

Université Cheikh Anta Diop de Dakar



Ecole Doctorale-Physique, Chimie, Sciences de la Terre, de
l'Univers et de l'Ingénieur

Faculté des Sciences et Techniques (F.S.T)

Année : 2018-2019

N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : **Energie Solaire, Matériaux et Systèmes**

Présentée par :

Serigne Ndiangue LEYE

Etude, à 3D et à l'aide du modèle cylindrique, de la capacité de transition et de l'effet de la température sur les paramètres de la photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairnement monochromatique constant.

Soutenue publiquement le **28 Août 2019** devant le jury compose de :

<i>Président :</i>	Grégoire SISSOKO	Professeur Titulaire	FST/UCAD
<i>Rapporteur :</i>	Amadou S. MAIGA	Professeur Titulaire	UFR SAT/UGB
<i>Rapporteur :</i>	Mamadou L. SAMB	Professeur Assimilé	UFR ST/UT
<i>Examineur :</i>	Moustapha DIENG	Professeur Titulaire	FST/UCAD
<i>Examineur :</i>	Biram DIENG	Professeur Assimilé	UFR SATIC/UADB
<i>Examineur :</i>	Amadou DIAO	Professeur Assimilé	FST/UCAD
<i>Directeur de Thèse :</i>	Senghane MBODJI	Professeur Assimilé	UFR SATIC/UADB

Laboratoire des Semi-conducteurs d'Energie Solaire (LASES)-FST-UCAD

*Ce travail a été effectué au Laboratoire des
Semi-conducteurs et d'Energie Solaire
(LASES) de la Faculté des Sciences et
Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop
de Dakar et à l'Université Alioune Diop de
Bambey (Sénégal), Sous la direction de
Monsieur **Senghane Mbodji**, Professeur
Assimilé à l'Université Alioune Diop de
Bambey au Département de Physique de
l'U.F.R Sciences Appliquées et Technologies
de l'Information et de la Communication
(S.A.T.I.C).*

Citations

Rien ne peut remplacer l'énergie. Tout l'édifice de la société moderne est bâti sur elle ... Elle n'est pas « un simple produit », mais la condition préalable de tous les produits, un facteur de base égale à l'air, l'eau et la terre.

(Ernst F. Schumacher)

Pouvons nous être heureux en consommant moins d'énergie qu'aujourd'hui, ou la croissance perpétuelle de notre consommation est-elle notre principale raison de vivre ?

(Jean-Marc Jancovici)

Nous devrions nous servir des inépuisables sources d'énergie offertes par la Nature - le soleil, le vent, les marées. (...) Quelle source d'énergie ! Je mettrais mon argent dans le soleil et l'énergie solaire. J'espère que nous n'aurons pas à attendre que le pétrole et le charbon soient épuisés pour nous en apercevoir.

(Thomas Edison)

Notre passion du savoir ... notre outil de survie.

(Carl Sagan)

Dédicaces

Au nom de Dieu, le miséricordieux, le Créateur et Maître de l'univers.

Au nom du Prophète Mohamed Paix et Salut sur lui.

Au nom du Vénéré Serigne Touba Khadim Rassoul, mon guide spirituel.

Je dédie ce travail :

- *aux mémoires de ma mère et de mes grands parents, que Dieu, le Tout puissant leur accorde sa grâce ;*
- *à mon père, à qui je rends hommage pour ses sacrifices. Papa, vous avez tout sacrifié pour vos enfants en n'épargnant ni santé ni efforts. Vous nous avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance et nous sommes redevables d'une éducation dont nous sommes fiers ;*
- *à ma compagne, Ndeye Fall, qui a toujours été là pour moi malgré les multiples obstacles qui se sont dressés sur notre chemin et mes deux trèsors filles (Fatim et Maty), trouvez dans ce travail l'expression de ma profonde reconnaissance pour ces longues années de privation et d'attente que vous avez endurées ;*
- *à mes très chers frères, sœurs et plus particulièrement à*

ma grande sœur Diama qui n'a ménagé aucun effort pour la réussite de ses frères et sœurs. Si, aujourd'hui, nous n'avons pas senti l'absence de notre mère, c'est parce que tu es toujours là en veillant sur nous ;

- *à toute ma famille ;*
- *à tou(te)s mes ami(e)s ;*
- *à tou(te)s mes camarades de promotions ;*
- *à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques, ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches ;*
- *à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar plus particulièrement aux membres du laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire (LASSES) du département Physique de la Faculté des Sciences et Techniques ;*
- *à l'Université Alioune Diop de Bambey (UADB) plus particulièrement aux membres de l'Equipe de Recherche en Energies Renouvelables, Matériaux et Laser (2ER.M.L) du département Physique de l'UFRSATIC ;*
- *à tou(te)s ceux (celles) qui n'ont jamais cessé de me soutenir, de près ou de loin.*

Remerciements

Mes remerciements vont particulièrement à **Monsieur Grégoire SISSOKO**, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD, je lui exprime toute ma profonde gratitude pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de thèse.

Monsieur Amadou Seidou Hassane MAIGA, Professeur Titulaire à l'UFR de Sciences Appliquées et de Technologies Physique Appliquée de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis (UGB). Vous avez été toujours accueillant et ouvert aux différentes sollicitations des étudiants. Vos conseils ont été encourageants et bénéfiques pour les étudiants. Vos qualités relationnelles, humaines et sociales, font de vous un homme de Dieu toujours disponible à accepter les autres. Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury.

Mes remerciements vont à **Monsieur Mamadou Lamine SAMB**, Professeur Assimilé à l'UFR Sciences et Technologies du Département des Sciences Expérimentales de l'Université de Thiès (UT), pour avoir accepté de juger ce travail et de participer au Jury. Sa disponibilité à mon endroit et sa collaboration ont été très bénéfiques.

Il m'est agréable aussi de remercier **Monsieur Moustapha DIENG**, Professeur Assimilé à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD qui m'a fait honneur de s'intéresser à ce travail. Vous êtes un membre de ce jury, veuillez encore une fois, recevoir mes remerciements.

Monsieur Biram DIENG, Professeur Assimilé au Département Physique de l'UFR SATIC de l'UADB. Vous êtes un homme disponible, ouvert, accueillant et vous avez été toujours attentif aux personnes qui vous entourent. Depuis notre première année (Licence 1) jusqu'à aujourd'hui, vous nous avez accueilli avec respect et considération tout en nous incluant dans votre entourage de conseiller et d'enseignant. Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury.

Je remercie également **Monsieur Amadou DIAO**, Professeur Assimilé à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD. Personnalité humble, discrète et courtoise, votre participation à ce jury est un grand honneur pour moi.

J'adresse également ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse **Monsieur Senghane MBODJI**, Professeur Assimilé au Département Physique de l'UFR SATIC de l'Université Alioune Diop de Bambey et Directeur de l'Enseignement Supérieur Privé (DESP) à la Direction Générale de l'Enseignement Supérieur (DGES) du Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation (MESRI). Professeur, vous m'avez accordé votre confiance en m'acceptant à bras ouvert dans votre équipe de recherche. Vous m'avez guidé et soutenu depuis le début de notre collaboration (Master 2) jusqu'à aujourd'hui (Thèse). Professeur, j'ai eu énormément de plaisir et de satisfaction à travailler à vos côtés durant ces quelques années et j'ai avant tout pu apprécier la richesse scientifique et la très grande qualité de votre encadrement. Je retiendrai également vos talents de fin pédagogue, vos remarquables qualités d'expérimentateur et votre étonnante capacité à imaginer une solution à chaque problème. De plus, tout au long de cette thèse, vous avez réussi le tour de force d'être à la fois extrêmement présent et disponible tout en me laissant une entière liberté dans la conduite de mon travail. Je resterai également marqué par votre patience à toute épreuve et votre immense gentillesse. J'ai aussi découvert un Directeur de thèse d'une extrême générosité, qui s'investit sans compter pour les membres de son équipe, et à qui il tient à cœur que leurs travaux aboutissent avec succès. Votre générosité vous a même poussé à financer ma première inscription de thèse et je n'oublierai jamais cet acte. Vraiment les adjectifs me manquent pour vous qualifier mon cher Professeur, je ne pourrai jamais vous remercier assez. Enfin et surtout, j'ai particulièrement apprécié l'esprit de rigueur, de qualité et d'honnêteté scientifique que vous avez insufflé en permanence dans ce travail. Votre enthousiasme, votre exigence et votre foisonnante imagination auront été des moteurs tout au long de ces années enrichissantes.

Monsieur Mahamadi SAVADOGO, Docteur de l'Université Ouaga I Pr J. KIZERBO (Burkina Faso). Vous avez été toujours disponible à nos innombrables sollicitations. De part votre abnégation dans le travail, votre courage, votre volonté de faire toujours mieux, j'ai pu bénéficier de votre apport inégalable dans la confection de ce travail de thèse et je vous remercie pour la peine que vous vous êtes donnée pour le lire afin d'apporter les corrections idoines. Je ne cesserai jamais de vous remercier pour tout ce que vous avez fait pour l'ensemble de l'équipe que nous formons. Que Dieu le tout Puissant illumine toujours votre chemin.

Mes remerciements vont particulièrement à **Monsieur Matabara DIENG**, Docteur à l'Université Alioune Diop de Bambey, à qui je ne saurais trouver les mots justes pour lui témoigner ma profonde reconnaissance de m'avoir associé dans ces TD de Mécanique du point et de Mécanique du Solide. Qu'ALLAH le tout puissant, le miséricordieux vous bénisse.

Un grand merci aux collègues de l'UFR SATIC de l'UADB et plus particulièrement ceux du département de Physique. Il s'agit de : **Assane DIOUF**, **Dr Amy SADIO**, **Dr Fakoro Souleymane DIA**, **Tafsir Abdoulaye GAYE**, **Mohamed NGOM** et **Dr Serigne Massamba SECK**. J'associe à ces remerciements **Dr Ibrahima FALL** et **Dr**

Lat Tabara SOW, enseignants au Département Physique de l'Université Alioune Diop de Bambey, qui ont contribué à la correction de mes articles.

Dans ces remerciements, je ne pourrais oublier mes amis et chercheurs de l'Equipe de Recherche en Energies Renouvelables Matériaux et Laser (2ERML) qui sont : Badara MBOW, Khadidiatou Thiaw DIA, Elhadji Arona NDIAYE, Bada THIAW, Ibrahima NIANE, Amadou BÂ, Mamadou TRAORE, Mamadou Lamine BAMBA & tous les jeunes inscrits en thèse au département de physique de l'UFR SATIC de l'Université Alioune Diop de Bambey qui ont contribué à mon confort moral durant toutes ces années.

Merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées et qui ont, de près ou de loin, participé à la réalisation de ce travail. Merci pour leur sympathie et simplement pour le plaisir que j'ai eu à les côtoyer quotidiennement.

Table des matières

Citations	ii
Dédicaces	iii
Remerciements	v
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xiv
Nomenclature	xv
Introduction générale	1
1 Etude Bibliographique	5
1.1 Introduction	5
1.2 Les modèles d'études de la photopile au silicium polycristallin	5
1.2.1 Modèles d'études à une (1D) et deux dimensions (2D)	6
1.2.2 Modèle d'étude à trois dimensions (D)	8
1.3 Influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur les paramètres de la photopile	11
1.4 Influence du champ magnétique sur les paramètres de la photopile	14
1.5 Influence de la fréquence de modulation sur les paramètres de la photopile	15
1.6 État de l'art sur l'étude de la capacité de la photopile	17
1.7 Influence de la température sur les paramètres de la cellule solaire	22
1.8 Conclusion	31
2 Modélisation et étude de la densité des porteurs de charges minoritaires dans la base de la photopile bifaciale à grains cylindriques	34
2.1 Introduction	34
2.2 Présentation de la photopile	34
2.2.1 Description et fonctionnement de la photopile bifaciale au silicium	34
2.2.2 Equation de continuité	37
2.2.3 Résolution de l'équation de continuité	39
2.2.4 Conditions aux limites	40
2.3 Profils de la densité des porteurs minoritaires en situation de circuit-ouvert et de court-circuit	43
2.4 Effets de la longueur d'onde (λ), de la taille de grain (R) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) sur le profil de la densité des porteurs minoritaires	44

2.4.1	Effet de la longueur d'onde (λ) sur le profil de la densité des porteurs minoritaires	44
2.4.2	Effets de la taille de grain (R) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) sur le profil de la densité des porteurs minoritaires	46
2.5	Effets du mode d'éclairement et de la température sur le profil de la densité des porteurs minoritaires	48
2.6	Conclusion	50

3 Effet de la température sur les paramètres électriques de la photopile bifaciale 52

3.1	Introduction	52
3.2	Effet de la température sur la densité de photocourant	52
3.3	Effet de la température sur la phototension	54
3.4	L'influence de la température sur la densité de photocourant de court-circuit ($I_{cc,u}$) et la phototension de circuit-ouvert ($V_{co,u}$)	55
3.4.1	La densité de photocourant de court-circuit ($I_{cc,u}$)	55
3.4.2	La phototension de circuit-ouvert ($V_{co,u}$)	56
3.5	Effet de la température sur les puissances électrique et idéale de la photopile	58
3.5.1	La puissance de la photopile	58
3.5.2	La puissance idéale ($I_{cc,u} \cdot V_{co,u}$)	59
3.6	Effet de la température sur les caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$	59
3.6.1	L'effet de la température sur la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$	59
3.6.2	L'effet de la température sur la caractéristique $P - V_{ph}$	60
3.7	L'influence de la température sur le facteur de forme (FF_u) et le rendement de conversion (η_u)	61
3.7.1	Le facteur de forme (FF_u)	61
3.7.2	Le rendement de conversion (η_u)	62
3.8	Etude des coefficients de températures	64
3.8.1	Coefficient de température de la densité de photocourant de court-circuit ($\alpha_{I_{cc,u}}$)	64
3.8.2	Coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert ($\beta_{V_{co,u}}$)	65
3.8.3	Coefficient de température de la puissance maximale ($\gamma_{P_{max,u}}$)	66
3.8.4	Coefficient de température du facteur de forme χ_{FF_u}	67
3.8.5	Coefficient de température du rendement (σ_{η_u})	68
3.9	Effets du mode d'éclairement et de la température sur la capacité de diffusion de la photopile bifaciale	70
3.9.1	Capacité de diffusion de la photopile à l'interface jonction-base	70
3.9.2	Effet du mode d'éclairement	70
3.9.3	Effets de la longueur d'onde (λ), de la taille de grain (R) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) sur la capacité	72
3.9.4	Effet de la température	74
3.9.5	Effet de la température sur le rendement de la capacité de la photopile	79
3.9.6	Profils à 3D de la capacité de la photopile	80
3.10	Conclusion	83

Conclusion générale et perspectives	86
Références bibliographiques	89
A Annexe Mathématiques	102
B Annexe Communications et publications	111

Table des figures

1.1	Illustration à une dimension de la structure de la photopile bifaciale ($n^+ - p - p^+$) selon Ly et al.	6
1.2	Illustration du modèle à une dimension de la photopile $n^+ - p - p^+$ selon Nzonzolo et al.	6
1.3	Illustration à une dimension de la photopile bifaciale $n^+ - p - p^+$ selon Zerbo et al.	7
1.4	Photopile bifaciale selon Nzonzolo et al.	7
1.5	(a) Discrétisation à deux dimensions du cristal de la photopile, (b) élément triangulaire	8
1.6	Modèle du grain cylindrique isolé selon Elnahwy et al.	9
1.7	Modèle du grain de silicium isolé selon Dugas	9
1.8	Illustration du grain cylindrique isolé selon Trabelsi et al	10
1.9	Illustration de la cellule solaire à grains cylindriques selon Trabelsi et al.	11
1.10	Structure de la photopile au silicium polycristallin de type $n - p$ sous éclairiment monochromatique constant selon Mbodji et al.	12
1.11	Variation de la capacité en fonction de la vitesse dynamique à la jonction pour plusieurs taux de dopage	21
1.12	Variation de la capacité en fonction de la vitesse dynamique à la jonction pour plusieurs niveaux d'éclairiment	21
1.13	Profils de la phototension de circuit-ouvert en fonction de la température pour différents types de cellules solaires	23
1.14	Profils du facteur de forme en fonction de la température pour différents types de cellules solaires	23
1.15	Profils du photocourant de court-circuit en fonction de la température pour différents types de cellules solaires	23
1.16	Profils du rendement de conversion en fonction de la température pour différents types de cellules solaires	23
1.17	Caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ de la photopile de référence pour plusieurs températures	26
1.18	Caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ pour différentes températures	27
1.19	Caractéristiques $P - V_{ph}$ pour différentes températures	27
1.20	Evolution de la bande d'énergie avec de la température	27
1.21	Caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ pour plusieurs températures	28
1.22	Caractéristiques $P - V_{ph}$ pour plusieurs températures	28

