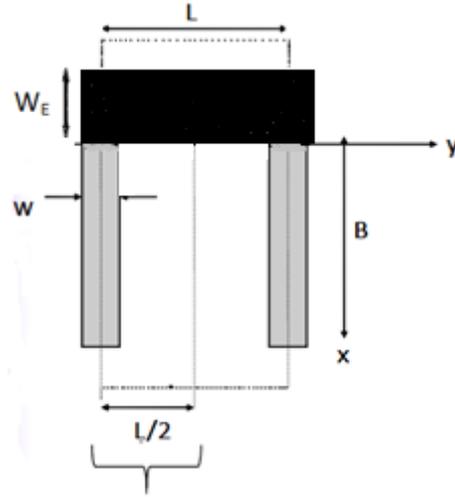


Figure (III.3) : Motif d'une grille peigne

Le facteur de perte de puissance de la couche avant est donné par la relation suivante :

$$\tau_{ca} = \rho_s \cdot \frac{J_m \cdot L^2 \cdot B}{12 \cdot V_m} \quad (\text{III.8})$$

Le taux de perte de puissance due à la métallisation de la grille est donné par :

$$\tau_m = \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot B^2 \cdot L}{12 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot B \cdot L^2}{24 \cdot W_E \cdot e \cdot V_m} \quad (\text{III.9})$$

Le taux de perte de puissance causée par le contacte métal/semi-conducteur dans la photopile est donné par :

$$\tau_{ms} = \rho_C \cdot \frac{2 \cdot J_m \cdot L \cdot B^2}{W \cdot V_m} \quad (\text{III.10})$$

Le calcul des différents taux de pertes permet de déduire le taux de perte de puissance par conduction τ_R qui est donné par :

$$\tau_R = \tau_{ca} + \tau_m + \tau_{ms} \quad (\text{III.11})$$

$$\tau_R = \rho_s \cdot \frac{J_m \cdot L^2}{12 \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot L \cdot B^2}{3 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot B \cdot L^2}{24 \cdot W_E \cdot e \cdot V_m} + \rho_C \cdot \frac{2 \cdot J_m \cdot L}{W \cdot V_m} \quad (\text{III.12})$$

III.2.2.2 : Taux d'ombrage

La définition du taux d'ombre donné ci-dessus nous permet de le calculer. Il est donné par la relation :

$$\tau_0 = \frac{S_m}{S_T} \quad (\text{III.13})$$

$$\tau_0 = \frac{W}{L} \quad (\text{III.14})$$

Avec : S_t la surface total du motif et S_m la surface métallisée.

III.2.3 : Grille circulaire simple

III.2.3.1 : Taux de perte de puissance par conduction

Pour la structure de grille circulaire simple, le motif utilisé est représenté sur la figure(III.4) [24].

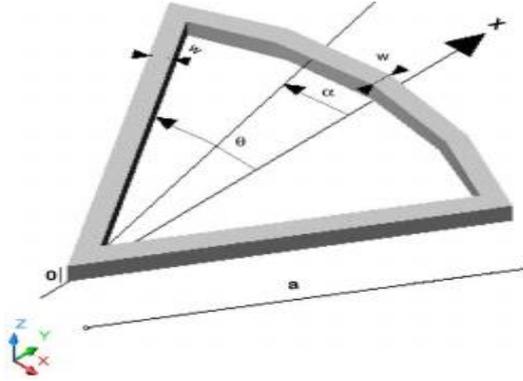


Figure (III.4) : Motif d'une grille circulaire simple

Le taux de perte de puissance due à la résistance de la couche avant est donné comme suit [24] :

$$\tau_{ca} = \rho_s \cdot \frac{J_m \cdot a^2 \cdot \theta^2}{6 \cdot V_m} \quad (\text{III.15})$$

Avec : a qui est le rayon du cercle, θ l'angle entre deux doigts, ρ_s résistance de la couche avant.

L'expression du taux de perte due à la métallisation de la grille est donnée par:

$$\tau_m = \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot \theta \cdot a^3}{5 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot a^2 \cdot \theta^2}{6 \cdot W \cdot e \cdot V_m} \quad (\text{III.16})$$

Avec : ρ_M est la résistance du métal

L'expression du taux de perte due à la résistance de contacte métal/semi-conducteur est [23] :

$$\tau_{ms} = \rho_c \cdot \frac{J_m \cdot \theta \cdot a}{W \cdot V_m} \quad (\text{III.17})$$

Avec ρ_c la résistance spécifique du contact.

Le taux de perte de puissance due à la conduction est obtenu en faisant la somme des différents taux de pertes calculés précédemment :

$$\tau_R = \tau_{ca} + \tau_m + \tau_{sm} \quad (\text{III.18})$$

$$\tau_R = \rho_s \cdot \frac{J_m \cdot a^2 \cdot \theta^2}{6 \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot \theta \cdot a^3}{5 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot a^2 \cdot \theta^2}{6 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_c \cdot \frac{J_m \cdot \theta \cdot a}{W \cdot V_m} \quad (\text{III.19})$$

III.2.3.2 : Taux d'ombrage dû à la métallisation

Le taux d'ombre est donné par la relation suivante [24] :

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot a \cdot W + W \cdot a \cdot \theta}{W \cdot a \cdot \theta + a^2 \cdot \theta} \quad (\text{III.20})$$

III.2.4 : Grille circulaire à n collecteurs

III.2.4.1 : Taux de perte de puissance par conduction

Le motif de cette cellule est présenté sur la figure (III.5). Il est constitué de deux doigts et de n collecteurs avec Ox son axe de symétrie. Les rayons r_1, r_2, \dots, r_n constituent une progression arithmétique de premier terme r_1 et de raison r_1 [23].

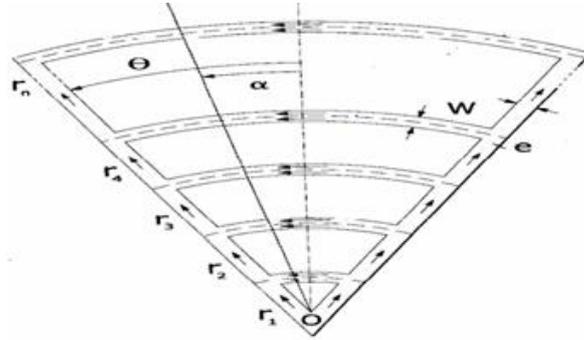


Figure (III.5) : Motif d'une grille circulaire complexe

Le rapport entre la puissance dissipée et la puissance fournie donne le taux de perte de puissance dû à la résistance de la couche avant, qui s'exprime par [23] :

$$\tau_{ca} = \rho_s \cdot \frac{J_m \cdot A^2 \cdot (1+B) \cdot \theta^2}{24 \cdot V_m \cdot n^2 \cdot r_1^2} \quad (\text{III.21})$$

Avec : $A = 2 \cdot n^2 \cdot r_1^2 + W \cdot n \cdot (1-n)r_1 + \frac{W^2}{4}$ et $B = \frac{n \cdot (n-1) \cdot r_1 - W \cdot (n-1)}{2 \cdot (r_1 - W)}$

r_1 : Est le rayon du cercle et n le nombre de collecteurs

Le taux de puissance due à la métallisation de la grille est donné par la relation suivante [23] :

$$\tau_m = \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot \theta \cdot n^3 \cdot r_1^2}{5 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \frac{2}{3} \cdot \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot \theta^3 \cdot (1+n)^5 \cdot n^3 \cdot r_1^3}{48 \cdot W \cdot e \cdot V_m} \quad (\text{III.22})$$

Le taux de perte de puissance causée par le contact métal/semi-conducteur dans la photopile est donné par [23] :

$$\tau_{ms} = \rho_c \cdot \frac{J_m \cdot r_1 \cdot n \cdot \theta}{[2 \cdot W + W \cdot \theta \cdot (n+1)] \cdot V_m} \quad (\text{III.23})$$