1.23	Caractéristique $J_{ph} - V_{ph}$ pour différentes températures	29
1.24	Coefficient de diffusion en fonction du logarithme du champ magnétique et pour plusieurs températures	30
2.1	Présentation de la vue de dessus du modèle colonnaire cylindrique de la photopile bifaciale au silicium polycristallin	35
2.2	Grain ou cristallite de silicium polycristallin.	35
2.3	Illustration de la détermination des coefficients C_k	42
2.4	Profils de la densité des porteurs minoritaires en situation de circuit-ouvert et de court-circuit pour un éclairement par la face avant.	43
2.5	Effet des courtes longueurs d'onde sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairement le face avant.	45
2.6	Effet des grandes longueurs d'onde sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairement le face avant.	45
2.7	Effet de la taille de grain sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairement le face avant.	46
2.8	Effet de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairement le face avant.	47
2.9	Profils de la densité des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la température pour un éclairement par la face avant	48
2.10	Profils de la densité des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la température pour un éclairement par la face arrière	48
2.11	Profils de la densité des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la température pour un éclairement simultané par les deux faces	48
3.1	Densité de photocourant en fonction de S_f pour plusieurs températures pour un éclairement par la face avant	53
3.2	Variations de la phototension en fonction de S_f pour plusieurs températures pour un éclairement par la face avant de la photopile	55
3.3	Densité de photocourant de court-circuit en fonction de la température par un éclairement par la face avant	56
3.4	Phototension de circuit-ouvert en fonction de la température pour un éclairement par la face avant	57
3.5	Puissance de la photopile en fonction de S_f pour plusieurs températures pour un éclairement par la face avant	58
3.6	La puissance idéale en fonction de la température pour un éclairement par la face avant	59
3.7	Caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$ pour plusieurs températures pour un éclairement par la face avant	60
3.8	Caractéristique $P - V_{ph}$ pour plusieurs températures pour un éclairement par la face avant	61
3.9	Le facteur de forme en fonction de la température pour un éclairement par la face avant	62

3.10	Rendement de conversion en fonction de la température pour un éclairage par la face avant	63
3.11	Variation du coefficient de température de la densité de photocourant de court-circuit pour un éclairage par la face avant	65
3.12	Variation du coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert pour un éclairage par la face avant	66
3.13	Variation du coefficient de température de la puissance maximale en fonction de la température pour un éclairage par la face avant	67
3.14	Variation du coefficient de température du facteur de forme en fonction de la température pour un éclairage par la face avant	68
3.15	Variation du coefficient de température du rendement en fonction de la température pour un éclairage par la face avant	69
3.16	Capacité de la photopile pour les trois modes d'éclairage	71
3.17	Variations de la capacité de la photopile, pour différentes valeurs de la longueur d'onde, en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour un éclairage par la face avant.	72
3.18	Variations de la capacité de la photopile, pour différentes valeurs de la taille de grain, en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour un éclairage par la face avant.	73
3.19	Variations de la capacité de la photopile, pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour un éclairage par la face avant.	74
3.20	Capacité de la photopile bifaciale éclairée par sa face avant en fonction de S_f pour différentes températures.	75
3.21	Capacité de la photopile bifaciale éclairée par sa face avant en fonction de la phototension pour différentes températures.	76
3.22	Logarithme de la capacité de la photopile bifaciale éclairée par sa face avant en fonction de la phototension.	78
3.23	Effet de la température sur le rendement de la capacité pour un éclairage par la face avant	80
3.24	Effets de la température et de la vitesse dynamique à la jonction sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant	81
3.25	Effets de la température et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant	81
3.26	Effets de la taille de grain et de la température sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant	82
3.27	Effets de la longueur d'onde et de la température sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant	82
A.1	Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [Mbodji, 2009]	104

Liste des tableaux

1.1	Valeurs de la température et paramètres électriques de la photopile selon Tobnaghi et al.	25
2.1	Epaisseurs de la base et quelques valeurs de C_k pour une température $T = 300 K$ et une vitesse de recombinaison à la surface arrière $S_b = 10^4 cm.s^{-1}$	42
2.2	Epaisseurs de la base et quelques valeurs de C_k pour une température $T = 320 K$ et une vitesse de recombinaison à la surface arrière $S_b = 10^2 cm.s^{-1}$	42
2.3	Etude comparative de l'effet de la température sur la densité des porteurs selon le mode d'éclairement de la photopile	49
3.1	Evolution de $(I_{cc}), (V_{co}), P_m, FF$ et η avec la température	64
3.2	Les valeurs de la capacité intrinsèque $C_0(T)$ et de l'inverse de la tension thermique de la photopile pour différentes valeurs de la température	78
3.3	Les valeurs du rendement de la capacité de la photopile pour différentes températures	79
A.1	Taux de génération [Mbodji, 2009]	102
A.2	Valeurs des paramètres dont est tributaire le taux de génération [Mbodji, 2009]	102

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
r	Radial du grain	cm
z	Profondeur dans la base, comptée à partir de la jonction ($z=0$)	cm
ZCE	Zone de charge d'espace	cm
u	Indice indiquant le mode d'éclairement	
av	Indice relatif à l'éclairement par la face avant	
ar	Indice relatif à l'éclairement par la face arrière	
d	Indice relatif au double éclairement	
H	Epaisseur de la base de la photopile	μm
R	Taille de grain	cm
L	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base	cm
τ	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base	s
δ_u	Densité des porteurs minoritaires en excès dans la base	cm^{-3}
G_u	Taux de génération des porteurs de charge	$cm^{-3}.s^{-1}$
S_{gb}	Vitesse de recombinaison aux joints de grain	$cm.s^{-1}$
S_f	Vitesse dynamique à la jonction	$cm.s^{-1}$
S_b	Vitesse de recombinaison à la surface arrière	$cm.s^{-1}$
λ	Longueur d'onde	μm
I_u	Photocourant	A
V_u	Phototension	V
D	Coefficient de diffusion	$cm^2.s^{-1}$
μ	Coefficient de mobilité des électrons	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
I_0	Flux incident	$W.cm^{-2}$
R'	Coefficient de réflexion	
k, j	Indice relatif au nombre de termes de la densité série	
L_{kj}	Longueur de diffusion fonction de k et j	cm
$f_k(r)$	Expression de la partie spatiale de la densité	électrons. cm^{-3}
k_b	Constante de Boltzmann	$J.K^{-1}$
T	Température de la photopile	K
A_{kj}, K_k	Coefficients de l'expression de $f_k(r)$	électrons. cm^{-3}
S	Surface en regard des armatures d'un condensateur plan	cm^2
q	Charge élémentaire	C

n_i	Concentration intrinsèque du matériau Si	cm^{-3}
N_b	Taux de dopage des impuretés dans la base	cm^{-3}
V_T	Tension thermique	V
Q	Charge de l'armature positive	C
C	Capacité d'un condensateur	F
ϵ_0	Permittivité du vide	F.m^{-1}
C_u	Capacité de la photopile	F.cm^{-2}
C_{co}	Capacité de la photopile en circuit-ouvert	F.cm^{-2}
C_{cc}	Capacité de la photopile en court-circuit	F.cm^{-2}
C_{max}	Capacité maximale de la photopile	F.cm^{-2}
C_{min}	Capacité minimale de la photopile	F.cm^{-2}
$Z_{0,u}$	Extension de la zone de charge d'espace	cm
$Z_{0,u,co}$	Extension de la zone de charge d'espace, en circuit-ouvert	cm
$Z_{0,u,cc}$	Extension de la zone de charge d'espace, en court-circuit	cm
η_c	Rendement de la capacité	%
η_u	Rendement de conversion de la photopile	%
FF	Facteur de forme	
$I_{cc,u}$	Densité de photocourant de court-circuit	A.cm^{-2}
$V_{co,u}$	Phototension de circuit-ouvert	mV
$P_{m,u}$	Puissance maximale	mW.cm^{-2}
$\alpha_{I_{cc,u}}$	Coefficient de température de $I_{cc,u}$	K^{-1}
$\beta_{V_{co,u}}$	Coefficient de température de $V_{co,u}$	K^{-1}
$\gamma_{P_{m,u}}$	Coefficient de température de $P_{m,u}$	K^{-1}
χ_{FF_u}	Coefficient de température de FF_u	K^{-1}
σ_{η_u}	Coefficient de température de η_u	K^{-1}

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrielles ne cessent d'augmenter avec un taux annuel de 1,1 % [Scenario et al., 2015]. Par ailleurs, les pays en voie de développement ont besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, 80 % de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles [Bennouna et al., 2007 ; Thiaux, 2010]. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et à une augmentation de la pollution [Sims, 2004]. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles, réduit les réserves de ce type d'énergie de façon périlleuse pour les générations futures. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'utiliser les énergies renouvelables qui se régénèrent naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation [Pazheri et al., 2014]. Parmi ces énergies, l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de génération infinie à notre échelle. L'énergie solaire est alors une sérieuse alternative face à la demande croissante en énergie. Cette énergie peut être utilisée directement sous forme thermique ou par la conversion de la lumière en électricité appelée effet photovoltaïque (découvert par E. Becquerel en 1839). Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milli-Watts au méga-Watts, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre [Corinne, 2003]. Ainsi, la conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie des photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisée, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité de collecter des porteurs de charges avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. En outre, d'après les recherches faites par les chercheurs scientifiques sur les photopiles, nous avons remarqué que le problème qui se pose principalement à cette énergie est le rendement des cellules solaires. En effet, les rendements les plus élevés sont inférieurs à 17 % car la photopile est une boîte noire au sein de laquelle les processus de recombinaison en volume [Correa, 1996 ; Ricaud, 1997] et aux interfaces surfaciques [Equer, 1993 ; Correa, 1996] de la photopile, limitent considérablement la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. La maîtrise des processus de recombinaison entraînera inéluctablement la production de meilleurs rendements des photopiles.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Par conséquence, l'étude pour

améliorer l'efficacité de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre qui n'émet pas de gaz à effet de serre, mérite vraiment d'être mise en contribution.

La plupart des expériences ont montré que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres internes (liés au dispositif lui-même, la technologie d'élaboration du dispositif photovoltaïque) et externes (liés à l'entourage du fonctionnement : éclairage, température, etc) [Pastor, 2006 ; Cédric, 2008]. L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des photopiles, est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur les caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ des photopiles. D'où, l'étude de l'influence de l'éclairage et de la température sur le fonctionnement des cellules solaires pour optimiser la performance de ces systèmes photovoltaïques puisqu'ils sont exposés au rayonnement solaire. En particulier les performances électriques d'une photopile au silicium sont très sensibles à l'éclairage et à la température.

Pour répondre à ces exigences, des paramètres de recombinaison et la caractérisation des cellules solaires. Ceci permet de déterminer les paramètres phénoménologiques et les paramètres électriques des photopiles.

Dans ce travail, nous portons notre choix sur les photopiles bifaciales $N^+ - P - P^+$ au silicium polycristallin. Ce type de photopile présente un champ électrique arrière qui limite les recombinaisons à la face arrière.

Cependant, les cellules solaire au silicium polycristallin bien que moins coûteux, présentent un handicap majeur : elles sont constituées de grains séparés les unes des autres par des joints de grains [Lhermite, 1988]. Ainsi, cette constitution du silicium polycristallin entraîne deux défauts :

- les imperfections chimiques qui sont l'oxygène, le carbone, le bore, l'azote, le fer, le cuivre, le nickel, le magnésium, l'or, etc. L'introduction de ces défauts chimiques est volontaire s'ils sont utilisés pour le dopage. Dans le cas contraire, ils sont indésirables et s'introduisent soit pendant la purification ou lors de la recristallisation [Lhermite, 1988] ;
- les difformités physiques sont les dislocations et les joints de grain. La vitesse dynamique à la jonction traduisant les recombinaisons à la jonction et la charge externe [Sissoko, 1993], [Diallo et al., 2008], la vitesse de recombinaison à la face arrière [Dieng, 2002] et la vitesse de recombinaison aux joints de grains.

Dans ce qui suit, il s'agira pour nous, de mener une étude de l'effet de la température sur les paramètres électriques des cellules solaires qui sont : la densité de photocourant, la phototension, la puissance, la densité de photocourant de court-circuit, la phototension de circuit-ouvert, la capacité de diffusion, le facteur de forme, le rendement de conversion et les coefficients de température de la photopile bifaciale éclairée par une lumière monochromatique constante.

Ainsi, pour apporter notre contribution à ce challenge, nous nous proposons dans un premier chapitre, une étude bibliographique basée sur :

- les modèles d'études de la photopile au silicium polycristallin ;
- les influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur les paramètres de la photopile ;
- l'influence du champ magnétique et de la fréquence de modulation sur les para-

mètres de la photopile ;

- l'état de l'art de l'étude de la capacité de la photopile ;
- l'influence de la température sur les paramètres électriques des cellules solaires.

Puis, au deuxième chapitre, nous procéderons à une modélisation et à une étude de la densité des porteurs de charges minoritaires dans la base de la photopile bifaciale éclairée par un éclairage monochromatique constant en utilisant les fonctions de Bessel [Elnahwy et al., 1988] pour résoudre l'équation de continuité. Cette résolution nous permettra d'avoir l'expression de la densité des porteurs de charges afin d'étudier les effets de la température et de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) sur celle-ci.

Dans le dernier chapitre, une étude de l'effet de la température sur les paramètres électriques de la photopile aux grains cylindriques sera proposée.

Enfin, nous allons présenter une conclusion générale puis dégager quelques perspectives pouvant servir à la poursuite de ce travail scientifique.

Chapitre 1 :

Etude Bibliographique

Chapitre 1

Etude Bibliographique

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, quelques travaux de modélisation à une (1D), deux (2D) et trois dimensions (3D) de la cellule solaire au silicium cristallin. Nous présentons aussi des résultats d'études réalisées sur les effets de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, de la taille de grain, du champ magnétique et de la fréquence de modulation sur les paramètres électriques et électroniques d'une photopile. A la suite de cela, les résultats d'un certain nombre de travaux réalisés sur la capacité de la photopile sont présentés.

Pour terminer, nous exposons les résultats de travaux réalisés sur l'effet de la température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque.

1.2 Les modèles d'études de la photopile au silicium polycristallin

Le substrat polycristallin est obtenu à partir du silicium de bonne qualité électronique [Corréa, 1996]. Le procédé de fabrication consiste à fusionner le dopage du silicium fondu par du gaz phosphine ou du diborane. Après cette phase, on procède à une recristallisation progressive du silicium dopé. C'est pendant cette phase de recristallisation que se produisent des défauts ponctuels dans le substrat polycristallin. Parmi les principaux défauts, on note les joints de grain et les sous joints de grain qui agissent comme des centres de recombinaisons aux joints de grain.

Pour une meilleure performance de la photopile, il est donc nécessaire de prendre en compte l'influence de ces centres de recombinaisons sur les paramètres des cellules solaires. Cette prise en compte des recombinaisons aux niveaux des joints de grain passe par l'adoption d'un modèle d'étude adéquat de la photopile au silicium polycristallin. D'ailleurs, nous allons faire une description détaillée de quelques modèles (colonnaires cubiques et colonnaires cylindriques) utilisés dans des études à 1D, 2D et 3D d'une photopile au silicium cristallin.

1.2.1 Modèles d'études à une (1D) et deux dimensions (2D)

Dans une étude basée sur la détermination des paramètres de recombinaison d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multi-spectral constant en régime statique, Ly et al. [Ly et al., 2012] ont utilisé un modèle unidimensionnel. Dans ce modèle, l'origine de l'axe ($x = 0$) coïncide avec la jonction de la photopile comme le montre la figure 1.1 ci-après.

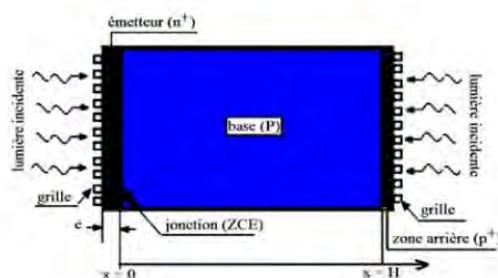


Figure 1.1 – Illustration à une dimension de la structure de la photopile bifaciale ($n^+ - p - p^+$) selon Ly et al.

Les auteurs ont travaillé dans la théorie de la base quasi neutre (Q.N.B) et ont négligé la contribution de l'émetteur.

A partir de ce modèle, les auteurs ont déterminé trois techniques de calcul de la longueur de diffusion effective. Ils ont également déterminé les vitesses de recombinaison intrinsèque à la jonction et à la face arrière pour différents modes d'éclairage.

Nzonzolo et al. [Nzonzolo et al., 2014] ont aussi réalisé une étude de la photopile bifaciale de type $n^+ - p - p^+$ à travers un modèle à une dimension que la figure 1.2 ci-dessous permet d'illustrer.

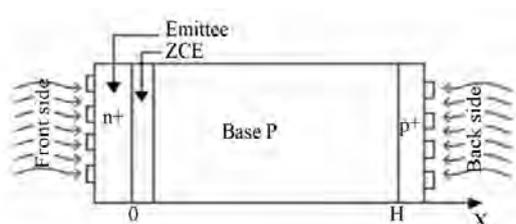


Figure 1.2 – Illustration du modèle à une dimension de la photopile $n^+ - p - p^+$ selon Nzonzolo et al.

Dans ce modèle, la contribution de l'émetteur à la densité de photocourant globale est supposée négligeable devant celle de la base d'où l'origine est prise à la jonction.

Ce modèle a permis aux auteurs de faire l'étude de l'influence du niveau d'éclairage sur le photocourant, la phototension et les résistances shunt et série.

Dans le même sens, Zerbo et al. [Zerbo et al., 2016] ont réalisé une étude à une dimension de la photopile bifaciale de type $n^+ - p - p^+$ au silicium polycristallin sous

éclairage multi-spectral dont le modèle est présenté sur la figure 1.3 ci-dessous. Zerbo et al. ont aussi travaillé dans la théorie de la base quasi-neutre et ont négligé de ce fait la contribution de l'émetteur.

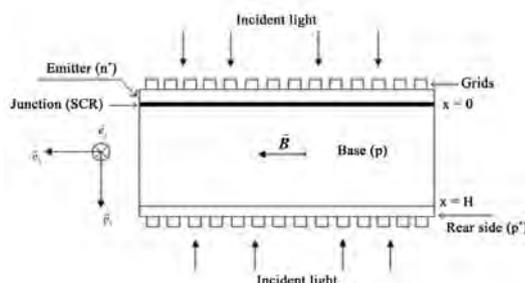


Figure 1.3 – Illustration à une dimension de la photopile bifaciale $n^+ - p - p^+$ selon Zerbo et al.

Ces travaux ont consisté à l'étude des effets d'un champ magnétique sur les caractéristiques $J_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ d'une photopile. Soumettant la photopile à un éclairage simultané par les deux faces, les auteurs ont déterminé l'équation de continuité. La résolution de cette équation permet d'obtenir les expressions de la densité des porteurs, du photocourant, de la phototension et de la puissance.

A partir de ce modèle, Zerbo et al. ont montré les effets du champ magnétique sur ces paramètres cités précédemment.

Nzonzolo et al. [Nzonzolo et al., 2016] ont par ailleurs orienté leurs travaux de recherche sur une nouvelle approche de caractérisation des cellules solaires au silicium polycristallin, basée sur un modèle à deux dimensions qui utilise la discrétisation par des éléments finis pour représenter la structure de la photopile.

Dans le silicium polycristallin, les monocristaux de tailles très variables, sont associés de manière désordonnée et sont entourés de régions appelées joints de grains qui agissent comme des pièges pour les porteurs minoritaires.

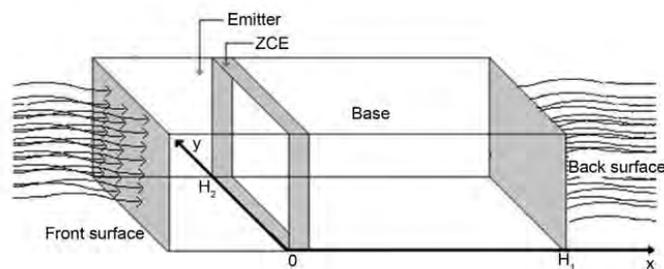


Figure 1.4 – Photopile bifaciale selon Nzonzolo et al.

La présence d'un champ électrique ou magnétique au sein de la photopile est négligée et le substrat de semi-conducteur utilisé est une couche mince ; ce qui amène donc les auteurs à négliger l'effet de son épaisseur sur la vitesse des porteurs.

Les éléments finis utilisés par les auteurs sont des éléments triangulaires réguliers en raison

de leur simplicité et leur adaptabilité aux techniques de génération de maille.

La figure 1.5 ci-dessous est l'illustration de la structure de la photopile après discrétisation ainsi qu'un élément triangulaire utilisé pour cette discrétisation.

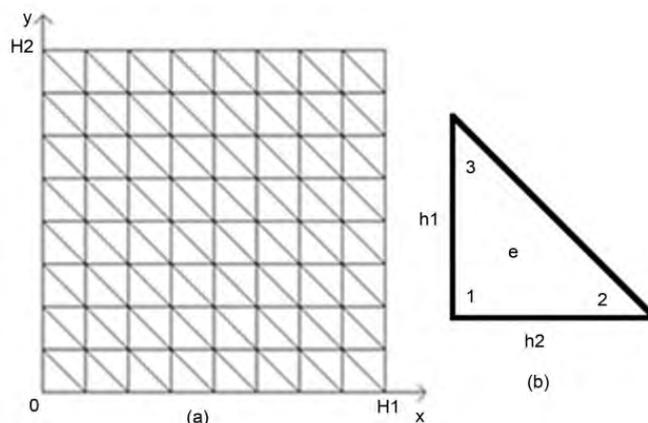


Figure 1.5 – (a) Discrétisation à deux dimensions du cristal de la photopile, (b) élément triangulaire

Les auteurs ont utilisé ce maillage pour résoudre l'équation de continuité des porteurs et déterminer les paramètres microscopiques et macroscopiques de la photopile. Il ressort que cette méthode présente un certain avantage lié à sa flexibilité et à sa précision.

1.2.2 Modèle d'étude à trois dimensions (D)

Nous présentons dans cette partie une modélisation réalisée à 3D par Elnahwy et al. [Elnahwy et al., 1988]. Dans ce modèle d'étude, les auteurs considèrent une cellule photovoltaïque au silicium polycristallin n/p constituée par des grains cylindriques supposés homogènes. Les auteurs supposent que le grain présente une symétrie azimutale et que le niveau de dopage est uniforme; par conséquent il n'existe aucun champ électrique au sein de la photopile en dehors de celui qui existe dans la zone de charge d'espace d'épaisseur W .

Dans ce modèle, les joints de grain correspondant aux surfaces latérales des grains sont considérés perpendiculaires à la jonction comme le montre la structure du grain cylindrique de la figure 1.6 ci-après.

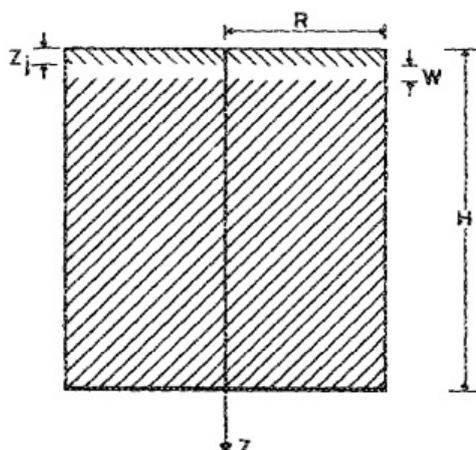


Figure 1.6 – Modèle du grain cylindrique isolé selon Elnahwy et al.

Sur la base de ces hypothèses et à l'aide des fonctions de Bessel, les auteurs ont résolu à l'aide de système de coordonnées cylindriques, l'équation de continuité des porteurs minoritaires dans la base. La résolution de cette équation de continuité a permis aux auteurs de déterminer la densité des porteurs ainsi que les paramètres d'un grain qui représente l'unité fonctionnelle de la photopile.

Dugas [Dugas, 1994] a réalisé une étude de modélisation à 3D d'une cellule solaire au silicium polycristallin. Dans ce modèle, les grains sont supposés avoir des propriétés uniformes. Les joints de grain sont perpendiculaires aux faces avant et arrière ainsi qu'à la jonction car les grains sont également supposés être dans l'orientation colonnaire. La figure 1.7 ci-dessous donne une illustration d'un grain isolé de ce modèle.

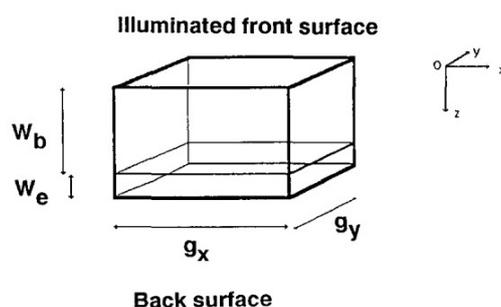


Figure 1.7 – Modèle du grain de silicium isolé selon Dugas

Ce modèle s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- les grains sont parallélépipédiques et leurs propriétés électriques sont homogènes ;
- les joints de grain sont perpendiculaires à la jonction ;
- les vitesses de recombinaison sont négligeables dans l'émetteur et dans la zone de charge d'espace ;
- la résistance série due au matériau est prise en compte alors que la résistance de contact est négligée.

- la face avant de la cellule solaire est recouverte d'une couche anti-reflet et les réflexions sur les faces avant et arrière ne sont pas considérées ;
- l'épaisseur de la base et son niveau de dopage sont respectivement égale à $0,2 \mu m$ et $5 \times 10^{19} cm^{-3}$;
- les épaisseurs de l'émetteur et de la base sont respectivement représentées par W_e et W_b ;
- l'origine des axes est prise dans le plan de la jonction, les axes x et y sont perpendiculaires aux joints de grain et l'axe z est perpendiculaire à la jonction.

Ce modèle a permis de déterminer l'expression de la densité des porteurs dans la base ainsi que celles des paramètres électriques.

Ishikawa et al. [Ishikawa et al., 2000] ont réalisé à partir du modèle colonnaire à grains cylindriques, des travaux sur les photopiles au silicium polycristallin à couches minces. La photopile étudiée dans ces travaux est une cellule solaire bifaciale de type $n^+ - p - p^+$ et le rayon de grain est estimé de l'ordre de $5 \mu m$. La face avant de la photopile est couverte à 5 % de sa surface et le reste est couvert par une couche antiréfléchissante. La partie arrière de la cellule quant à elle est supposée entièrement recouverte par une grille métallique qui permet des réflexions internes.

Trabelsi et al. [Trabelsi et al., 2009] ont également réalisé une étude à 3D d'une photopile au silicium polycristallin de type N^+ / P à partir du modèle colonnaire à grains cylindriques.

Les joints de grain considérés comme étant perpendiculaires à la surface de la photopile sont caractérisés par une vitesse de recombinaison V_g . Les niveaux de dopage de l'émetteur et de la base sont considérés comme étant uniformes, ce qui permet donc d'affirmer qu'il n'existe aucun champ au sein de la photopile en dehors de celui qui existe dans la zone de charge d'espace (Z.C.E) d'épaisseur W .

La figure 1.8 ci-dessous est l'illustration d'un grain isolé dans ce modèle.

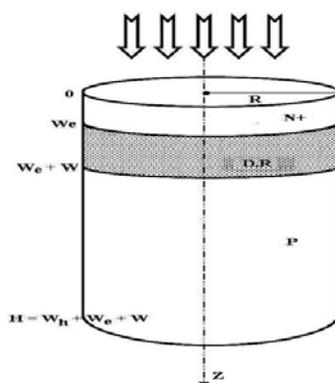


Figure 1.8 – Illustration du grain cylindrique isolé selon Trabelsi et al

Sur la base de ces hypothèses, Trabelsi et al. ont résolu l'équation de continuité des porteurs minoritaires dans le système de coordonnées cylindriques afin de déterminer les paramètres électriques liés à un seul grain. A partir des paramètres électriques du grain, les auteurs ont par la suite déterminé ceux de la photopile dans sa globalité. Pour se faire,

ils considèrent la cellule solaire comme le montre la figure 1.9, comme une juxtaposition ($n \times n$) grains cylindriques identiques et en parallèle.

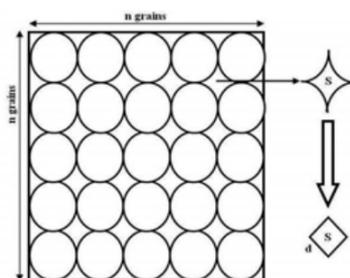


Figure 1.9 – Illustration de la cellule solaire à grains cylindriques selon Trabelsi et al.

Cette dernière considération a permis aux auteurs de déterminer les expressions des paramètres de la photopile. Sur la base de ces expressions les auteurs ont pu étudier les performances de la cellule solaire. Par ailleurs, une comparaison des paramètres de la photopile du modèle cylindrique a été faite avec ceux cubique. De cette comparaison, il est ressorti une amélioration du rendement en faveur du modèle à grain cylindrique. En effet pour le modèle cylindrique, les surfaces créées entre les joints de grains sont plus faibles que celles pour le modèle cubique ; ce qui entraîne une réduction des recombinaisons.

1.3 Influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur les paramètres de la photopile

Zoungrana et al. [Zoungrana et al., 2011] ont fait une étude à trois dimensions de l'influence de la taille de grain, de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et du champ électrique de gradient de concentration sur les paramètres électriques et électroniques d'une photopile au silicium polycristallin soumise à un éclairage multispectral intense.

Ces travaux de Zoungrana et al. ont conduit à une nouvelle expression de l'équation de continuité des électrons. Sur la base de cette équation de continuité, les auteurs ont tiré de nouvelles expressions de la densité des porteurs de charges, de la vitesse de recombinaison en face arrière, du photocourant, de la phototension et de la puissance électrique.

A partir de ces expressions, les auteurs ont étudié les influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur les paramètres électriques (J_{ph} , V_{ph} , P_{el}) et électronique (S_b) de la photopile.

Les effets de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité de photocourant sont présentés. Il est à noter que l'augmentation de la taille des grains ne modifie pas le photocourant. Par contre, au voisinage du court-circuit, l'augmentation de la taille de grain entraîne une augmentation du photocourant.

L'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grains n'influe pratiquement

pas sur le photocourant au voisinage du circuit-ouvert. Cependant au delà du circuit-ouvert, l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain entraîne une diminution considérable du photocourant.

Les auteurs ont également illustré les influences de la taille de grain et des recombinaisons aux joints de grain sur la phototension. Les résultats ont montré qu'au voisinage du circuit-ouvert, la phototension augmente avec l'augmentation de la taille des grains et diminue avec l'augmentation des recombinaisons aux joints de grain.

Toutefois, aux grandes valeurs de la vitesse dynamique, la phototension est indépendante de l'augmentation de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

Les variations de la puissance en fonction de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain ont été exposées dans ce travail. Il ressort des résultats, une augmentation et une diminution de la puissance avec les augmentations de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain respectivement.

Par ailleurs, les influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la vitesse de recombinaison en face arrière (S_b) ont été étudiées. Les résultats des auteurs ont montré que la vitesse de recombinaison en face arrière diminue avec l'augmentation de la taille de grain. Les valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain $S_{gb} < 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, n'ont pas d'influence sur la vitesse de recombinaison en face arrière. Cependant lorsque $S_{gb} > 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, la vitesse de recombinaison en face arrière augmente avec l'augmentation de S_{gb} .

Dieng et al. [Dieng et al., 2011] ont réalisé une étude de l'influence de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur le rendement de conversion de la photopile en 3D. Les variations du rendement de conversion en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et du champ magnétique ont été simulées. De cette simulation, il découle que l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain entraîne la diminution du rendement de conversion et cela quelque soit la valeur du champ magnétique.

Mbodji et al. [Mbodji et al., 2011b] se sont aussi intéressés aux influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain dans une étude réalisée sous éclairage monochromatique. Dans cette étude qui s'est faite en régime statique, les auteurs ont travaillé dans la théorie de la base quasi-neutre et ont négligé le champ cristallin au sein de la base de la photopile. La contribution de l'émetteur a également été négligée.

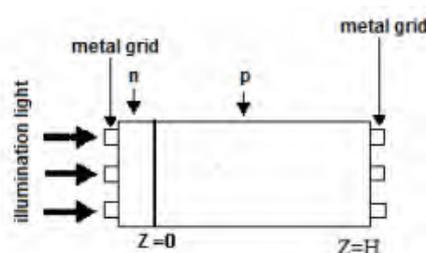


Figure 1.10 – Structure de la photopile au silicium polycristallin de type $n - p$ sous éclairage monochromatique constant selon Mbodji et al.