Le calcul de ces différents taux de pertes permet de déduire le taux de perte de puissance par conduction τ_R qui est donné par :

$$\tau_R = \tau_{ca} + \tau_m + \tau_{ms} \quad (\text{III.24})$$

$$\tau_R = \begin{cases} \rho_S \cdot \frac{J_m^2 \cdot A^2 \cdot (1+B) \cdot \theta^2}{48 \cdot V_m \cdot r_1^2 \cdot n^2} + \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot \theta \cdot n^2 \cdot r_1^2}{5 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \\ \rho_M \cdot \frac{J_m \cdot \theta^2 \cdot (1+n)^5 \cdot n^2 \cdot r_1^2}{48 \cdot W \cdot e \cdot V_m} + \rho_c \cdot \frac{J_m \cdot r_1^2 \cdot n \cdot \theta}{[2 \cdot W \cdot r_1 + W \cdot \theta \cdot (n+1)] \cdot V_m} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

III.2.4.2 : Taux d'ombre

La définition du taux d'ombre nous permet de le calculer par [23]:

$$\tau_0 = \frac{S_m}{S_T} \quad (\text{III.26})$$

$$S_m = S_{doigt} + S_{col}$$

$$S_m = 2 \cdot n \cdot r_1 \cdot W + \theta \sum \left[\left(r_k + \frac{W}{2} \right)^2 \cdot \left(r_1 - \frac{W}{2} \right)^2 \right]$$

S_{doigt} est la surface du doigt et S_{col} la surface du collecteur

$$S_m = 2 \cdot n \cdot r_1 \cdot W + W \cdot \theta \cdot n \cdot (n+1) \cdot r_1$$

S_m : surface métallisée de la face avant

$$S_T = r_1^2 \cdot n^2 \cdot \theta :$$

S_T : surface totale du motif

Par conséquent :

$$\tau_0 = \frac{2 \cdot W + W \cdot \theta (n+1)}{\theta \cdot r_1 \cdot n} \quad (\text{III.27})$$

III.3 : Résultats et discussions

Dans ce paragraphe, l'objectif visé est d'étudier l'influence de la largeur des doigts sur le point optimal qui est obtenu en traçant sur le même repère les courbes représentatives des fonctions $\tau_0(L)$ et $\tau_R(L)$ dans le cas des cellules carrées ou $\tau_0(\Theta)$ et $\tau_R(\Theta)$ dans le cas des cellules circulaires. Le point d'intersection des courbes donne le point optimal. Mais avant cela, nous allons étudier l'influence de la longueur d'espacement L (pour linéaire simple et

peigne) et de l'angle d'espacement Θ (pour circulaire simple et circulaire complexe) sur les taux d'ombres (τ_0) et sur les taux de perte de puissance par conductions (τ_R) et voir l'influence du taux d'ombre sur le taux de conduction pour les quatre structures.

Tableau (III.1) : Dimension et paramètres électriques utilisés dans ce travail.

Symbole	Description	Valeurs	Unité
Jm	Densité de courant à la puissance maximale	0,03	A.cm ⁻²
Vm	Tension à la puissance maximale	0,5	V
ρ^s	Résistance de couche avant	50	Ω /carré
Pm	Résistance du métal	$1,6 \cdot 10^{-6}$	Ω .cm ⁻¹
ρ^c	Résistance spécifique du contact	10^{-3}	Ω .cm ⁻²
W _E	Largeur du collecteur	800	μ m
N	Nombre de collecteur (circulaire complexe)	5	
B	Longueur du doigt (peigne)	4	cm
A	Rayon (cas circulaire simple)	4	cm
r ₁	Rayon du premier collecteur (circulaire complexe)	2	cm

III.3.1/ Influence de la longueur d'espacement des doigts sur les taux d'ombre

La figure (III.6) représente le profil du taux d'ombre (τ_0) en fonction de la longueur d'espacement entre deux doigts (L) pour les structures de grilles carrées.

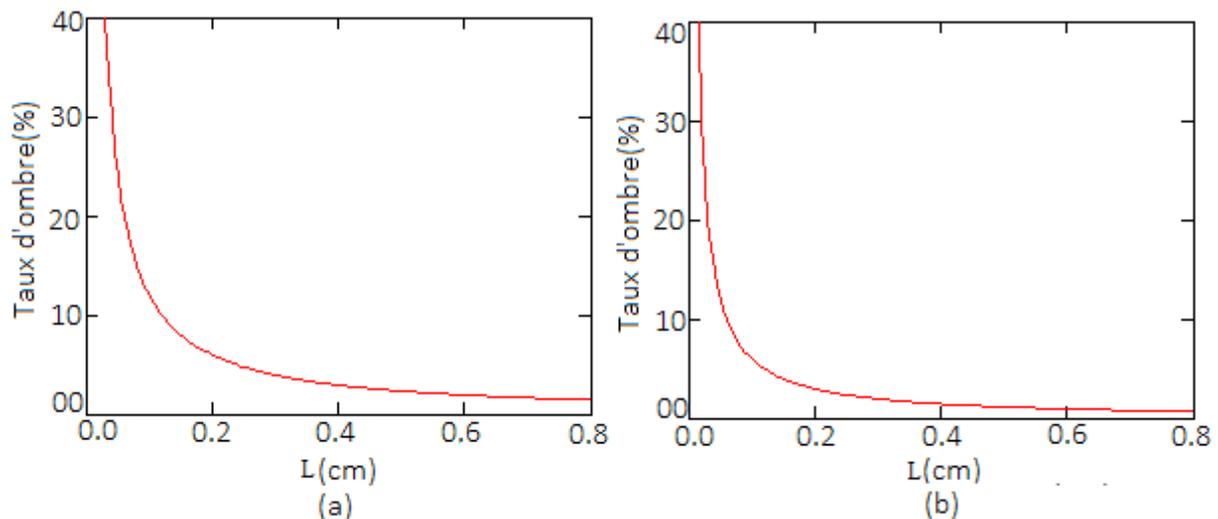


Figure (III.6) : Profils du taux d'ombre en fonction de la longueur d'espacement entre deux doigts (L) ((a) échelle et (b) peigne), W = 60 μ m.

Nous constatons que pour les deux structures, on a une diminution du taux d'ombre avec l'augmentation de la longueur d'espacement L . Nous notons que le taux d'ombre est élevé pour des valeurs faibles de L ($L \leq 0,2$ cm). Le taux d'ombre reste presque constant et atteint son minimum lorsque la longueur d'espacement entre deux doigts est supérieure à 0,4 cm pour la grille peigne alors que pour la grille échelle, elle est supérieure à 0,6 cm.

Pour la structure échelle, le taux d'ombre minimal est environ égale 3 % alors que pour la structure peigne, il est de 2 %.

Pour une même valeur de L , la structure peigne à un taux d'ombre moins important que celle d'échelle.

III.3.2 : Etude de l'influence de l'angle d'espacement entre deux doigts sur les taux d'ombre

Dans ce paragraphe, nous avons simulé sur Mathcad l'expression du taux d'ombre pour les grilles circulaire simple et circulaire complexe à n collecteurs en fonction de l'angle d'espacement (Θ) entre deux doigts. La figure (III.7) représente les profils du taux d'ombre en fonction de l'angle Θ .

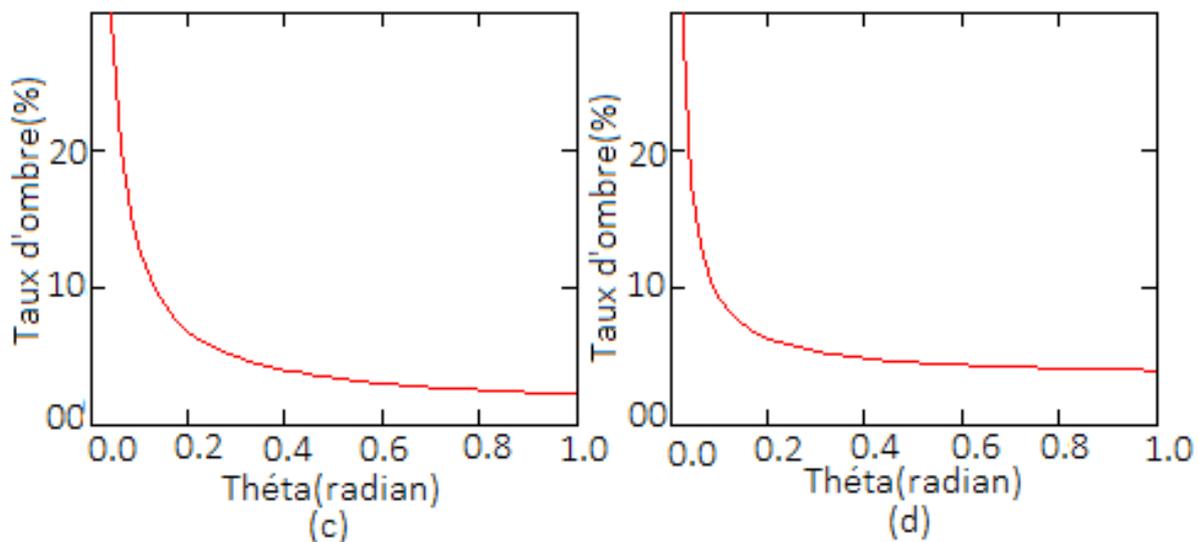


Figure (III.7) : Profils du taux d'ombre en fonction de l'angle entre deux doigts Θ ((C) circulaire simple et (d) circulaire complexe à n collecteur), $W = 60 \mu\text{m}$