Sur la base de leur modèle, les auteurs obtiennent l'équation de continuité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile donnée par l'équation 1.1 ci-dessous :

$$D \cdot \left(\frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \delta(x, y, z)}{\partial^2 z} \right) - \frac{\delta(x, y, z)}{\tau} = -G(z) \quad (1.1)$$

La résolution de l'équation 1.1 a permis par la suite de déterminer les expressions de la densité des porteurs, du photocourant (I_{ph}), de la phototension (V_{ph}) et de la puissance électrique (P).

Sur la base de ces expressions, les auteurs ont tracé pour différentes valeurs de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain les courbes des caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$. De l'analyse de ces caractéristiques, il ressort que :

- le photocourant, la phototension et la puissance électrique augmentent respectivement avec l'augmentation de la taille de grain ;
- le photocourant, la phototension et la puissance électrique diminuent respectivement avec l'augmentation de vitesse de recombinaison aux joints de grain.

Dans le même sens Dione et al. [Dione et al.,2013] ont réalisé une étude sur les influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison sur les paramètres électriques de la photopile et notamment sur les résistances shunt et série.

Dans ces travaux, les auteurs considèrent une photopile sous éclairage polychromatique . La résolution de l'équation de continuité permet de déterminer l'expression de la densité des porteurs. Ce qui permet d'obtenir les expressions du photocourant et de la phototension pour en déduire celles des résistances shunt et série données respectivement par les équations 1.2 et 1.3 ci-dessous.

$$R_{sh} = \frac{V_{ph}}{I_{cc} - I_{ph}} \quad (1.2)$$

$$R_s = \frac{V_{co} - V_{ph}}{I_{ph}} \quad (1.3)$$

- par rapport à la résistance shunt

Les variations de la résistance shunt ont été tracées respectivement en fonction de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain. Les résultats ont montré que :

- ✘ l'augmentation de la taille de grain entraîne une augmentation de la résistance shunt ;
- ✘ l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain entraîne une diminution de la résistance shunt.

- par rapport à la résistance série

Les courbes de variations de la résistance série en fonction de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain ont également été exposées. Nous avons remarqué que l'augmentation de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain entraînent respectivement une diminution et une augmentation de la résistance série.

1.4 Influence du champ magnétique sur les paramètres de la photopile

Dieng et al. [Dieng et al., 2011] ont réalisé une étude de la photopile au silicium polycristallin fonctionnant en régime dynamique sous illumination polychromatique et soumis à un champ magnétique. La résolution de l'équation de continuité des porteurs minoritaires a permis de déterminer les expressions de la densité de photocourant, de la phototension, de la puissance et du rendement de conversion. Par la suite, les caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ ont été tracées pour plusieurs valeurs du champ magnétique. L'analyse, de ces caractéristiques, ont montré que l'augmentation du champ magnétique entraîne la diminution de la densité du photocourant de court-circuit et la phototension de circuit-ouvert et par conséquent la diminution de la puissance délivrée par la photopile.

Samb et al. [Samb et al., 2010] ont étudié l'effet du champ magnétique sur la densité des porteurs et la caractéristique photocourant-phototension ($I_{ph} - V_{ph}$) d'une photopile au silicium polycristallin soumise à un éclairage multi-spectral. Sur la base de leur modèle, les auteurs ont déterminé l'équation de continuité des porteurs. La résolution de l'équation de continuité a permis par la suite d'obtenir les expressions des densités de porteurs, du photocourant et de la phototension.

A partir de ces expressions, Samb et al. ont tracé, en trois dimensions, la variation de la densité de porteurs en fonction de la profondeur et du champ magnétique. Il a été ressorti que les faibles valeurs du champ magnétique inférieures à $7 \times 10^{-5} T$ n'ont pas d'influence sur la densité des porteurs. Cependant, pour des valeurs du champ magnétique supérieures à $7 \times 10^{-5} T$, la densité des porteurs de charge au voisinage de la jonction augmente de manière considérable et le maximum de cette densité se déplace vers la jonction [Zoungrana et al., 2007]. En présence du champ magnétique, les porteurs de charge en mouvement sont déviés de leur trajectoire initiale entraînant un blocage de certains d'entre eux. C'est ce qui explique la croissance de la densité au niveau de la jonction lorsque le champ magnétique augmente.

Sur la base de leur modèle, les auteurs ont aussi tracé pour différentes valeurs du champ magnétique les courbes de la variation de la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$. Nous avons constaté que lorsque le champ magnétique augmente :

- le photocourant diminue ;
- la phototension augmente.

On note également que la présence d'un champ magnétique dans la base de la photopile augmente la production de la phototension mais diminue la densité de photocourant. Ce phénomène est la conséquence de la déflexion des porteurs due à la présence du champ magnétique.

Mbodji et al. [Mbodji et al., 2015] se sont intéressés à l'effet d'un champ magnétique sur la phototension d'une photopile bifaciale en régime transitoire sous éclairage monochromatique.

A partir de leur modèle, les auteurs ont tiré l'expression de la phototension donnée par l'équation 1.4 ci-dessous :

$$V(t) = V_T \cdot \ln \left[\frac{\delta(0, t)}{\delta\phi} \cdot \exp \left(\frac{\Delta V}{V_T} \right) \right] \quad (1.4)$$

Les auteurs ont illustré les variations de la chute de la phototension en régime transitoire pour différentes valeurs du champ magnétique en se basant sur l'équation 1.4. Les résultats ont montré que l'augmentation du champ magnétique entraîne une diminution de la chute de tension aux bornes de la cellule en régime transitoire et donc une augmentation de la phototension.

1.5 Influence de la fréquence de modulation sur les paramètres de la photopile

Nous présentons ici les résultats de l'étude du photocourant réalisée par Thiam et al. [Thiam et al., 2012] sur l'effet de la fréquence de modulation d'une cellule solaire au silicium de type $n^+ - p - p^+$ sous éclairage multi-spectral.

Sur la base des simulations, l'effet de la fréquence de modulation sur le photocourant a été tracé. Il résulte de ces résultats que l'augmentation de la fréquence de modulation entraîne une diminution du photocourant.

Dans la suite de leurs travaux, Dieng et al. [Dieng et al., 2011] ont également étudié l'influence de la pulsation sur les caractéristiques photocourant-phototension ($I_{ph} - V_{ph}$) et puissance-phototension ($P - V_{ph}$).

Sur la base de leur modèle, les auteurs ont simulé l'influence de la pulsation sur les caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$. De l'analyse des résultats, nous avons remarqué que :

- l'augmentation de la pulsation entraîne la diminution de la densité du photocourant de court-circuit et de la phototension de circuit-ouvert ;
- l'augmentation de la pulsation entraîne aussi une diminution de la puissance de la photopile.

Le diagramme de Bode de l'amplitude de l'impédance en fonction de la pulsation a également été tracé. Pour un champ magnétique est faible ($B = 10^{-8} \text{ Tesla}$), les résultats ont montré que :

- pour des pulsations $0 < \omega < \omega_{c1}$, le module de l'impédance reste constant. Avec ω_{c1} la fréquence de coupure qui correspond au point d'intersection des prolongements des deux parties linéaires de la courbe lorsque le champ $B = 10^{-8} \text{ Tesla}$;
- pour $\omega > \omega_{c1}$, le module de l'impédance augmente avec la pulsation.

Cependant pour un champ magnétique intense ($B = 1.5 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$ et $B = 3 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$), les résultats ont aussi montré que :

- pour $0 < \omega < \omega_{c2,c3}$, le module de l'impédance est indépendant de la pulsation. La notation $\omega_{c2,c3}$ s'explique par le fait que les fréquences de coupures ω_{c2} et ω_{c3} correspondant respectivement aux champs magnétiques $B = 1.5 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$ et $B = 3 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$ sont pratiquement les mêmes ;
- pour $\omega > \omega_{c2,c3}$, le module de l'impédance décroît avec la pulsation.

Le diagramme de Bode de la phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation a également été présenté. Les courbes ont montré que :

- pour des pulsations $0 < \omega < \omega_1$, la phase de l'impédance est indépendante de la pulsation quelque soit la valeur du champ magnétique : on est encore dans un

état quasi-stable. ω_1 étant la valeur de la pulsation lorsque la phase de l'impédance commence à varier ;

- la phase de l'impédance diminue rapidement avec $\omega_1 < \omega < \omega_2$ avant de croître lorsque $\omega > \omega_2$. ω_2 étant la valeur de la pulsation lorsque la phase de l'impédance commence à augmenter ;
- la phase de l'impédance augmente avec la pulsation pour $\omega > \omega_1$.

Dans l'étude réalisée sur l'effet de de la fréquence de modulation sur la photopile bifaciale, Ndiaye et al. [Ndiaye et al., 2012] ont déterminé l'équation de continuité des porteurs.

La résolution de cette équation leur a permis d'avoir l'expression de la densité des porteurs. A partir de l'expression de cette dernière, les auteurs ont déterminé les expressions du photocourant et de la vitesse de recombinaison à la face arrière. Leurs expressions sont données par les équations 1.5 et 1.6 ci-après.

$$I_3(\lambda, \omega, S_{f3}, S_{b3}) = q.D. \frac{\partial \delta_3(x, \lambda, \omega, S_{f3}, S_{b3})}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (1.5)$$

$$S_{b3} = D. \frac{\left[L(\omega). \alpha \left\{ 1 + \cosh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) \right\} + \sinh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) \right] \cdot \exp(-\alpha.H) - L(\omega). \alpha. \left[1 + \cosh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) + \sinh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) \right]}{L(\omega). \left[1 + \cosh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) - L(\omega). \alpha. \sinh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) \right] \cdot \exp(-\alpha.H) + L(\omega). \left[1 - \cosh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) + L(\omega). \alpha. \sinh \left(\frac{H}{L(\omega)} \right) \right]} \quad (1.6)$$

Sur le base de ces résultats, Ndiaye et al. ont obtenu les courbes représentant respectivement l'effet de la fréquence de modulation sur le photocourant et la vitesse de recombinaison à la surface arrière. Les résultats ont montré que :

- le photocourant ne varie pas dans l'intervalle compris entre 0 et $4 \times 10^4 \text{ rad.s}^{-1}$, ensuite il diminue jusqu'à $6 \times 10^6 \text{ rad.s}^{-1}$ où il disparaît complètement : donc les grandes valeurs de la fréquence de modulation bloquent le processus de relaxation de la photopile ;
- la phase de la vitesse de recombinaison à la surface arrière est constante pour les faibles fréquences de modulation. Pour les grandes fréquences de modulation, la phase augmente mais reste négative : les effets de la vitesse de recombinaison à la surface arrière sont de type capacitifs.

Nous présentons ici les travaux réalisés par Ndiaye et al. [Ndiaye et al., 2015] sur l'influence de la fréquence de modulation (ω) sur la vitesse dynamique à la jonction (S_f). A partir de l'expression de S_f , les auteurs ont simulé respectivement l'influence de la fréquence de modulation sur la phase et la partie imaginaire de S_f . L'analyse des courbes a révélé que :

- la phase de S_f est constante et négative jusqu'à une fréquence égale à 10^3 rad.s^{-1} : cela se traduit par une domination des effets capacitifs. Ensuite pour les fréquences élevées, la phase est à la fois négative et positive : ce qui correspond à la présence des effets inductifs et capacitifs simultanément ;

- la partie imaginaire est constante jusqu'à $\omega \approx 10^6 \text{ rad.s}^{-1}$ puis elle augmente jusqu'à atteindre son maximum à la fréquence $\omega_c = 10^{6.2} \text{ rad.s}^{-1}$ qui est la fréquence critique, elle diminue jusqu'à son état initial ; ce qui justifie la présence simultanée des effets inductifs et capacitifs citée précédemment.

1.6 État de l'art sur l'étude de la capacité de la photopile

Dans cette partie, nous faisons une étude descriptive des résultats d'études de la capacité des photopiles de différents échantillons de matériaux semi-conducteur. Ainsi des études de la capacité de la photopile par le moyen de la vitesse de recombinaison à la jonction sont présentées. Les effets de l'angle d'éclairement, de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la capacité de la photopile sont aussi analysés. Nous présentons également l'étude de la capacité de la photopile sous obscurité et le rendement de la capacité en fonction des paramètres phénoménologiques.

En outre, nous allons aborder dans ce paragraphe, l'étude de l'élargissement de la zone de charge d'espace en fonction de la taille de grain, de l'angle d'éclairement et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

La méthode de Jakubowski [Jakubowski, 1981] basée sur la mesure expérimentale des capacités maximale (C_{max}) et minimale (C_{min}) d'une cellule solaire ont permis de déterminer le taux de dopage de la base d'un substrat constitué de Métal-Isolant-Semi-conducteur (MIS) si l'épaisseur de la jonction et le potentiel de Fermi sont connus. A cet effet, pour une $C_{max} = 100 \text{ pF}$ et $C_{min} = 50 \text{ pF}$, les auteurs trouvent un taux de dopage de la base de la photopile égale à $N_B = 8.9.10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Rabbani et Lamb [Rabbani et Lamb, 1981] ont fait l'étude de la capacité transitoire du substrat d'un métal-oxyde-semi-conducteur (MOS) sous excitation pulsée.

A partir de la caractéristique Capacité-temps ($C - t$), le logarithme de l'épaisseur de la zone de déplétion est tracé en fonction du temps et l'exploitation de cette courbe fournit des expressions de l'épaisseur en fonction du temps et de la capacité transitoire relative. La combinaison de ces deux relations établit l'expression mathématique de la durée de vie des porteurs minoritaires.

La valeur trouvée par cette méthode ($129 \mu\text{s}$) est inférieure de 10 % à celle déterminée par d'autres auteurs ($144 \mu\text{s}$) qui ont utilisé d'autres techniques.

Liou et al. [Liou et al., 1988] ont également réalisé la modélisation analytique de la capacité d'une hétérojonction d'une cellule solaire. Les auteurs ont présenté d'abord le modèle de déplétion conventionnel en montrant ses limites. Ensuite, l'étude a consisté à la mise au point d'une modélisation plus adéquate pour l'épaisseur de la barrière de potentiel de la jonction.

Ils ont conclu que seul le traitement qualitatif est adéquat pour les très grandes valeurs de la tension appliquées.

Champness et al. [Champness et al., 1991] ont fait une étude des cellules solaires photovoltaïques Se-CdO sous éclairage monochromatique et par variation de la polarisation inverse appliquée afin de déterminer la longueur de diffusion L_n des électrons dans

la couche du sélénium à partir de la mesure de la capacité et du photocourant.

En considérant une longueur d'onde correspondant à la largeur de la bande interdite, la courbe de la différence ΔI des courants sous éclairissement et à l'obscurité en fonction de $\frac{1}{C}$ pour certaines valeurs de la polarisation inverse est une droite.

L'extrapolation sur l'axe $\frac{1}{C}$ donne la longueur de diffusion L_n qui croît en fonction de la température du matériau. Permettant d'affirmer que l'amélioration des rendements de ce type de cellule solaire passe par une bonne collecte des électrons dans la couche du sélénium.

L'étude en modélisation de la capacité et l'élargissement de la zone de charge d'espace de la photopile en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) traduisant le point de fonctionnement est faite par Nanema dans sa thèse de 3^e Cycle [Nanema, 1996]. Il a été prouvé une diminution du champ cristallin entraînant l'élargissement de la zone de charge d'espace quand S_f augmente. Il a été également remarqué qu'en circuit-ouvert ($S_f \rightarrow 0$), les porteurs minoritaires sont stockés de part et d'autre de la jonction entraînant une capacité élevée et un faible élargissement de la zone de charge d'espace. Alors qu'en situation de court-circuit ($S_f \rightarrow +\infty$), la capacité est faible et l'élargissement de la zone de charge d'espace est important.

Pour modéliser la capacité de la photopile bifaciale au silicium monocristallin en régime statique, Sissoko et al. [Sissoko et al., 1998] se servent de l'expression du taux de génération de l'éclairissement polychromatique défini par Furlan et Amon [Furlan et Amon, 1985], des vitesses dynamique à la jonction (S_f) [Sissoko et al., 1996] et de recombinaison à la face arrière pour résoudre l'équation de continuité des électrons dans la base.

Les courbes de densités relatives en fonction de la profondeur (X) pour différentes valeurs de S_f montrent la présence d'un maximum qui se déplace à l'intérieur de la base de la photopile et trois types de gradients. Les gradients positifs correspondent aux porteurs qui traversent la zone de charge d'espace, les gradients nuls correspondent à un stockage des électrons dans la base, délimitant ainsi l'extension de la zone de charge d'espace. Les gradients négatifs correspondent aux porteurs qui se recombinent en volume.

Le déplacement du maximum en fonction de S_f dans le volume de la base est interprété comme un élargissement de la zone de charge d'espace, donc à une collecte de porteurs devant participer à la production du courant électrique. Plus le maximum se déplace en volume quand S_f augmente, plus les porteurs traversent la jonction entraînant une augmentation du photocourant.

En partant de :

$$Q = q \cdot \delta(0) \quad (1.7)$$

où q est la charge élémentaire et $\delta(0)$ la densité des porteurs à la jonction et sachant que le rapport de la charge stockée sur la phototension, donne la capacité de la photopile, l'expression de celle-ci est déduite.

Ainsi, la courbe de la capacité en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) montre qu'en circuit-ouvert la capacité de la photopile est maximale et dépend de la présence des porteurs à la jonction. Mais en court-circuit, elle est indépendante de celle-ci et tend asymptotiquement vers zéro.

En traçant C^{-1} en fonction de la position de la densité maximale qui dépend elle-même

de S_f , les auteurs établissent la relation suivante :

$$C(S_f) = \frac{\epsilon \cdot A}{X(S_f)} \quad (1.8)$$

ϵ représente la constante diélectrique de la jonction ;

A est la surface commune en regard et

$X(S_f)$ représente l'extension de la zone de charge d'espace selon le mode de fonctionnement.

Pour mieux illustrer l'importance de la capacité de diffusion de la photopile, les auteurs ont aussi établi le profil du logarithme de la capacité en fonction de la phototension.

Ce qui a permis aux auteurs de conclure qu'en polarisation inverse, la capacité de diffusion de la photopile se réduit à celle du modèle de déplétion de Shockley.

Dans sa contribution à la détermination de la capacité de diffusion des photopiles, Barbisio [Barbisio, 2000] a conçu une technique qui permet à la photopile de fonctionner avec une fréquence sonore et de mesurer la phototension et le photocourant. Ensuite, un algorithme lui a permis de déterminer la capacité de diffusion et tous les autres paramètres de la cellule solaire.

Mbodji et al. [Mbodji et al., 2011a] ont présenté une étude en modélisation, à 3D, d'une cellule solaire bifaciale de type n^+p-p^+ au silicium polycristallin dans le but de déterminer la caractéristique de la zone de charge d'espace. La résolution de l'équation de continuité a permis de déterminer l'expression de la densité des porteurs minoritaires. De l'expression de la densité, on en déduit celle de la capacité de la cellule solaire.

La simulation de la densité relative des porteurs en fonction de la profondeur de la base lorsque la cellule solaire est en situation de circuit-ouvert et de court-circuit est faite respectivement pour un éclairage avant, arrière et simultané de la cellule solaire.

Pour la face avant, la simulation de la densité relative en fonction de la profondeur (z) de la base est faite en considérant deux valeurs de la vitesse dynamique à la jonction (S_{fj}) : le circuit-ouvert et le court-circuit. Pour une courbe donnée, il existe un maximum, une zone à gradient positif et une autre dont le gradient est négatif.

L'abscisse $Z_{0,av}$ de la densité relative maximale correspond à l'extension de la zone de charge d'espace. $Z_{0,av}$ est fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_{fj}). Quand on passe du circuit-ouvert ($S_{fj} \rightarrow 0$) au court-circuit ($S_{fj} \rightarrow +\infty$), le maximum de la densité se déplace à l'intérieur de la base. Ceci correspond à une traversée plus importante des porteurs à la jonction. La zone de gradients positifs correspond à ces porteurs, celle des gradients négatifs est liée aux porteurs qui se recombinent en volume et en surface.

Par contre, lorsque la cellule solaire est éclairée par sa face arrière, il y existe un maximum de la densité de porteurs en excès à la face arrière ; ce maximum est indépendant du point de fonctionnement de la cellule solaire. Nous notons également la présence de deux zones : la première zone qui correspond aux porteurs recombinés en volume et ceux, en faible nombre, collectés à la jonction. La deuxième zone concerne les porteurs perdus à la surface arrière de la cellule photovoltaïque.

L'éclairage simultané de la cellule solaire montre trois zones : la première zone donne les porteurs qui traversent la jonction puis la deuxième et la troisième zone correspondent respectivement aux porteurs qui se recombinent en volume et en surface de la cellule

solaire.

Les auteurs ont montré qu'il y a une extension ($Z_{0,u}$) de la zone de charge d'espace (ZCE) pour les modes d'éclairement par la face avant et simultanément par les deux faces seulement. En circuit-ouvert, l'extension de la zone de charge d'espace à la jonction correspond à $Z_{0,u,co}$; en court-circuit, elle correspond à $Z_{0,u,cc}$ (u est un indice lié au mode d'éclairement).

Le profil de l'inverse de la capacité de diffusion en fonction de l'extension de la zone de charge d'espace ($Z_{0,u}$) est présenté. Selon les auteurs, la pente de la droite est égale à $\epsilon_r \cdot \epsilon_0$. Ceci confirme l'hypothèse de [Sissoko, 1998] qui postulait que la jonction d'une cellule solaire peut être assimilée à un condensateur plan dont l'épaisseur correspond à l'extension de la zone de charge d'espace ($Z_{0,u}$).

Ce condensateur est caractérisée par une armature fixe ($Z = 0$) et une autre armature ($Z = Z_{0,u}$) en déplacement dans la base de la cellule solaire. Les deux positions limites de cette armature mobile sont $Z_{0,u,co}$ ($S_{fj} \rightarrow 0$) et $Z_{0,u,cc}$ ($S_{fj} \rightarrow +\infty$). La liberté de mouvement de l'armature mobile dépend des positions limites précédemment décrites. Plus l'écart entre $Z_{0,u,co}$ et $Z_{0,u,cc}$ est élevé, plus l'armature sera libre en mouvement et le photocourant collecté sera important. Cette situation est constatée quand la vitesse dynamique à la jonction (S_{fj}) et la taille de grain (g) augmentent. Les grandes longueurs d'onde et la vitesse de recombinaison aux joints de grain donnent des valeurs de $Z_{0,u,co}$ et $Z_{0,u,cc}$ assez proches.

L'étude du rendement [Mbodji et al., 2011a] de la capacité de la photopile bifaciale faite sur la base de l'hypothèse de la jonction assimilée à un condensateur plan montre que les meilleures photopiles correspondent à celles dont les tailles de grain sont élevées. Quand la vitesse de recombinaison aux joints de grain ou la longueur d'onde sont élevées, le rendement de la capacité est faible.

Les études de [Sissoko, 1998; Mbodji et al., 2011a; Mbodji et al., 2012] montrent le rôle central que joue la vitesse dynamique à la jonction.

Le profil de la capacité de diffusion (C_d) en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_{fj}), prenant en compte l'effet du champ magnétique, étudié par Pene et al. [Pene et al., 2013] montre l'influence négative de ce paramètre sur le fonctionnement de la photopile. En effet, en présence d'un champ magnétique, les porteurs photogénérés sont déviés. Leur mouvement vers la jonction n'est pas facile comme prouvé par le coefficient de diffusion qui baisse drastiquement avec l'augmentation du champ magnétique. Les porteurs sont stockés et ne traversent pas la jonction suite à l'augmentation du champ magnétique.

Dans les travaux de Barro et al. [Barro et al., 2015], il a été montré que le dopage de la base et le niveau d'éclairement peuvent affecter la capacité de la cellule solaire au silicium cristallin. Le travail se base sur une approche analytique à une dimension. A partir des calculs de la capacité de la cellule solaire, Barro et al. ont obtenu l'expression de l'équation 1.9 de la capacité.

$$C = \frac{q \cdot \frac{n_i^2}{N_b}}{V_t} + \frac{q \cdot \delta(x=0)}{V_t} = C_0 + C_d \quad (1.9)$$

où : $C_0 = \frac{q \cdot \frac{n_i^2}{N_b}}{V_t}$ et $C_d = \frac{q \cdot \delta(x=0)}{V_t}$

C_0 et C_d sont deux termes de la capacité de la photopile qui désignent respectivement :

- la capacité d'obscurité (C_o) de la photopile ;
- la capacité de diffusion (C_d) de la photopile.

Les figures 1.11 et 1.12 présentent respectivement la simulation de la variation de la capacité en fonction de S_f pour plusieurs taux de dopage (N_b) et plusieurs niveaux d'éclairement (n).

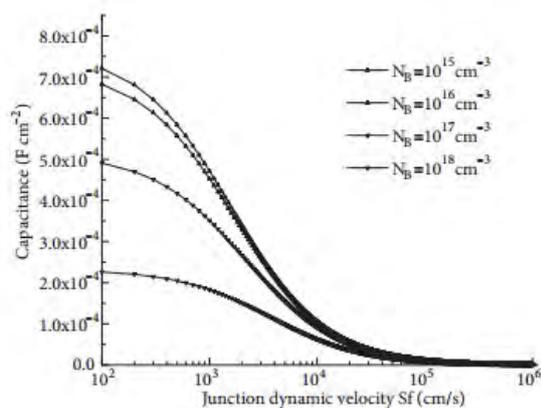


Figure 1.11 – Variation de la capacité en fonction de la vitesse dynamique à la jonction pour plusieurs taux de dopage

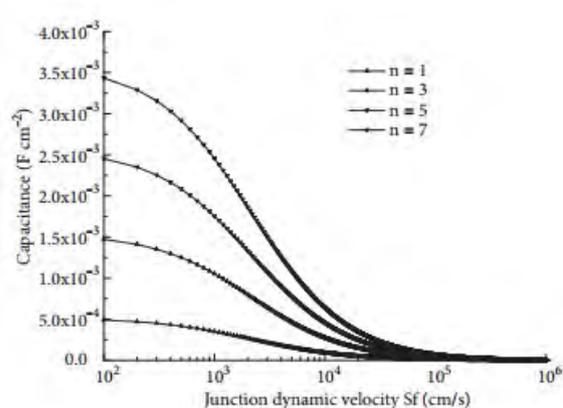


Figure 1.12 – Variation de la capacité en fonction de la vitesse dynamique à la jonction pour plusieurs niveaux d'éclairement

Les résultats de la figure 1.11 montrent que la capacité de la cellule solaire diminue avec S_f . Ce comportement peut être expliqué par le fait que quand S_f augmente, le flux des porteurs minoritaires à travers la jonction augmente afin qu'il y ait de moins en moins de porteurs libres dans la base. Ce déficit permanent de porteurs minoritaires en excès au voisinage de la jonction conduit à une diminution de la capacité. Pour les petites valeurs de S_f , les porteurs ne traversent pas la jonction et sont stockés dans la base ; ce qui donne de grandes valeurs de la capacité. Les auteurs ont montré qu'en circuit-ouvert, l'effet de la capacité est plus important et que cela peut impacter négativement l'ensemble du rendement du système si la cellule solaire est connectée à un circuit ou utilisée dans un travail de dimensionnement. Ainsi, l'augmentation du taux de dopage (N_b) de la base entraîne une diminution de la capacité ; cette diminution est plus remarquée pour les petites valeurs de S_f . En effet, l'augmentation de (N_b) conduit à la recombinaison des porteurs minoritaires en excès d'où une diminution de la capacité.

Concernant les résultats de la figure 1.12, les auteurs ont montré aussi que la capacité de la cellule solaire diminue avec S_f . Cependant, la capacité de la cellule solaire augmente avec le niveau d'éclairement. Il y a un équilibre entre le niveau d'éclairement et le niveau de la concentration du taux de dopage de la base. L'augmentation du niveau d'éclairement agit comme une passivation des centres de recombinaison contrairement à la concentration du taux de dopage de la base qui favorise les recombinaisons. Au-delà d'un certain niveau d'illumination, ils remettent en cause l'hypothèse de la quasineutralité de la base de la cellule solaire qui n'est plus valable et que le champ électrique dans la base doit être pris en compte.

Les courbes de la caractéristique capacité-phototension ($C - V_{ph}$) pour plusieurs concentrations du taux de dopage de la base ont montré que la capacité augmente avec la phototension. En effet, l'augmentation de la phototension est de plus en plus liée aux porteurs de charges stockés dans la base de la photopile. Ce qui entraîne une augmentation de la capacité.

Les auteurs ont également montré que la pente de la caractéristique $C - V_{ph}$ correspond à l'inverse de la tension thermique (V_T^{-1}) et la courbe intercepte l'axe de la capacité à une valeur qui correspond au logarithme de la capacité d'obscurité ($\log(C_o) = -6,75$); cette capacité d'obscurité équivaut à $C_o = 1,77 \times 10^{-7} F$.

Nous présentons dans cette partie, les résultats d'une étude réalisée par Diatta et al. [Diatta et al., 2015] sur l'influence de la vitesse dynamique à la jonction sur la capacité de la jonction d'une cellule solaire bifaciale au silicium polycristallin.

Selon le modèle d'étude de Diatta et al., l'expression de la capacité de la jonction est :

$$C(S_f, T) = \frac{q \cdot (n_i(T))^2}{N_b \cdot V_T} + \frac{q \cdot \delta(x=0, S_f, T)}{V_T} \quad (1.10)$$

où : $C_0(T) = \frac{q \cdot (n_i(T))^2}{N_b \cdot V_T}$ et $C_d(S_f, T) = \frac{q \cdot \delta(x=0, S_f, T)}{V_T}$

Sur la base de l'équation 1.10, les auteurs ont tracé les courbes de la capacité en fonction de la vitesse dynamique à la jonction. Les résultats ont montré que :

- au voisinage du circuit-ouvert ($S_f < 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$), la capacité est maximale et constante car les porteurs sont bloqués et stockés à la jonction ;
- en situation de court-circuit ($S_f > 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$), la capacité est très faible. Ceci est dû à un élargissement de zone de charge d'espace (X) et au passage important des porteurs de charges minoritaires à travers la jonction ;
- pour les points de fonctionnement en dehors des fonctionnement de circuit-ouvert et de court-circuit ($2.10^2 \text{ cm.s}^{-1} < S_f < 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$), la capacité diminue en fonction de S_f .

1.7 Influence de la température sur les paramètres de la cellule solaire

Dans le soucis d'améliorer les performances de la photopile, Thiam et al. [Thiam et al., 2013] ont réalisé une étude en régime dynamique, de la réponse photo-thermique d'une cellule solaire monofaciale au silicium sous éclairage multi-spectral. La résolution de l'équation de continuité a permis d'obtenir les termes de l'équation de la chaleur en présence d'une source optique. L'allure de la courbe de variation de la puissance en fonction de l'amplitude est présentée. L'augmentation de l'amplitude thermique entraîne la baisse de la puissance électrique délivrée par la photopile.

Dans le même sens, Lihan et al. [Lihan et al., 2014] ont réalisé une étude de l'influence de la température sur les cellules solaires au silicium monocristallin et multicristallin dérivées chimiques ($EG - Si$) et métallurgiques ($SoG_M - Si$) dans un intervalle de température compris entre 280 et 350 K.

Les courbes des figures 1.13, 1.14, 1.15 et 1.16 ont été tracées pour différents types de photopiles.