Pour les deux structures circulaires, nous notons que le taux d'ombre diminue lorsque l'angle entre deux doigts (Θ) augmente. Pour les faibles valeurs de Θ ($\Theta \leq 0,2$ radian), le taux d'ombre dépend fortement de Θ . Lorsque $\Theta \geq 0,2$ radian le taux d'ombre devient presque constant progressivement. Il atteint son minimum (4%) et (5%) respectivement à 0,6 radian pour la structure circulaire simple et à 0,4 radian pour circulaire complexe à n collecteurs.

Pour une même valeur de l'angle d'espacement, la structure circulaire simple a un taux d'ombre moins important que la structure circulaire complexe.

Donc en terme de taux d'ombre, la structure peigne a moins de taux d'ombre suivi de la structure échelle puis circulaire simple et circulaire complexe à n collecteurs (en se basant sur les minimums).

II.3.3 : Etude de l'influence de la longueur d'espacement sur les taux de perte de puissance par conduction pour échelle et peigne.

Dans cette section, nous avons étudié le taux de perte de puissance par conduction en fonction de la longueur d'espacement entre deux doigts. La figure (III.8) représente les profils du taux de perte par conduction en fonction de (L) pour les deux structures carrées.

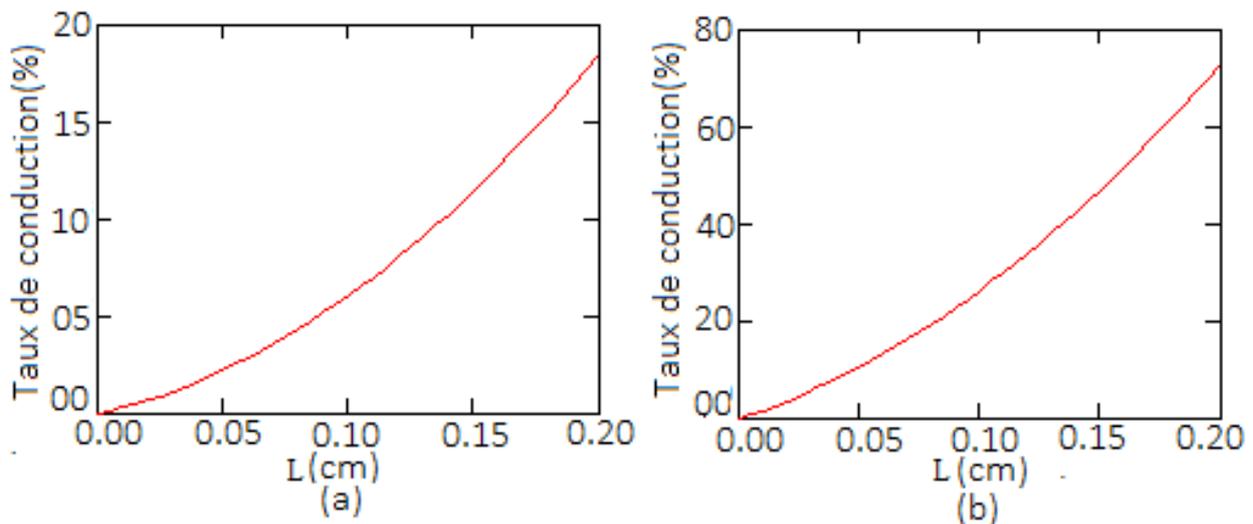


Figure (III.8) : Profils du taux de perte de puissance par conduction en fonction de (L) : ((a) échelle et (b) peigne), $W = 70 \mu\text{m}$, $e = 4 \mu\text{m}$.

Nous notons sur la figure (III.8) une augmentation du taux de perte de puissance par conduction quand la longueur d'espacement augmente. En effet, lorsque (L) augmente, le taux d'ombre diminue et la surface active augmente. Les porteurs vont parcourir une distance plus longue pour être collecté. Donc le taux de recombinaison des porteurs augmente, ce qui a comme conséquence l'augmentation de la perte de puissance par conduction. Donc l'augmentation de l'espacement des lignes de collecte influence positivement le taux de perte de puissance par conduction. Pour (L) égale à 0,2 cm, le taux de perte de puissance par conduction pour la structure échelle est égale à 18 % alors qu'elle est 72 % pour la structure peigne. Donc, on peut dire que pour une même valeur de L, la structure échelle a moins de perte de puissance par conduction que la structure peigne.

III.3.4 : Etude de l'influence de l'angle d'espacement entre deux doigts sur les taux de perte de puissance par conduction pour circulaire simple et circulaire complexe.

Dans cette partie, nous avons étudié l'influence de l'angle formé par deux doigts (Θ) sur le taux de perte de puissance par conduction des cellules circulaires (circulaire simple et circulaire complexe à n collecteurs). La figure (III.9) représente les profils du taux de perte de puissance par conduction en fonction de Θ pour les deux structures circulaires.

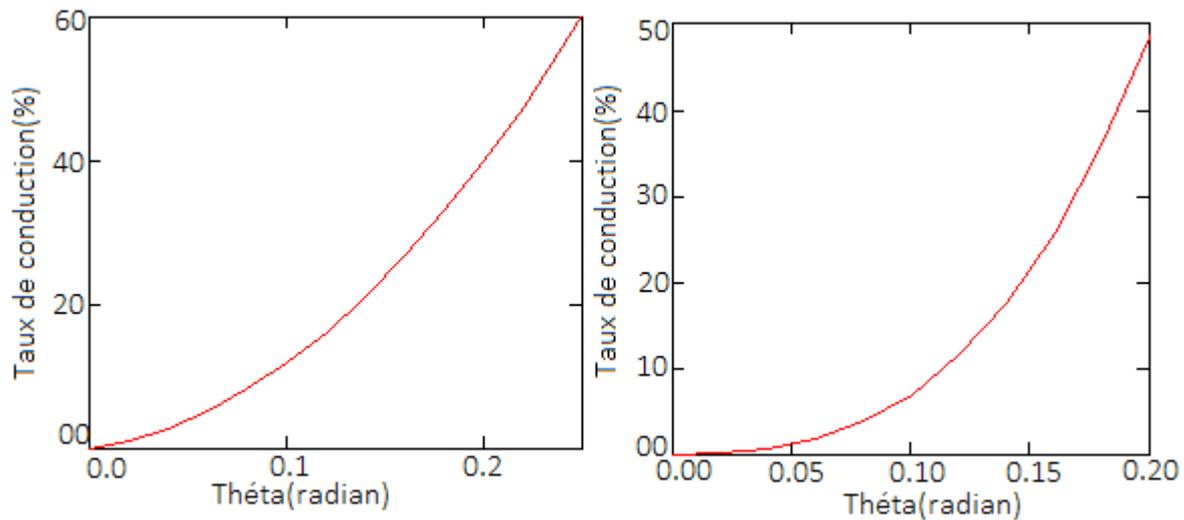


Figure (III.9) : Profils du taux de perte de puissance en fonction de l'angle entre deux doigts : ((c) circulaire simple et (d) circulaire complexe à n collecteurs), $W = 70 \mu\text{m}$, $e = 4 \mu\text{m}$

Nous notons une augmentation du taux de perte par conduction lorsque l'angle d'espacement entre les doigts augmente. Cette augmentation peut être due au fait que l'augmentation de l'angle entre les doigts entraîne une augmentation de la surface active où pourront se recombinaer les porteurs de charge avant d'être collectés.

Pour un même angle Θ , le taux de perte de puissance par conduction est beaucoup plus faible pour la structure circulaire complexe. Cette différence est notée lorsque Θ est supérieur à 0 radian.

D'après les analyses faites au niveau de la figure (III.8) et figure (III.9), nous notons que les pertes de puissance par conduction sont élevées pour les grandes longueurs d'espacement entre deux doigts et les grandes valeurs de Θ . Ces résultats sont en accord avec la littérature.

En termes de pertes de puissance par conduction, pour les différentes structures, nous avons une augmentation des pertes lorsqu'on écarte les doigts. Ce qui est en contradiction avec ce qui a été dit en raisonnant en termes de taux d'ombre.

Cela nous amène à étudier l'influence du taux d'ombre sur le taux de perte de puissance par conduction.

III.3.5 : Influence du taux d'ombre sur le taux de perte de puissance par conduction pour échelle et peigne

Dans cette partie nous étudions l'influence du taux d'ombre sur le taux de perte de puissance par conduction. A la figure (III.10) présentons les profils du taux de perte par conduction (τ_R) en fonction du taux d'ombre (τ_0) pour les structures de grille échelle et peigne.

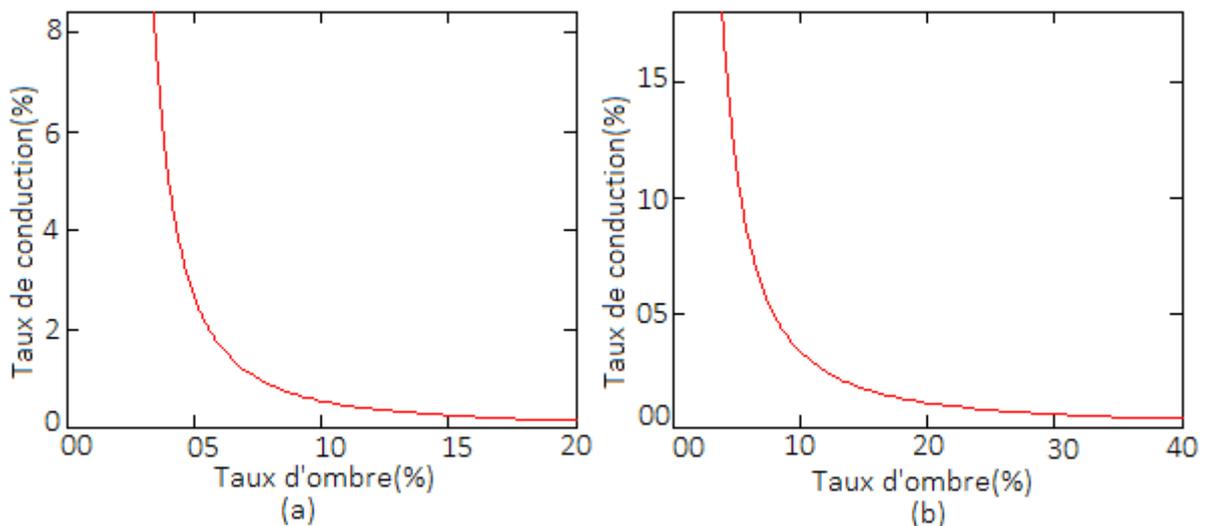


Figure (III.10) : Profils du taux de perte de puissance par conduction en fonction du taux d'ombre : (a) échelle et (b) peigne, $W = 30 \mu\text{m}$, $e = 4 \mu\text{m}$.

La figure (III.10) nous montre une diminution du taux de perte par conduction lorsque le taux d'ombre augmente. La variation est beaucoup plus remarquable pour les faibles taux d'ombre. Pour la structure échelle, nous savons une variation de -90 % du taux de perte de puissance par conduction pour une augmentation du taux d'ombre de 4 % à 10 %. Quant à la structure peigne, nous avons une diminution du taux de perte d'environ 85 % pour une même variation du taux d'ombre. Lorsque l'ombrage dû à la métallisation est très élevé (plus de 15 % et 30 % de taux d'ombre respectivement pour échelle et peigne), le taux de perte de puissance par conduction est faible et est presque indépendant du taux d'ombre.

III.3.6 : Influence du taux d'ombre sur le taux de perte de puissance par conduction pour circulaire simple et circulaire complexe.

La figure (III.11) montre les profils du taux de perte par conduction en fonction du taux

d'ombre pour une structure circulaire simple et circulaire complexe à n collecteurs.

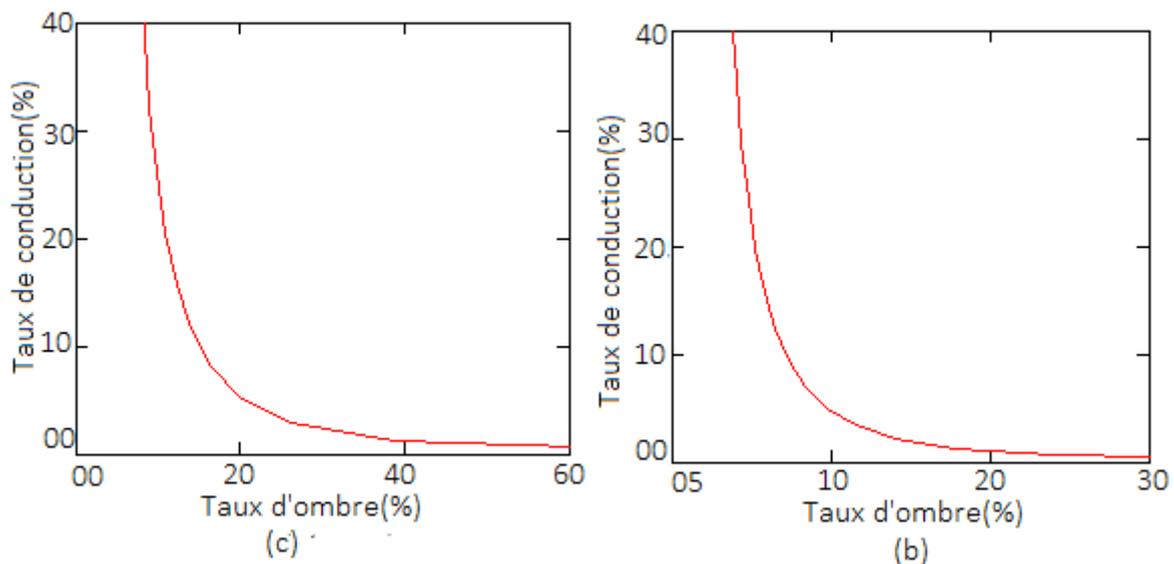


Figure (III.11) : Profils du taux de perte de puissance par conduction en fonction du Taux d'ombre pour circulaire simple (c) et circulaire complexe (d), $W = 30 \mu\text{m}$, $e = 4 \mu\text{m}$.

A l'image des géométries carrées, nous avons pour ces deux structures une diminution du taux de perte par conduction lorsque le taux d'ombre augmente.

Notre objectif était de comparer nos quatre structures en se fixant un taux d'ombre et en comparant les différents taux de perte de puissance par conduction. Mais nous constatons que cette comparaison ne peut être réalisée pour n'importe quelle valeur de taux d'ombre, du fait que pour les géométries circulaire complexe, notre modélisation ne permet pas d'avoir des valeurs en dessous de 7 % de taux d'ombre pour toute les structures.

Sachant que les faibles ombrages, correspondent aux grandes pertes de puissance par conduction et vice versa, il est donc plus que nécessaire au cours de la métallisation de la cellule solaire d'optimiser la structure afin d'avoir un compromis entre le taux d'ombre et le taux de perte de puissance par conduction. Pour cela, il faut chercher pour les structures carrées la valeur de la longueur d'espacement (L) optimale et pour les structures circulaires celle de l'angle d'espacement (Θ) optimal.