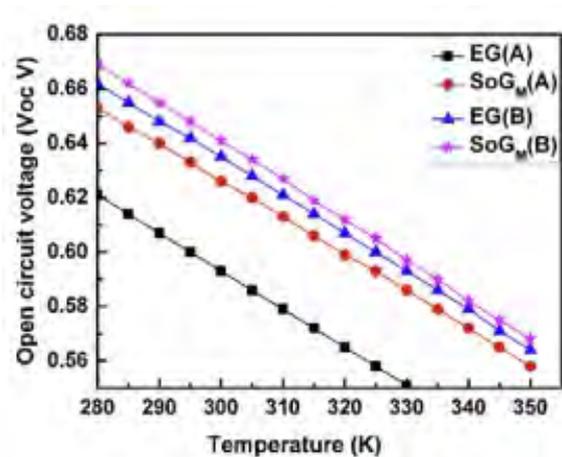


Figure 1.13 – Profils de la phototension de circuit-ouvert en fonction de la température pour différents types de cellules solaires

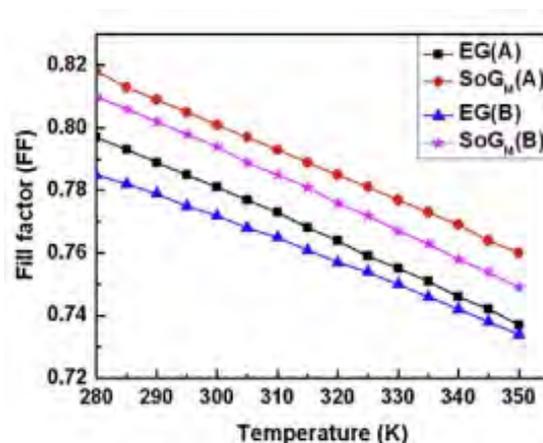


Figure 1.14 – Profils du facteur de forme en fonction de la température pour différents types de cellules solaires

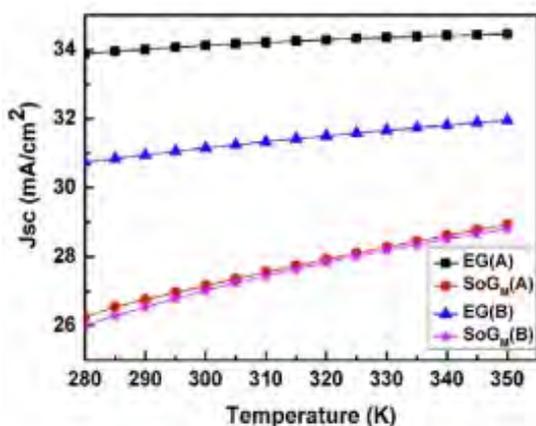


Figure 1.15 – Profils du photocourant de court-circuit en fonction de la température pour différents types de cellules solaires

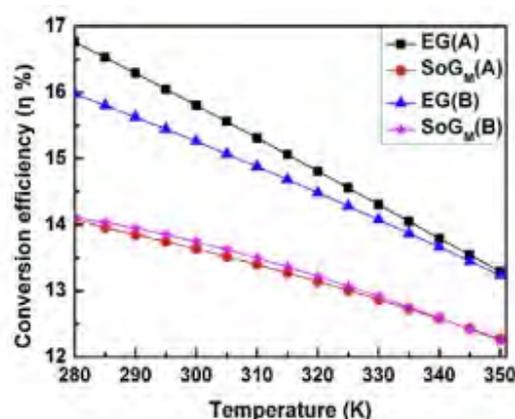


Figure 1.16 – Profils du rendement de conversion en fonction de la température pour différents types de cellules solaires

L'analyse des courbes de ces figures montre que, lorsque la température augmente, la densité de photocourant de court-circuit (I_{cc}) augmente alors que la phototension de circuit-ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η) diminuent quelque soit le type de cellule solaire.

Les résultats montrent également que la densité de photocourant de court-circuit des cellules solaires $SoG_M - Si$ augmente beaucoup plus vite que celle des cellules solaires $EG - Si$.

Berthod et al. [Berthod et al., 2016] ont réalisé une étude sur l'influence de l'irradiation sur les coefficients de température. Pour cela, les auteurs ont déterminé les expressions de la densité des porteurs, de la densité de photocourant et de la phototension.

Cette étude a montré que l'effet de la température sur la cellule solaire diminue avec l'augmentation de l'irradiation. Ainsi, il est ressorti une diminution du coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert avec l'augmentation de l'irradiation.

Dans le même sens, Diatta et al. [Diatta et al., 2016] ont étudié l'effet de la température sur la capacité de diffusion d'une cellule solaire au silicium sous éclairage polychromatique constant en régime statique.

La capacité de la photopile est assimilée à celle d'un condensateur plan ainsi son expression est donnée par l'équation 1.11 ci-dessous.

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{X} \quad (1.11)$$

Les auteurs ont alors tracé pour différentes valeurs de la température, les variations de la capacité en fonction de la vitesse dynamique. L'analyse de ces courbes ont montré que la capacité décroît quand la température augmente.

Le profil du logarithme de la capacité de court-circuit en fonction du logarithme de la température a également été exposé pour plusieurs longueurs d'onde. Nous avons remarqué dans ces résultats que :

- pour une longueur d'onde donnée, la capacité diminue lentement et de manière linéaire avec la température pour atteindre sa valeur minimale à la température $T_{opt} = 362 \text{ K}$. Au delà de cette température, la capacité croît très rapidement et également de manière linéaire ;
- l'augmentation de la longueur d'onde entraîne celle de la capacité de la photopile pour des températures inférieures à $T_{opt} = 362 \text{ K}$. Mais au delà de T_{opt} , la longueur d'onde est sans effet sur la capacité.

Par ailleurs, Ike et al. [Ike et al., 2013], ont mené des travaux sur l'effet de la température ambiante sur les performances d'un système solaire photovoltaïque.

Ces auteurs ont en effet tracé la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$ pour différentes valeurs de la température ambiante. De l'analyse des courbes de la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$, il résulte une augmentation du photocourant et une diminution de la phototension lorsque la température ambiante augmente. Les auteurs ont également montré à travers ces travaux, l'augmentation de la puissance de sortie du système photovoltaïque pendant la saison sèche. Cette augmentation de la puissance pendant la saison sèche, s'explique selon les auteurs par l'absence des nuages.

Toutefois, il est ressorti dans cette étude que les panneaux solaires doivent être installés dans des endroits où ils reçoivent le plus d'air afin que la température reste basse.

Tobnaghi et al. [Tobnaghi et al., 2013] ont réalisé une étude sur l'influence de la température sur les paramètres électriques de la cellule solaire. Ces auteurs ont montré que la température a une influence sur tous les paramètres de la photopile. Ainsi, ils ont noté une diminution de la phototension et une légère augmentation de la densité de photocourant, avec l'augmentation de la température.

Tobnaghi et al. ont également fait une étude détaillée de la phototension de circuit-ouvert (V_{co}), du photocourant de court-circuit (I_{cc}), du facteur de forme (FF) et du

rendement (η) en fonction de la température (T). Les résultats sont regroupés dans le tableau 1.1 ci-après.

Tableau 1.1 – Valeurs de la température et paramètres électriques de la photopile selon Tobnaghi et al.

T ($^{\circ}C$)	V_{co} (mV)	I_{cc} (mA.cm $^{-2}$)	V_{mp} (mV)	I_{mp} (mA.cm $^{-2}$)	FF	η (%)
15	570	33,99	450	30,99	0,727	14,63
25	563	34	443	31	0,72	13,95
30	559	34	439	31	0,716	13,61
40	554	34,01	434	31,01	0,714	12,93
50	549	34,02	429	31,02	0,712	12,25

Sur la base du tableau 1.1, nous remarquons que lorsque la température augmente, le photocourant augmente faiblement alors que les autres paramètres tels que la phototension, le facteur de forme et le rendement diminuent. Les auteurs ont affirmé que ces résultats sont en accord avec ceux de la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$ étudiée dans cet article.

Les résultats des travaux de Arjyadhara et al. [Arjyadhara et al., 2013] et de Tobnaghi et al. [Tobnaghi et al., 2013] ont été confirmés par Tobnaghi et al. [Tobnaghi et al., 2015]. En effet, ces derniers ont aussi réalisé une étude de l'effet de la température sur la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$. Les résultats ont montré une diminution de la phototension avec l'augmentation de la température. Selon les auteurs, ce phénomène est dû à la réduction de la largeur de la bande d'énergie interdite. Ces résultats ont également montré que le paramètre le plus affecté par la température est la phototension de circuit-ouvert.

Singh et al. [Singh et al., 2008] ont analysé l'effet de la variation de la température sur le photocourant de court-circuit (I_{cc}), la phototension de circuit-ouvert (V_{co}) et le rendement (η) d'une photopile au silicium. Les résultats ont montré une diminution de V_{co} et η lorsque la température augmente. Cependant, l'effet contraire a été remarqué pour I_{cc} . Les auteurs ont aussi étudié les variations de la résistance série en fonction de la phototension pour différentes températures (295 K, 305 K et 315 K). Il découle de ces résultats, que quelque soit la valeur de la température, la résistance série diminue linéairement avec la phototension. Nous avons également remarqué de l'étude que la diminution de résistance série avec la phototension devient plus rapide avec la phototension lorsque la température diminue.

Ainsi une étude comparative de l'effet de la température a été faite sur les résistances série R_s et shunt R_{sh} . Les résultats ont montré que R_s et R_{sh} diminuent linéairement avec l'augmentation de la température. Les pentes négatives de R_s et R_{sh} qui sont respectivement égales à $-0,78 \text{ m}\Omega.K^{-1}$ et $-2,96 \Omega.K^{-1}$ ont montré que R_{sh} diminue plus rapidement que R_s .

Xiao et al. [Xiao et al., 2014] ont étudié l'impact de la température sur les performances de trois photopiles formées respectivement par un cristal de silicium de référence noté Ref et deux cristaux de silicium de qualité électronique (EG-Si) dopés respectivement par du bore (C1) et du phosphore (C2). Le but de cette étude était de montrer que la cellule solaire au silicium de qualité électronique peut donner de grandes valeurs de phototension de circuit-ouvert, suite à un fort dopage de la base. Pour cela, Xiao et al.

ont fait une étude des caractéristiques photocourant-phototension ($I_{ph} - V_{ph}$) et puissance-phototension ($P - V_{ph}$) de la cellule solaire au silicium de référence sous illumination de 1000 W.m^{-2} pour différentes températures.

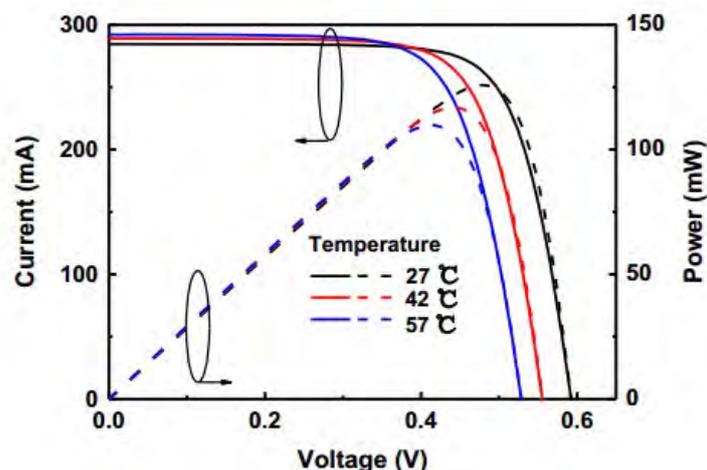


Figure 1.17 – Caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ de la photopile de référence pour plusieurs températures

La figure 1.17 montre qu'avec l'augmentation de la température, le photocourant de court-circuit (I_{cc}) augmente légèrement et la phototension de circuit-ouvert (V_{co}) diminue fortement. Selon les auteurs, la légère augmentation de I_{cc} provient du rétrécissement de la bande interdite avec l'augmentation du nombre de phonons et de la densité d'états dans les bandes de conduction et de valence, tandis que la forte diminution de V_{co} est principalement liée à l'augmentation des fuites de courant [Arora et al., 1980]. Toutefois, la puissance maximale diminue également lorsque la température augmente.

Le ratio de performance (PR) de la cellule solaire au silicium de référence et de celles dopées à différentes températures est présenté. Nous avons remarqué qu'à hautes températures, les ratios de performance des cellules solaires au silicium dopées sont relativement meilleurs à celui de la cellule solaire au silicium de référence. Par exemple, à la température de $57 \text{ }^{\circ}\text{C}$, la valeur du PR de la cellule solaire au silicium de référence est égale à 86,5 % alors que celle de C2 est égale à 87,4 %. Cela signifie que, pour la même température, les cellules solaires au silicium dopé généreront plus d'électricité que la cellule solaire au silicium de référence.

Chander et al. [Chander et al., 2015a] ont étudié l'effet de la température sur les paramètres de la photopile du silicium monocristallin. Au cours de ces travaux, les auteurs utilisent un simulateur solaire et les températures varient entre $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les courbes caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ pour différentes valeurs de la température ont été tracées aux figures 1.18 et 1.19 respectivement.

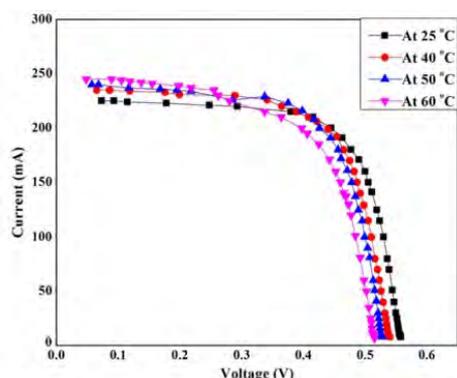


Figure 1.18 – Caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ pour différentes températures

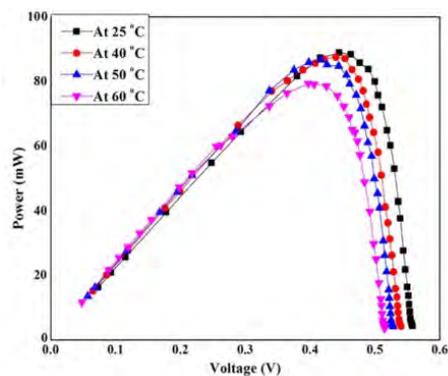


Figure 1.19 – Caractéristiques $P - V_{ph}$ pour différentes températures

Les résultats montrent que lorsque la température augmente, le photocourant augmente tandis que la phototension et la puissance diminuent.

Les auteurs ont également tracé les variations du photocourant de court-circuit (I_{cc}), de la phototension de circuit-ouvert (V_{co}) et du facteur de forme (FF), en fonction de la température. Nous avons constaté que V_{co} et FF diminuent alors que I_{cc} augmente lorsque la température croît.

Ces résultats ont également permis aux auteurs d'affirmer que les coefficients de température de la phototension de circuit-ouvert, du facteur de forme et de la puissance sont négatifs alors que celui du photocourant de court-circuit est positif. Selon les auteurs, ces résultats sont essentiellement liés à la diminution de la bande d'énergie de gap et à l'augmentation du taux de génération avec l'augmentation de la température.

Bensalem et al. [Bensalem et al., 2017] ont réalisé une étude de l'évolution de la largeur de la bande d'énergie interdite en fonction de la température.

Cette étude a permis de tracer la courbe de la figure 1.20 ci-dessous, qui donne l'évolution de la largeur de la bande d'énergie interdite du silicium en fonction de la température.

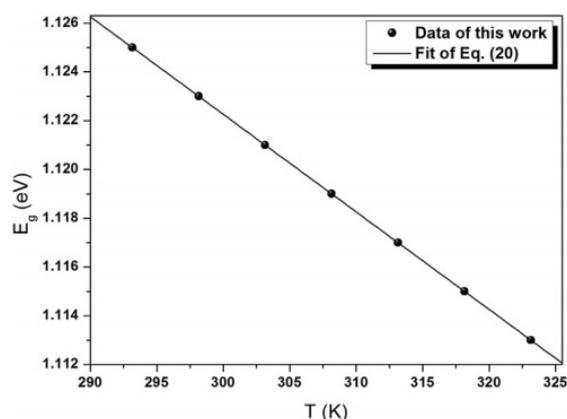


Figure 1.20 – Evolution de la bande d'énergie avec de la température

L'analyse de la courbe de la figure 1.20 montre que la largeur de la bande d'énergie

diminue de manière linéaire lorsque la température augmente.

Elnozahy et al. [Elnozahy et al., 2016] ont développé des modèles thermique et électrique afin d'estimer les performances thermique et électrique d'un module photovoltaïque en fonctionnement réel.

L'un des objectifs principaux de ce modèle électrique est l'étude des caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ d'un module PV à couche mince de puissance égale à 80 W, en fonction de la température.

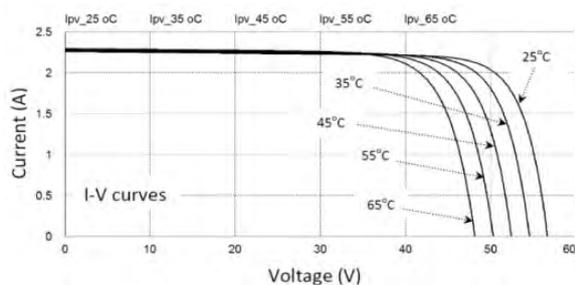


Figure 1.21 – Caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ pour plusieurs températures

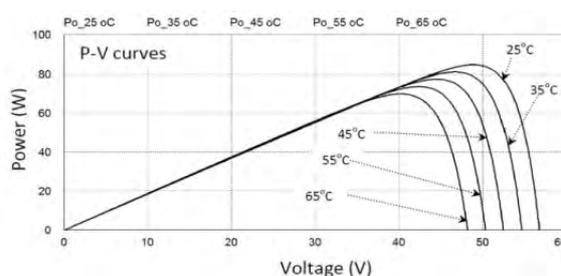


Figure 1.22 – Caractéristiques $P - V_{ph}$ pour plusieurs températures

Les courbes montrent que l'augmentation de la température entraîne l'augmentation du photocourant et la diminution de la phototension et de la puissance.