III.3.7 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal pour la structure échelle

Les dimensions optimales sont celles qui rendent les taux d'ombre et de perte par conduction minimaux. Nous optimisons la longueur d'espacement L entre deux doigts consécutifs en traçant les courbes représentatives des fonctions $\tau_0(L)$ et $\tau_R(L)$ sur le même repère (Cf. figure (III.12)). Ensuite nous déduisons graphiquement pour différentes valeurs de la largeur du

doigt, la longueur d'espacement optimale (L_{op}) qui est l'abscisse du point d'intersection des deux courbes.

La figure (III.12) représente les profils du taux de perte par conduction et du taux d'ombrage en fonction de L , pour différentes valeurs de la largeur du doigt.

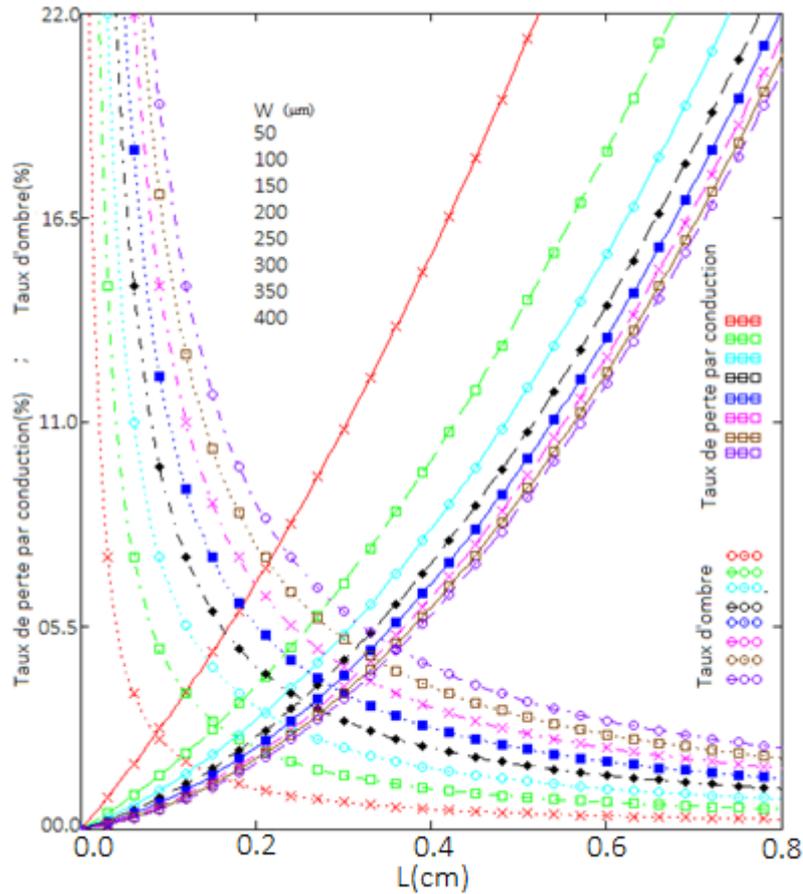


Figure (III.12) : Profils des taux de perte de puissance par conduction et d'ombrage en fonction de (L) pour différentes valeurs de la largeur du doigt (W), $e = 5 \mu\text{m}$.

A partir de la figure, nous avons déterminé pour différentes valeurs de W , la longueur d'espacement optimale, les taux d'ombrage et taux de perte de puissance par conduction optimaux. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau (III.2) : Valeurs de L_{op} , τ_{0op} et τ_{ROP} pour différentes valeurs de la largeur du doigt pour la structure échelle.

W (μm)	50	100	150	200	250	300	350	400
τ_{0op} (%) = τ_{ROP} (%)	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00	3,10	3,20	3,30
L_{op} (cm)	0,08	0,16	0,21	0,27	0,29	0,31	0,34	0,36

Nous avons une faible augmentation de (L_{op}) et des taux d'ombrage et de perte par conduction optimaux quand W augmente. Lorsque $W > 250 \mu\text{m}$, l'impact de la largeur du doigt sur la longueur (L_{op}) restent presque constants. En effet, la largeur des doigts est un paramètre important pour la collecte des porteurs, mais peut influencer négativement la qualité de la cellule grâce à des pertes de puissance. Nous notons ici qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des largeurs trop grand. Car au-delà de $250 \mu\text{m}$, l'impact de la largeur du doigt sur la longueur optimale est faible.

III.3.8 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal d'une grille la peigne.

La figure (III.13) représente les profils du taux d'ombrage et du taux de perte par conduction en fonction de la longueur d'espacement pour différentes valeurs de la largeur du collecteur. Les intersections donnent le point optimal. Les abscisses donnent les valeurs de la longueur d'espacement optimale et les ordonnées donnent les valeurs optimales du taux d'ombrage et taux de conduction.

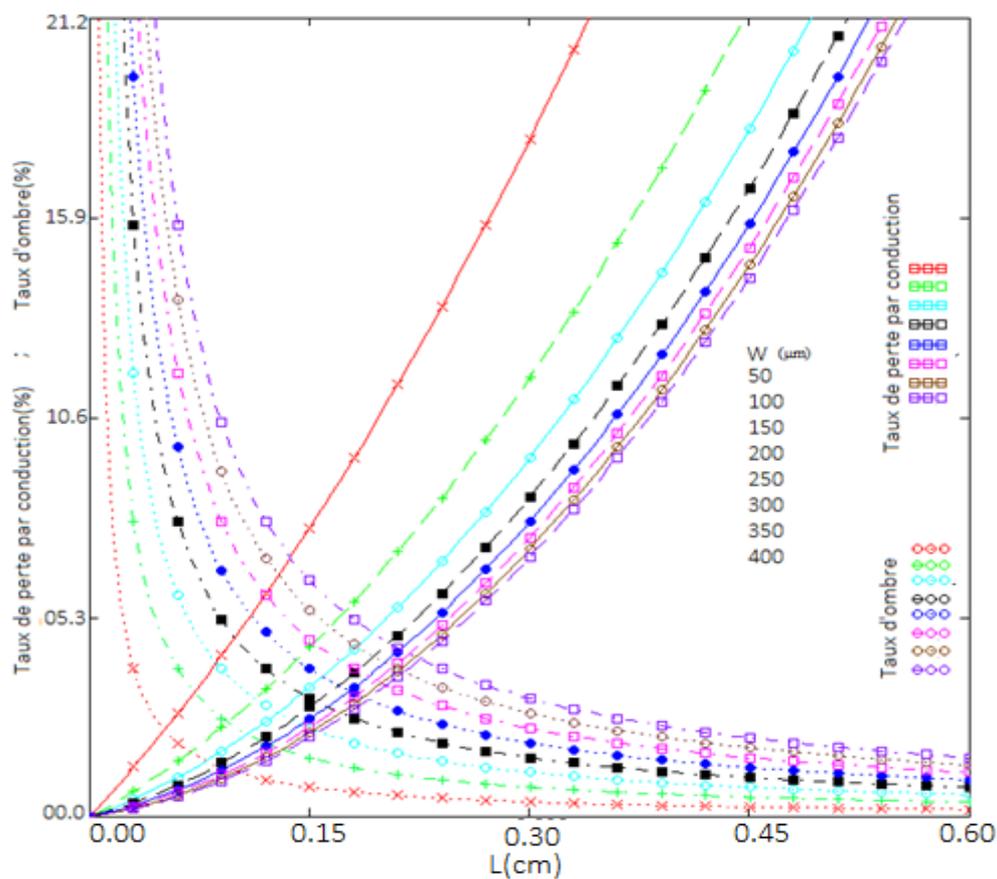


Figure (III.13) : Profils des Taux d'ombrage et perte de puissance par conduction en fonction de la longueur d'espacement pour différentes valeurs de la largeur du doigt W (peigne) avec $e = 5 \mu\text{m}$.

A partir de la courbe, nous avons déterminé pour différentes valeurs de la longueur d'espacement optimale L_{op} , les taux de perte par conduction et d'ombre optimaux. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau (III.3) : Valeurs de L_{op} , τ_{0op} et τ_{Rop} pour différentes valeurs de la largeur du doigt (W) pour la structure peigne.

W (μm)	50	100	150	200	250	300	350	400
τ_{0op} (%) = τ_{op} (%)	2,530	2,560	2,590	2,610	2,630	2,670	3,000	3,300
L_{op} (cm)	0,05	0,09	0,13	0,16	0,18	0,19	0,21	0,22

La figure (III.13) nous montre une légère augmentation de la longueur et des taux d'ombre et de perte de puissance par conduction optimaux. Mais lorsque $W > 250 \mu\text{m}$, la longueur optimale est presque constants. Nous choisirons ainsi comme valeur optimale de la largeur des doigts $W_{op} = 250 \mu\text{m}$.

III.3.9 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal d'une grille circulaire simple

Dans cette partie, nous optimisons l'angle d'espacement entre deux doigts consécutifs. Pour ce faire, nous traçons les courbes représentatives des fonctions $\tau_0(\Theta)$ et $\tau_R(\Theta)$ sur le même repère figure (III.14). Ensuite nous en déduisons graphiquement pour différentes valeurs de la largeur du doigt, l'angle d'espacement optimal Θ_{op} et la valeur des taux de perte par conduction τ_{0op} et d'ombrage optimaux τ_{Rop} .

La figure (III.14) représente les profils du taux d'ombre et du taux de conduction pour différentes valeurs de la largeur du collecteur.

Nous sur la figure (III.14) que lorsque la largeur du doigt augmente, l'angle optimal entre les doigts et les taux d'ombre et perte de puissance par conduction optimaux augmentent. Lorsque la largeur du doigt est supérieure à $100 \mu\text{m}$, l'angle optimal reste presque constant. Pour une augmentation de largeur du doigt (W) de $20 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$, on a une augmentation de Θ_{op} de $0,022$ à $0,080$ radian. Ici il n'est pas nécessaire d'utiliser des largeurs supérieures à $100 \mu\text{m}$.

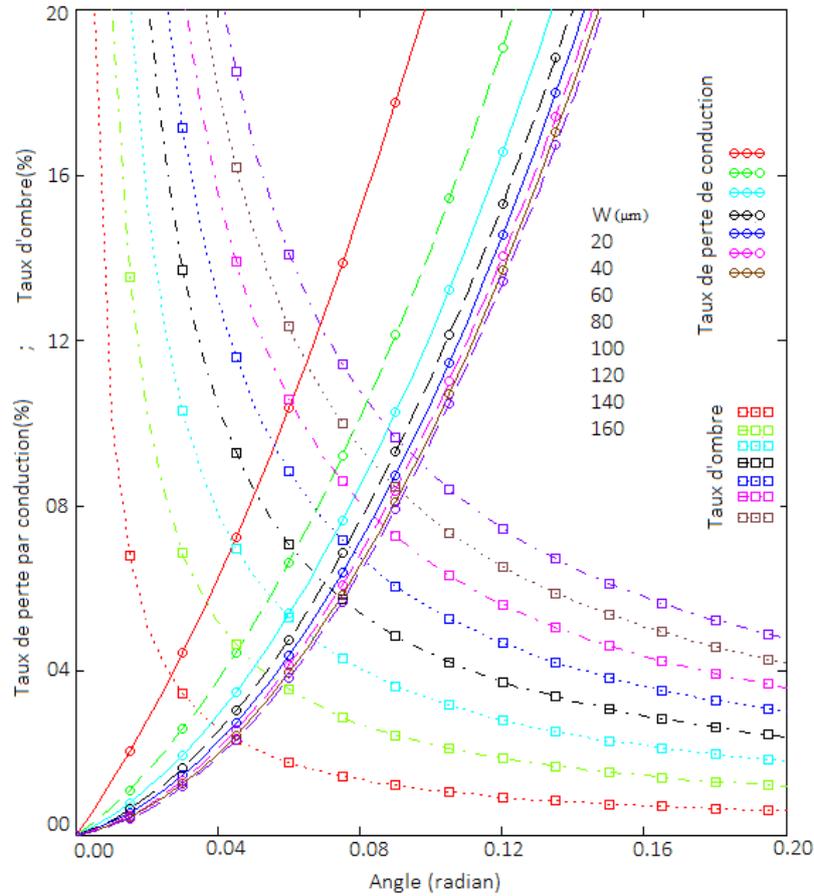


Figure (III.14) : Taux d'ombre et taux de perte par conduction en fonction de l'angle d'espacement des doigts (Θ) pour différentes valeurs de la largeur du doigt (W) : (circulaire simple), $e = 5 \mu\text{m}$.

A partir de la courbe, nous avons déterminé pour différentes valeurs de la largeur du doigt l'angle d'espacement optimal et les taux d'ombre et de perte par conduction optimaux. Les résultats sont consignés sur le tableau suivant.

Tableau (III.4) : Valeurs de Θ_{op} , τ_{0op} , τ_{Rop} et W pour différentes largeurs du doigt (structure circulaire simple).

W (μm)	20	40	60	80	100	120	140	160
τ_{0op} (%) = τ_{Rop} (%)	4,000	4,400	5,400	6,350	6,800	7,600	8.450	9,000
Θ_{op} (rad)	0,022	0,044	0,057	0,074	0,080	0,083	0,085	0,088

III.3.10 : Etude de l'influence de la largeur du doigt sur le point optimal d'une grille circulaire complexe à n collecteurs

Dans cette partie, nous allons optimiser l'angle d'espacement entre deux doigts d'une grille

circulaire complexe à partir des profils des taux d'ombre et taux de perte de puissance par recombinaison.

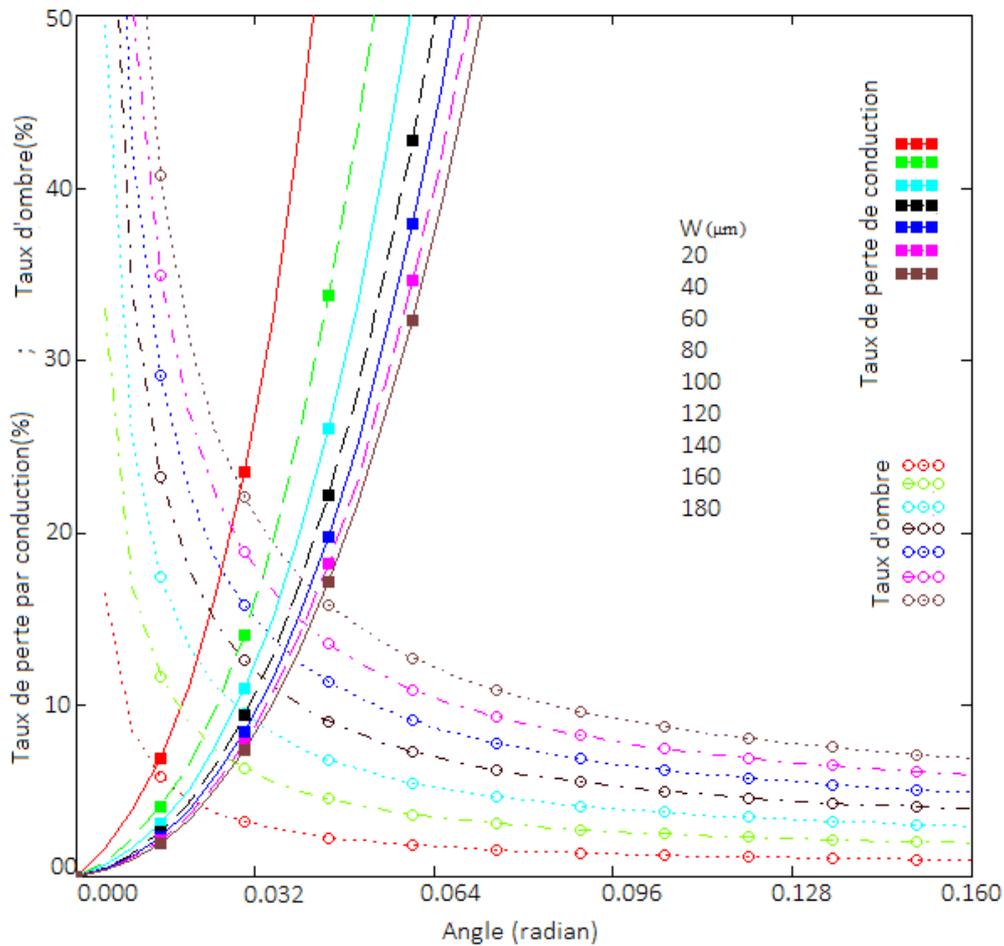


Figure (III.15) : Profils des Taux d'ombre et de perte de puissance par conduction en fonction de l'angle d'espacement pour différentes valeurs de la largeur du doigt W (circulaire complexe), $e = 5 \mu\text{m}$.