Dans le même sens, Gaye et al. [Gaye et al., 2017] ont réalisé une étude d'optimisation d'un système photovoltaïque pour alimenter un moulin. Pour cela, les auteurs ont tracé les caractéristiques $I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$ en fonction de la température. Nous notons une baisse de la phototension et de la puissance de la photopile lorsque la température augmente. Ces résultats sont en parfait accord avec ceux de Elnozahy et al. [Elnozahy et al., 2016] et de Chander et al. [Chander et al., 2015a].

Soro et al. [Soro et al., 2017] ont réalisé une étude à 3D de l'effet de la température sur la mobilité des porteurs, le coefficient de diffusion, la longueur de diffusion et la densité des porteurs sous éclairage intense. Les auteurs ont résolu l'équation de continuité afin de déterminer l'expression de la densité des porteurs.

Les variations de la mobilité des électrons et des trous en fonction de la température, ont été étudiées. L'étude a montré que la mobilité des porteurs diminue avec l'augmentation de la température dans la base de la photopile. Selon les auteurs, les porteurs sont ralentis en raison de l'augmentation des collisions lorsque la température augmente. Ce blocage s'explique aussi par l'effet du champ électrique entraînant, ainsi, l'apparition d'une force électrique qui agit comme une force de freinage. Ainsi, tous ces phénomènes contribuent à la diminution de la mobilité.

Les variations en fonction de la température du coefficient de diffusion et de la longueur de diffusion des électrons ont également été analysées par les auteurs. Il découle de l'analyse des auteurs que le coefficient de diffusion et la longueur de diffusion diminuent également avec l'augmentation de la température dans la base de la photopile.

Ehemba et al. [Ehemba et al., 2016] ont effectué des travaux de caractérisations des cellules solaires à couches minces $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. Ils ont ainsi étudié l'influence de la tempé-

rature sur la caractéristique capacité-fréquence ($C-\omega$) dans un intervalle de températures comprises entre 270 et 320 K.

Les résultats ont montré que, pour des fréquences de 100 à 10200 Hz, la capacité diminue quand la température augmente. Par contre au-delà de 10200 Hz, la capacité augmente avec l'augmentation de la température.

Cependant, les variations de la phase (ϕ) de l'impédance de la cellule en fonction du logarithme de la pulsation (ω) pour différentes températures, nous ont montré une diminution de ϕ avec l'augmentation de la température.

Par ailleurs, Khan et al. [Khan et al., 2016] ont réalisé sur l'influence de la concentration de la lumière, une étude de l'effet de la température sur les paramètres de la photopile. Les auteurs ont déterminé à partir de la caractéristique $J_{ph} - V_{ph}$, les valeurs de la densité de photocourant de court-circuit (J_{cc}), de la phototension de circuit-ouvert (V_{oc}), du facteur de forme (FF) et du rendement de conversion (η). L'étude de la caractéristique $J_{ph} - V_{ph}$ pour plusieurs températures présentée à la figure 1.23.

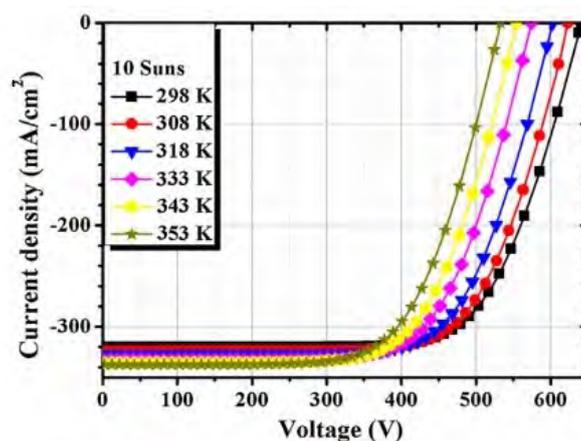


Figure 1.23 – Caractéristique $J_{ph} - V_{ph}$ pour différentes températures

Ces courbes montrent une augmentation du photocourant et une diminution de la phototension avec l'augmentation de la température.

Les variations de J_{cc} , V_{co} , FF et η en fonction de la température ont été tracées respectivement pour deux valeurs de la concentration de la lumière. Les courbes ont montré que J_{cc} croît linéairement avec l'augmentation de la température tandis que V_{co} , FF et η diminuent avec l'augmentation de la température quelque soit le niveau d'éclairement.

L'étude du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans une cellule solaire au silicium en fonction de la température a été réalisée par Mane et al. [Mane et al., 2017]. Dans cette étude, une nouvelle expression du coefficient de diffusion $D^*(B, T)$ a été déterminée. Les variations du coefficient de diffusion en fonction du logarithme du champ magnétique pour plusieurs températures ont été tracées à la figure 1.24.

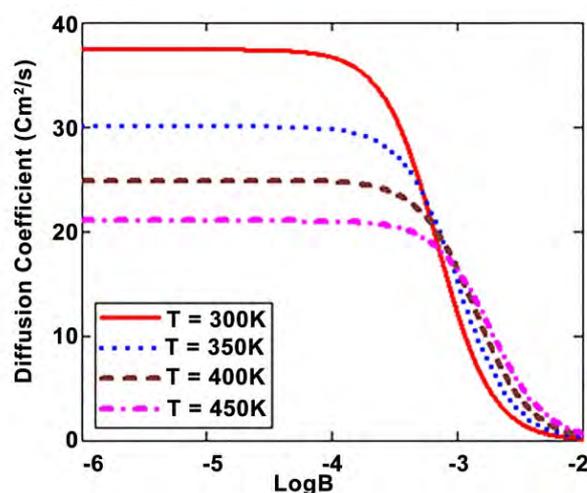


Figure 1.24 – Coefficient de diffusion en fonction du logarithme du champ magnétique et pour plusieurs températures

Pour des valeurs du champ magnétique telles que $\text{Log}(B) < 10^{-3}$ Tesla, l'augmentation de la température entraîne la diminution du coefficient de diffusion. Cependant lorsque $\text{Log}(B)$ devient supérieur à 10^{-3} Tesla, on observe une inversion du phénomène et le coefficient de diffusion augmente avec l'augmentation de la température. Nous remarquons également que le coefficient de diffusion est plus sensible à la température pour les faibles valeurs du $\text{Log}(B)$.

Singh et al. [Singh et al., 2012] ont réalisé une étude théorique de l'effet de la température sur le courant de saturation inverse, dans un intervalle de température compris entre 273 et 523 K. Les auteurs ont justifié cette étude par le fait que, le courant de saturation inverse I_0 est un courant de fuite à travers la jonction qui contrôle la quasi-totalité des performances de la photopile lorsque la température varie.

Les auteurs ont considéré des cellules solaires composées de matériaux semi-conducteurs tels que le *Ge*, le *Si*, le *GaAs*, le *InP*, le *CdTe* et le *Cds*.

L'expression du courant de saturation inverse (I_0) est donnée par l'équation 1.12 ci-après.

$$I_0 = C.T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k.T}\right) \quad (1.12)$$

Sur la base de cette expression, les auteurs ont tracé les variations du courant de saturation inverse des différents matériaux semi-conducteurs, en fonction de la température. Les résultats ont montré que, le courant de saturation inverse augmente avec l'augmentation de la température quelque soit la méthode de calcul de ce courant (cas-I, cas-II et cas-III). Les résultats ont également montré que le courant de saturation inverse de la photopile augmente avec l'augmentation de la température quelque soit le matériau du semi-conducteur. Il résulte aussi que ce courant de saturation inverse augmente avec la diminution de la bande d'énergie. Ainsi le germanium (*Ge*) qui possède la plus faible énergie de bande, présente le plus fort courant de saturation inverse.

Par rapport aux cellules solaires intégrées dans le bâtiment, Park et al. [Park et al., 2010] ont montré dans les conditions standards de température (STC), que la phototen-

sion est réduite de 0,49 % et que le photocourant croît de 0,01 % quand la température augmente d'un degré celsius. La puissance de sortie est également influencée par la température. En effet, celle-ci diminue respectivement de 0,48 et 0,52 % dans les STC et dans les conditions de fonctionnement réel (sous éclairage de 500 W/m^2) pour une augmentation d'un degré celsius.

D'autre part, l'effet de la température sur les modules photovoltaïques intégrés au bâtiment (Building-integrated Photovoltaic (BIPV)) est étudié dans les conditions de fonctionnement réel. Ainsi, les résultats montrent que la meilleure performance des panneaux est obtenue en hiver.

L'étude de l'influence de la température sur les photopiles a également été réalisée par Radziemska et Klugmann [Radziemska et Klugmann, 2002]. Dans cette étude, les auteurs ont montré que l'augmentation de la température entraîne respectivement une diminution de 0,8 % et 0,68 % de la puissance idéale ($I_{cc} \cdot V_{co}$) et de la puissance de sortie.

De même, Ghani et al. [Ghani et al., 2015] ont étudié, à l'aide d'une approche numérique, l'effet de la température sur le fonctionnement des cellules solaires. En considérant la plage de température allant de 25 à 70 °C, les variations du photocourant (I_{ph}), du courant de saturation (I_0), du facteur d'idéalité (n), des résistances série (R_s) et shunt (R_{sh}) et de la caractéristique ($I_{ph} - V_{ph}$) en fonction de la température ont été tracées.

L'analyse des résultats a montré que :

- le photocourant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0) et la résistance série (R_s) augmentent avec l'augmentation de la température ;
- le facteur d'idéalité (n), la résistance shunt (R_{sh}) et la phototension diminuent quand la température augmente.

1.8 Conclusion

Dans cette étude bibliographique, nous avons présenté différents modèles d'études de la photopile au silicium cristallin. Dans cette étude bibliographique, nous avons présenté différents modèles d'études de la photopile au silicium cristallin. Nous avons présenté des modèles à une (1D), deux (2D) et trois dimensions (3D). Ainsi, il est ressorti la nécessité d'adopter un modèle adéquat pour toute étude à trois dimensions de la photopile au silicium polycristallin.

A la suite de cela nous avons présenté des travaux portant sur les influences de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison sur les paramètres de la photopile. Il ressort essentiellement que l'augmentation de la taille de grain permet d'améliorer les performances de la photopile alors que l'augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain agit de manière néfaste sur celle-ci. De ces travaux il ressort que le champ magnétique et la fréquence de modulation ont de très fortes influences sur les performances de la photopile.

Par ailleurs, l'état de l'art sur l'étude de la capacité a été présenté. Il peut être noté que l'étude de la capacité est généralement faite sur la base de l'hypothèse de la jonction assimilée à un condensateur [Mbodji et al., 2011a] avec un rôle central accordé à la vitesse dynamique [Sissoko, 1998 ; Mbodji et al., 2011a ; Mbodji et al., 2012].

Pour terminer, nous avons présenté quelques études réalisées sur l'effet de la température sur les paramètres de la photopile. Et ces travaux ont montré l'importance de la prise en compte de la température dans la caractérisation d'une photopile à cause de sa forte influence sur la quasi-totalité des paramètres de la photopile.

Il s'agira par la suite de :

- considérer une photopile bifaciale au silicium polycristallin ;
- considérer l'effet de la température sur les paramètres électriques ;
- prendre en compte les effets de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

Dans la suite des travaux nous proposons donc de réaliser une étude, en régime statique et sous éclairage monochromatique constant, l'effet de la température sur les paramètres électrique de la photopile bifaciale à grains cylindriques au silicium polycristallin.

Chapitre 2 :
**Modélisation et étude de la densité
des porteurs de charges minoritaires
dans la base de la photopile bifaciale
à grains cylindriques**

Chapitre 2

Modélisation et étude de la densité des porteurs de charges minoritaires dans la base de la photopile bifaciale à grains cylindriques

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'abord notre modèle d'étude puis déterminer l'équation de continuité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile.

La résolution de l'équation de continuité nous permet d'obtenir pour différents modes d'éclairage, les expressions de la longueur de diffusion et de la densité des porteurs minoritaires.

Ensuite, à partir de l'expression de la longueur de diffusion, nous analysons les influences de la taille de grain R et de la température sur le phénomène de diffusion dans la base.

Enfin, nous allons également étudier les effets de la température sur le profil de la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile pour les trois modes d'éclairage.

2.2 Présentation de la photopile

2.2.1 Description et fonctionnement de la photopile bifaciale au silicium

Nous travaillons dans l'hypothèse du modèle colonnaire cylindrique qui considère le silicium polycristallin comme une juxtaposition en parallèle de grains cylindriques identiques.

La figure 2.1 représente une vue de dessus de la photopile au silicium polycristallin dans le modèle colonnaire cylindrique :

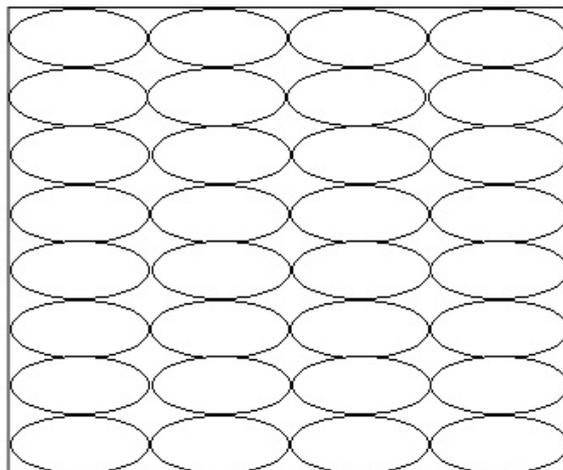


Figure 2.1 – Présentation de la vue de dessus du modèle colonnaire cylindrique de la photopile bifaciale au silicium polycristallin

Un grain de la photopile bifaciale de type $N^+ - P - P^+$ [Meier et al., 1988 ; Chenvidhya et al., 2005] est présentée à la figure 2.2.

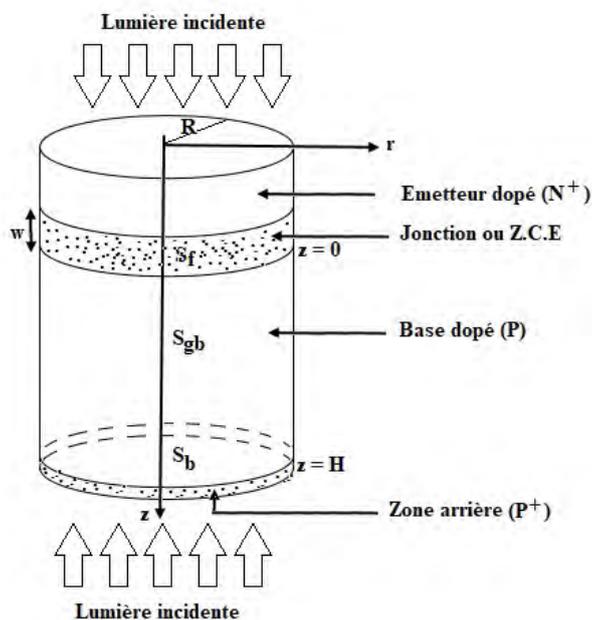


Figure 2.2 – Grain ou cristallite de silicium polycristallin.

Comme le montre la figure 2.2, le grain comprend trois parties essentielles :

- l'émetteur de faible épaisseur ($0,5$ à $1 \mu m$), est de type N^+ , il est fortement « dopé » en atomes donneurs (10^{17} à $10^{19} \text{ atom.cm}^{-3}$) et recouvert d'une grille métallique ;

- la base, relativement peu « dopée » en atomes accepteurs (10^{15} à $10^{17} \text{ atom.cm}^{-3}$), est de grande épaisseur (200 à 400 μm), est de type P . C'est la zone de prédominance des phénomènes de génération, recombinaison et diffusion. A la face arrière un surdopage (P^+) avec un dopage en atomes accepteurs (10^{17} à $10^{19} \text{ atom.cm}^{-3}$) induit la création d'un champ arrière (Back Surface Field) dont le rôle est de repousser les porteurs photogénérés en zone arrière vers l'intérieur de la base [Schneider et al., 2001 ; Nam et al., 1992]. Ce champ électrique entraîne la réduction des recombinaisons en zone arrière de ce type de photopile qui se distingue ainsi des cellules conventionnelles [Rodot et Katty, 1988 ; Barro et al., 2004].
- la jonction, entre la base et l'émetteur, représente la zone de charge d'espace (ZCE) où règne un fort champ électrique qui permet la séparation des paires électron-trou créées.