A partir de la courbe, nous avons déterminé pour différentes valeurs de la largeur du doigt l'angle d'espacement optimal et les taux d'ombre et de perte par conduction optimaux. Les résultats sont consignés sur le tableau suivant.

Tableau (III.5) : Valeurs de Θ_{op} , τ_{0op} , τ_{Rop} et W pour différentes largeurs du doigt pour la structure circulaire complexe à n collecteurs.

W (μm)	20	40	60	80	100	120	140
$\tau_{0op}(\%) = \tau_{Rop}(\%)$	5,700	8,300	10,500	11,200	12,500	14,700	16,500
$\Theta_{op}(\text{radian})$	0,012	0,022	0,027	0,033	0,034	0,036	0,040

Nous notons une forte augmentation des taux d'ombre et de perte de puissance par conduction optimaux lorsque la largeur du doigt augmente de 20 μm à 140 μm .

Quant à l'angle d'espacement optimal des doigts, il augmente de 0,012 radian à 0,034 radian lorsque W passe de 20 μm à 100 μm . Au de-là de cette valeur, l'impacte de la largeur du doigt sur l'angle optimale est presque constant. Pour cette structure, nous conseillons les fabricants d'utiliser des largeurs de doigt faible ($W < 60 \mu\text{m}$) pour respecter la norme du taux d'ombre qui devrait être inférieur ou égale à 10 % dans les industries.

Dans le tableau ci-dessous, nous résumons les valeurs de la largeur des doigts optimale pour les quatre grilles étudiée, ainsi que les valeurs correspondant du taux d'ombre optimal pour chaque structure de grille. Nous donnons aussi les valeurs optimales de L pour les cellules carrées et de Θ pour les cellules circulaires.

Tableau (III.6) : Valeurs optimaux de W_{op} , τ_{0op} , τ_{Rop} , L_{op} , Θ_{op} pour les quatre géométries de grille.

Paramètres	Echelle	Peigne	Circulaire simple	Circulaire complexe
W_{op} (μm)	250	250	100	100
$\tau_{0op}(\%)=\tau_{Rop}(\%)$	3,00	2,63	6,80	12,50
L_{op} (cm)	0,29	0,18		
Θ_{op} (radian)			0,083	0.034

D'après le tableau (III.6), la structure peigne a un taux d'ombre optimal moins élevé, suivi de la structure échelle puis circulaire simple et circulaire complexe à n collecteurs. Donc peigne est plus performant suivi d'échelle puis circulaire simple et en fin circulaire complexe à n collecteurs.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé des modèles mathématiques dans le but d'évaluer le taux de l'ombrage dû à la métallisation au niveau de la face avant et le taux de perte par conduction sur cette face, pour quatre types de structure de métallisation (peigne, échelle, circulaire et circulaire à plusieurs collecteurs).

L'étude a permis de chercher les dimensions optimales pour chaque type de structure. Cette optimisation va permettre de faire le bon choix de la géométrie de la grille. L'étude faite sur les quatre modèles nous permet de conclure que:

Le taux d'ombre diminue avec l'augmentation de la longueur et l'angle d'espacement. Mais au-delà de certaines valeurs de ces paramètres le taux d'ombre devient presque constant, donc indépendant de ces paramètres. Quant à la perte de puissance par conduction, elle augmente avec la longueur et l'angle d'espacement entre les doigts. Elle est importante lorsque le taux d'ombre est faible et vice versa. D'où la nécessité de rechercher un compromis entre ces deux taux par une optimisation. L'étude de l'influence de la largeur du doigt de collecte sur les paramètres optimaux (distance et angle optimaux entre les doigts, taux optimaux d'ombrage et de perte par conduction) a permis d'obtenir la largeur de doigt optimale donnant le taux d'ombrage optimal pour chacune des géométries étudiée. Cela nous a permis de faire une étude comparative de nos différentes structures. Selon laquelle peigne a moins de taux d'ombre suivi de la structure échelle, puis circulaire simple et circulaire complexe à n collecteurs.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce travail une étude en modélisation à trois dimensions d'une photopile au silicium polycristallin en régime statique sous l'éclairement monochromatique. Par la résolution de l'équation de continuité, l'expression de la densité de porteurs minoritaires est obtenue. Cela nous a permis de voir l'influence de la profondeur de la base, le niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur la densité des porteurs minoritaires dans le volume de la base. Partant de la densité de porteurs minoritaires, nous avons déterminé le photocourant et la phototension. Ainsi, à partir de ces deux équations nous avons déduit l'expression du courant de court-circuit et la phototension en circuit ouvert. La variation simultanée du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence sur ces grandeurs a été étudiée.

Ensuite, une étude des pertes dues à la métallisation de la couche avant de la cellule est effectuée. Dans cette étude le taux d'ombre et le taux de perte par conduction sont donnés en fonction de la longueur d'espacement (cellules carrées) et de l'angle d'espacement (cellules circulaires). La variation du taux d'ombre et du taux de perte de puissance pour différentes longueurs d'espacement et pour différents angles d'espacement est présentée.

Enfin, l'influence de la largeur des doigts sur le point optimal est étudiée et une comparaison des quatre structures est faite après avoir déterminé les paramètres suivants : largeur optimale du doigt et taux optimal d'ombre (pour les quatre cellules), distance optimale entre les doigts (pour peigne et échelle), angle optimale entre les doigts (pour circulaire simple et circulaire à plusieurs collecteurs).

Il serait intéressant pour la suite de tenir compte de l'éclairement simultané des deux faces pour voir l'effet combiné du niveau d'éclairement et de l'angle d'incidence de l'éclairement sur la cellule. Mais aussi de tenir compte des pertes dues à la métallisation de la face arrière de la cellule et d'évaluer les résistances qui sont à l'origine de ces différentes pertes étudiées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), 2001.
- [2] OBSERV'ER. « Baromètre du Solaire Photovoltaïque », Système Solaires, (Avril 2004), N° 160, pp.68-83.
- [3] M. A. Green et al, 'Solar Cell Efficiency Tables (version 28)', Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14 (2006) pp. 455–461.
- [4] HALLOU SOLAIRE, La fabrication des cellules photovoltaïques,
http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource_PV/Cellule_solaire_module_solaire.pdf
- [5] M. Grau, Thèse, Réalisation de Nouvelles Structures de Cellules Solaires Photovoltaïques à Partir de Couches Minces de Silicium Cristallin sur Substrat Silicium Préparé par Frittage de Poudres, (Mai 2012), pp22-23.
- [6] L. Remache, Thèse, Silicium Poreux Passivé par des Nitrures et des Oxydes de Silicium. Application Revêtements Anti Réfléchissants. (Mai 2011).pp9-10.
- [7] H. Y. BA et al, Incidence Angle Effect on Silicon Solar Cell Capacitance Under Steady State, Journal des Sciences. Vol.15, N° 1 (Janvier 2015), pp 56-64.
- [8] L. M. Korchier et al : Proc.2nd Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Consersion, (1998), pp.1539-1542.
- [9] J. Furlan and S. Amon: Solid State Electric. Vol.28, N°12, (1985) pp1241-1243.
- [10] I. Ly et al, Technique de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclaircissement multi spectral constant en régime statique, Revue des Energies Renouvelables Vol.15 N°2(2012)
- [11] Nzonzolo, D. Lilonga-Boyenga, and G. Sissoko, G. (2014) Illumination Level Effects on Macroscopic Parameters of a Bifacial Solar Cell. Energy and Power Engineering, 6, 25-36.
- [12] G. Sissoko, et al (1998) World Renewable Energy Congress, 1848-1851.
- [13] A. Hamidou et al (2013) Capacitance Determination of a Vertical parallel Junction Solar Cell under Multispectral Illumination in Steady State. International Journal of Inovative Technology and Exploring Engineering (IJTEE), 2, 12-14.
- [14] O. Diasse et al, (2012) Solar Cell's Classification by the Determination of the Specific Values of the Back Surface Recombination Velocities in Open Circuit and Short-Circuit

Operating Conditions. *Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*, 1,55-59.

[15] H. L. Diallo et al : 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.203–11

[16] G. Sissoko et al, Recombination parameters measurement in double sided surface field solar cell *Proceedings of World Renewable Energy Conference, Florence–Italy (1998)*, pp. 1856–1859.

[17] O. Mbaou et al, 3D Study of a Polycrystalline Bifacial Silicon Solar Cell, Illuminated Simultaneously by Both Sides: Grain Size and Recombination Velocity Influence, *IJSET-International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, Vol. 3 Issue 12, Décembre 2016, ISSN (online) 2348-7968/ Impact Factor (2015) _4.332

[18] M. M. Déme et al, Influence of Illumination Incidence Angle, Grain Size and Grain Boundary Recombination Velocity on the Faciale Solar Cell Diffusion Capacitance, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°1 (2010) 109 - ()

[19] G. Sissoko et al, ‘Silicon Solar Cell Space Charge Region Width Determination by Modelling Study’, *Proceeding of the World Renewable Energy Conference and Exhibition*, 1852 – 1855, 1998.

[20] A. B. Arab, Photovoltaic properties and high efficiency of preferentially doped polysilicon solar cells *Solid-State Electronics*, Vol. 38, N°8, (1995) Pp 1441-1447

[21] J. Dugas, ‘3D Modelling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafers’, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 32, N°1, pp. 71 – 88, 1994..

[22] C. Baccouch et al, Optimization of the Collecting Grid Front Side of a Photovoltaic Cell Dedicated to the RF Transmission, *Copyright IPCO-(2016)*, pp.72-77.

[23] A. Cheknane, et al, Optimisation et Conception d’une Grille Collectrice Appliquée aux Photopiles Fonctionnant sous Haute Concentration Solaire, *Rev.Energ.Ren.Vol.* (2004) pp.95-108.

[24] A. Cheknane et al, Minimisation of the Effect of Collecting Grid in a Solar Cell Based Silicon/ *Solar Energy Materials and Solar Cells* 87 (2005) pp.557-565.

- [25] B. Thuiller et al, 'Optimisation of Metallic Contact of Silicon Solar Cell by Electro Less Metal Deposition', 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienne (Autriche), (1998) pp.1467-1470, 6-10.
- [26] M. M. Dème et al, 'Influence de la Taille de Grain, de la Vitesse de Recombinaison aux Joints de Grain et de l'Angle d'Incidence de l'Eclairement sur l'Elargissement de la Zone de Charge d'Espace d'une Photopile Monofaciale', Journal des Sciences. Vol.9, N°2 (2009) 17-27.
- [27] A. B. Dieng et al, 'Illumination Wavelength Effect on Electrical Parameters of a Parallel Vertical Junction Silicon Solar Cell Under Steady State and Under Irradiation', IJRET: International journal of Research in Engineering and Technology Volume: 05 Issue: 07/Jul-2016, Available @ <http://ijret.esatjournals.org> eISSN: 2319-1163/ pISSN: 2321-7308.
- [28] F. I. Barro et al, "Bulk and surface recombination parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell under constant white bias light," Proc.17th European PVSEC Munich 36, pp. 368-371, 2001.
- [29] H. El. Ghitani et al, J. Appl. Phys., Vol. 66, No. 4, (1989), pp. 1717-1726
- [30] J. Ducas, Solar Energy Materials and Solar Cells, 32 (1994), pp. 71-88
- [31] P. J. gress and S. Varomov, 'Quantification of Power Losses of Interdigitated Metallization of Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells On Glass', International Journal of Photoenergy, Février. 2012.
- [32] L.S. Napoli, et al, "High-Level Concentration of Sunlight on Silicon Solar Cells", RCA Review, Vol. 38,(1977), p.76.

ANNEXE MATHEMATIQUE DU CHAPITRE III

Cas de la grille peigne.

1 : Perte due à la résistance de couche entre deux doigts.

Le courant qui passe à travers l'émetteur entre deux doigts et collecté par grille est fonction de la distance par rapport à l'axe de symétrie (ox).

$$I(y) = J_m \cdot S_{active} \quad (1)$$

$$S_{active} = B \cdot y \quad (2)$$

$$I(y) = J_m \cdot B \cdot y \quad (3)$$

La résistance élémentaire de la couche est donnée par la relation suivante :

$$dR(y) = \rho^2 \cdot \frac{dy}{B} \quad (4)$$

La puissance dissipée dans l'élément de résistance dR est donnée par :

$$dP(y) = I(y)^2 \cdot dR(y) \quad (5)$$

$$dP(y) = J_m^2 \cdot B^2 \cdot y^2 \times \rho_s \cdot \frac{dy}{B} \quad (6)$$

$$P(L) = \rho_s \cdot J_m^2 \cdot B \int_0^{\frac{L}{2}} y^2 \cdot dy \quad (7)$$

$$P(L) = \rho_s \cdot \frac{J_m^2 \cdot B \cdot L^3}{24} \quad (8)$$

Pf est la puissance que peut fournir la photopile dans un demi-motif.

$$Pf_{\frac{1}{2}} = V_m \cdot J_m \cdot B \cdot \frac{L}{2} \quad (9)$$

2 : Perte de puissance dans la métallisation de grille

a) Perte de puissance dans un doigt

Le courant qui passe dans un doigt dépend de la distance x par rapport à l'axe de symétrie xo.

$$I(x) = J_m \cdot L \cdot x \quad (10)$$

La résistance élémentaire est donnée par

$$dR(x) = \rho_M \cdot \frac{dx}{W \cdot e} \quad (11)$$

Puissance totale perdue dans un doigt est :

$$dP(x) = I(x)^2 \cdot dR(x) \quad (12)$$

$$P = \rho_M \cdot \frac{J_m^2 \cdot L^2}{W \cdot e} \int_0^B x^2 dx \quad (13)$$

$$P = \rho_M \cdot \frac{J_m^2 \cdot L^2 \cdot B^3}{3 \cdot W \cdot e} \quad (14)$$

b) Perte de puissance de la ligne collectrice

Dans ce cas, si le courant est recueilli en un seul point ou en deux extrémités de cette ligne le courant qu'y passe est fonction de y .

$$I(y) = J_m \cdot B \cdot y \quad (15)$$

La résistance élémentaire de la ligne collectrice est :

$$dR(y) = \rho_M \cdot \frac{dy}{W_E \cdot e} \quad (16)$$

La puissance dissipée est :

$$dP(y) = I(y)^2 \cdot dR(y) \quad (17)$$

$$dP(y) = J_m^2 \cdot B^2 \cdot y^2 \times \rho_M \cdot \frac{dy}{W_E \cdot e} \quad (18)$$

$$P(y) = \rho_M \cdot \frac{J_m^2 \cdot B^2}{W_E \cdot e} \int_0^{\frac{L}{2}} y^2 dy \quad (19)$$

$$P = \rho_M \cdot \frac{J_m^2 \cdot B^2 \cdot L^2}{24 \cdot W_E \cdot e} \quad (20)$$

3 : Perte de puissance due au contact métal semi-conducteur

La grille de collecte métallique assure le contact métal semi-conducteur qui à son tour crée une résistance de contact donnée par la relation suivante :

$$R_C = \frac{\rho_C}{S_C} = \frac{\rho_C}{W \cdot B} \quad (21)$$

$$I = J_m \cdot B \cdot L \quad (22)$$

La puissance perdue par ce contact est :

$$P = I^2 \cdot R_C \quad (23)$$

Le taux de perte qui correspond au contact métal semi-conducteur est :

$$\tau_c = \rho_C \cdot \frac{2 \cdot J_m \cdot L}{W \cdot V_m} \quad (24)$$

5 : Perte due à l'effet d'ombre (Taux d'ombrage)

Le taux d'ombre est défini comme le rapport de surface métallisée à la surface totale

$$S_m = WB \quad \text{et} \quad S_T = L \cdot B \quad (25)$$