La taille de grain dépend des conditions de dépôt du substrat ; donc de la température de dépôt et de l'épaisseur de la couche mince. Elle est aussi fonction de la température de recuit et de la concentration des atomes dopants [Lhermite, 1988].

Un joint de grain actif est responsable des propriétés électriques du silicium polycristallin. C'est pourquoi deux hypothèses sont principalement considérées pour expliquer l'activité du grain :

- le modèle de ségrégation du dopant, décrivant le rassemblement des atomes autour des défauts du silicium polycristallin, pour expliquer la résistivité et la concentration des porteurs majoritaires [Lhermite, 1988] ;
- la variation de la mobilité de Hall avec la concentration du dopant [Lhermite, 1988] due au piégeage des porteurs au niveau des joints. Ce piégeage entraîne la création d'une barrière de potentiel de part et d'autre de chaque joint de grain.

Nous appliquons ces hypothèses à notre modèle à l'image du travail de J. Dugas [Dugas, 1994] :

- les grains sont cylindriques et leurs propriétés électriques sont homogènes : niveau de dopage, mobilité des porteurs, longueur de diffusion et durée de vie des porteurs minoritaires sont homogènes dans la base.
- les joints de grain sont perpendiculaires à la jonction, leur activité électrique est homogène tout le long des joints de grain et est non modifiable par l'éclairement ;
- l'influence des joints de grain est nulle à la jonction.

La différence d'énergie entre les bandes de valence et de conduction ou plus précisément la bande interdite (gap), est une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident, le gap est dit direct et les transitions sont verticales [Oleksiy, 2005]. Dans le cas du silicium, le gap est indirect, les transitions sont obliques entre les extrêmes des bandes mais toutefois, les électrons de la bande de valence peuvent être excités vers le minimum de la bande de conduction si les photons incidents ont suffisamment d'énergie. Par la suite, l'interaction photon-électron se traduit par la génération de paires électron-trou au sein de la photopile.

Des contacts électriques ohmiques assurés par des grilles métalliques adaptées sur les faces avant et arrière, permettent la collecte de porteurs photocréés dans le circuit extérieur.

Dans notre étude, nous supposons que la théorie de la quasi-neutralité de la base [Mi-

siakos et al., 1990] est satisfaite et la contribution de l'émetteur est négligée [Nanéma, 1996]. Nous nous situons dans un régime de faible injection c'est-à-dire que la densité des porteurs minoritaires photogénérés dans la base de la photopile est inférieure à celle des porteurs majoritaires (trous). Nous considérons le modèle mathématique tridimensionnel à partir de la face avant de l'émetteur prise comme origine.

Nous ne nous intéresserons qu'aux phénomènes de transport des porteurs de charge dans la base de la photopile. En éclairant la face avant (par l'émetteur) de la photopile bifaciale par un flux lumineux incident, il y'a création de paires électron-trou dans la base. La distribution des porteurs minoritaires photocréés (électrons) dans cette base est régie par l'équation de continuité dont la résolution fait l'objet de la section suivante.

2.2.2 Equation de continuité

L'équation de continuité, en régime quasi-statique, en coordonnées cylindriques s'écrit :

$$\frac{\partial^2 \delta_u(r, \theta, z, T)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \delta_u(r, \theta, z, T)}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \delta_u(r, \theta, z, T)}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \delta_u(r, \theta, z, T)}{\partial r} - \frac{\delta_u(r, \theta, z, T)}{L^2(T)} = -\frac{G_u(z)}{D(T)} \quad (2.1)$$

Nous avons supposé que les propriétés électriques des grains cylindriques sont homogènes ; ce qui donne lieu à une symétrie azimutale et dans ce cas l'angle θ n'est pas pris en compte. Le nombre de coordonnées dont dépend la densité des porteurs est réduit ainsi à deux. Par conséquent, l'équation de continuité devient :

$$\frac{\partial^2 \delta_u(r, z, T)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \delta_u(r, z, T)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \delta_u(r, z, T)}{\partial r} - \frac{1}{L^2(T)} \delta_u(r, z, T) = -\frac{G_u(z)}{D(T)} \quad (2.2)$$

$\delta_u(r, z, T)$: densité des porteurs minoritaires ;

T : température de la photopile ;

$L(T)$: longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans le grain ;

$D(T)$: coefficient de diffusion dans la base de la photopile.

La relation entre $L(T)$ et $D(T)$ s'écrit :

$$L^2(T) = \tau \cdot D(T) \quad (2.3)$$

avec

$$D(T) = \mu(T) \cdot \frac{k_b}{q} \cdot T \quad (2.4)$$

τ : durée de vie moyenne des électrons ;

$\mu(T)$ est le coefficient de mobilité des électrons [Schroder et al., 1984 ; Kunst et Sanders, 1992 ; Kolsi et al., 2010], donné par :

$$\mu(T) = 1500 \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1,5} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.5)$$

Avec :

$T_0 = 298 \text{ K}$ est la température ambiante ;

$k_b = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann ;

q est la charge élémentaire des électrons ;

u est un indice lié au mode d'éclairage et prend les valeurs av, ar et d si la photopile est éclairée respectivement par la face avant, arrière ou simultanément par les deux faces.

$G_u(z)$ est le taux de génération à une profondeur z de la base [Mbodji et al., 2010].

Ainsi nous avons :

— en éclairage par la face avant :

$$G_{av}(z) = G_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \quad (2.6)$$

— en éclairage par la face arrière :

$$G_{ar}(z) = G_0 \cdot \exp(-\alpha(H - z)) \quad (2.7)$$

— en éclairage simultané des deux faces :

$$G_d(z) = G_0 \cdot (\exp(-\alpha \cdot z) + \exp(-\alpha(H - z))) \quad (2.8)$$

où

$$G_0 = \alpha \cdot I_0(1 - R') \quad (2.9)$$

Le coefficient d'absorption α , le coefficient de réflexion (R') et le flux incident (I_0) sont tous fonction de la longueur d'onde (λ) [Green et al., 1995].

En procédant par la méthode de séparation des variables [Trabelsi et al., 2009], nous avons :

$$\delta_u(r, z, T) = \sum_{k \geq 1}^{+\infty} f_{k,u}(r, T) \sin(C_k \cdot z) + k_{k,u}(T) \quad (2.10)$$

En calculant les dérivées première et seconde par rapport au rayon r de l'axe radial et à la profondeur z de la photopile puis en remplaçant les expressions obtenues dans l'équation (2.2) et en utilisant l'expression (2.11) correspondant à la condition d'orthogonalité de la fonction sinus sur la longueur de la base [Trabelsi et al., 2009], nous obtenons les équations différentielles des trois modes d'éclairage de la photopile bifaciale.

$$\int_0^H \sin(C_k \cdot z) \cdot dz = \frac{H}{2} \cdot \delta'_{kk} \quad (2.11)$$

• pour un éclairage par la face avant :

$$f''_{k,av}(r, T) + \frac{1}{r} \cdot f'_{k,av}(r, T) - \frac{1}{L_k^2(T)} \cdot f_{k,av}(r, T) = N_{k,av} + P_{k,av}(T) \quad (2.12)$$

Avec :

$$L_k(T) = \left(C_k^2 + \frac{1}{L^2(T)} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

$L_k(T)$ est la longueur de diffusion dans le grain. Elle est fonction de k et $L(T)$ est la longueur de diffusion des porteurs dans la photopile.

$N_{k,av}$ et $P_{k,av}$ s'expriment respectivement par :

$$N_{k,av} = -\frac{2G_0}{H.D} \cdot \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} (1 + (-1)^{k+1} \cdot \exp(-\alpha.H)) \quad (2.14)$$

et

$$P_{k,av}(T) = \frac{2K_{k,av}(T)}{L^2(T).H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (2.15)$$

- pour un éclairage par la face arrière :

$$f''_{k,ar}(r, T) + \frac{1}{r} \cdot f'_{k,ar}(r, T) - \frac{1}{L_k^2}(T) \cdot f_{k,ar}(r, T) = N_{k,ar} + P_{k,ar}(T) \quad (2.16)$$

avec :

$$N_{k,ar} = -\frac{2G_0}{H.D} \cdot \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} \cdot \exp(-\alpha.H) \quad (2.17)$$

et

$$P_{k,ar}(T) = \frac{2K_{k,ar}(T)}{L^2(T).H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (2.18)$$

- pour un éclairage simultané des deux faces :

$$f''_{k,d}(r, T) + \frac{1}{r} \cdot f'_{k,d}(r, T) - \frac{1}{L_k^2}(T) \cdot f_{k,d}(r, T) = N_{k,d} + P_{k,d}(T) \quad (2.19)$$

avec :

$$N_{k,d} = -\frac{2G_0}{H.D} \cdot \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} (1 + (1 + (-1)^{k+1}) \cdot \exp(-\alpha.H)) \quad (2.20)$$

et

$$P_{k,d}(T) = \frac{2K_{k,d}(T)}{L^2(T).H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (2.21)$$

2.2.3 Résolution de l'équation de continuité

L'équation (2.12) est une fonction de Bessel du second degré avec second membre [Trabelsi et al., 2009], sa solution est donnée par l'équation (2.22) pour un éclairage avant. La solution de l'équation (2.12) est la somme de la solution de l'équation sans second membre et de la solution particulière.

$f_{k,u}(r, T)$ peut se mettre sous la forme :

$$f_{k,av}(r, T) = A_{k,av}.r + M_{k,av}(T) \quad (2.22)$$

où :

$$M_{k,av}(T) = \frac{2G_0}{H.D} \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} (1 + (-1)^{k+1} \cdot \exp(-\alpha.H)) - \frac{2K_{k,av}(T)}{L^2 H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (2.23)$$

Nous obtenons respectivement les solutions des équations (2.16) et (2.19) pour les éclairages par la face arrière et simultané en adoptant la même démarche.

Les expressions des coefficients de $A_{k,u}$ et $K_{k,u}$ sont déterminées à l'aide des conditions aux limites à la jonction et aux joints de grain [Trabelsi et al., 2009].

2.2.4 Conditions aux limites

— à la jonction de la photopile ($z = 0$) :

$$D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(r, z, T)}{\partial z} \right|_{z=0} = S_f \cdot \delta_u(r, z = 0, T) \quad (2.24)$$

S_f est la vitesse dynamique à la jonction [Mbodji et al., 2015 ; Diouf et al., 2018 ; Barro et al., 2015] ; elle est également appelée vitesse de recombinaison à la jonction [Sow et al., 2012 ; Hamidou et al., 2013]. Elle traduit à la fois le flux de porteurs qui arrivent à la jonction, la traverse et qui s'y recombinent. Elle définit le point de fonctionnement de la photopile. Généralement, on pose $S_f = S_{fj} + S_{f0}$. S_{fj} est liée à la charge externe tandis que S_{f0} est la vitesse de recombinaison intrinsèque.

Quand $S_f \rightarrow S_{f0}$, vitesse de recombinaison associée aux pertes de porteurs de charge dues à la résistance shunt. Elle caractérise également la qualité intrinsèque d'une photopile. Quand $S_f \rightarrow +\infty$, la cellule solaire fonctionne en court-circuit et S_{fj} représente la vitesse de recombinaison associée à la charge externe du circuit extérieur. Elle permet aussi de balayer l'ensemble des points de fonctionnement, du circuit-ouvert au court-circuit, de la cellule solaire.

— aux joints de grain ($r = R$) :

$$D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(r, z, T)}{\partial r} \right|_{r=R} = -S_{gb} \cdot \delta_u(r = R, z, T) \quad (2.25)$$

S_{gb} est la vitesse de recombinaison aux joints de grain.

En combinant les équations (2.24) et (2.25), nous obtenons un système d'équations à deux inconnues dont la résolution permet de déterminer les expressions des coefficients $A_{k,u}$ et $K_{k,u}$:

- pour un éclairage par la face avant :

$$A_{k,av} = \frac{B_k \cdot (S_f + \frac{D(1-\cos(C_k \cdot H))}{C_k \cdot L^2 \cdot H}) - B_k}{R[(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D} + R)(S_f + (\frac{1-\cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2 \cdot H})(D + S_{gb}))]} \quad (2.26)$$

où :

$$B_k = \frac{2 \cdot G_0}{D \cdot H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (-1)^{(k+1)} \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2} \quad (2.27)$$

et

$$K_{k,av} = \frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (-1)^{(k+1)} \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D} + R)(S_f + (\frac{1-\cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2 \cdot H})(D + S_{gb}))} \quad (2.28)$$

- pour un éclairage par la face arrière :

$$A_{k,ar} = \frac{C'_k \cdot (S_f + \frac{D(1-\cos(C_k \cdot H))}{C_k \cdot L^2 \cdot H}) - C'_k}{R[(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D} + R)(S_f + (\frac{1-\cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2 \cdot H})(D + S_{gb}))]} \quad (2.29)$$

où :

$$C'_k = \frac{2 \cdot G_0}{D \cdot H} \cdot \frac{C_k \cdot \exp(-\alpha \cdot H)}{C_k^2 \cdot \alpha^2} \quad (2.30)$$

et

$$K_{k,ar} = \frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot \exp(-\alpha \cdot H)}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2 \cdot H}\right) (D + S_{gb})\right)} \quad (2.31)$$

- pour un éclairage simultané des deux faces :

$$A_{k,d} = \frac{E_k \cdot \left(S_f + \frac{D(1 - \cos(C_k \cdot H))}{C_k \cdot L^2 \cdot H} - E_k\right)}{R \left[\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2 \cdot H}\right) (D + S_{gb})\right)\right]} \quad (2.32)$$

où :

$$E_k = \frac{2 \cdot G_0}{D \cdot H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2} \quad (2.33)$$

et

$$K_{k,d} = \frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2 \cdot H}\right) (D + S_{gb})\right)} \quad (2.34)$$

— à la face arrière de la photopile ($z = H$) :

$$D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(r, z, T)}{\partial z} \right|_{z=H} = -S_b \cdot \delta_u(r, z = H, T) \quad (2.35)$$

S_b est la vitesse de recombinaison à la face arrière. Pour les photopiles conventionnelles, la valeur de S_b est élevée tandis que pour les photopiles B.S.F, cette valeur est faible [Mohammad, 1987].

L'équation (2.35) donne :

$$\cot(C_k \cdot H) = -\frac{S_b}{C_k \cdot D(T)} \quad (2.36)$$

Nous obtenons ainsi l'équation transcendante et la détermination des constantes C_k se fait graphiquement. Pour celà, nous posons :

$$g(C_k) = \cot(C_k \cdot H) \quad (2.37)$$

et

$$i(C_k) = -\frac{S_b}{C_k \cdot D(T)} \quad (2.38)$$

En traçant dans un même graphe les fonctions $g(C_k)$ et $i(C_k)$, nous obtenons les valeurs des coefficients C_k comme le montre la figure 2.3.

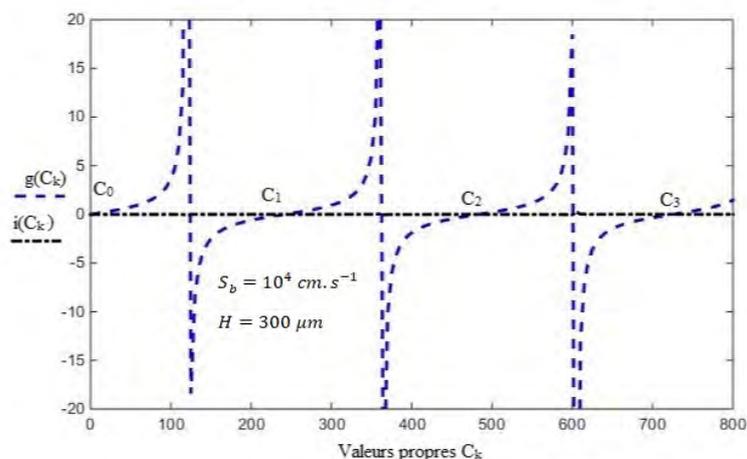


Figure 2.3 – Illustration de la détermination des coefficients C_k .

Les tableaux 2.1 et 2.2 donnent les influences de l'épaisseur de la base de la photopile et de la température sur les coefficients C_k .

Tableau 2.1 – Epaisseurs de la base et quelques valeurs de C_k pour une température $T = 300 K$ et une vitesse de recombinaison à la surface arrière $S_b = 10^4 cm.s^{-1}$

Epaisseur H (cm)	0,01	0,015	0,02	0,03
Valeurs propres $C_k(cm^{-1})$	110,92	554,67	663,37	837,74

Tableau 2.2 – Epaisseurs de la base et quelques valeurs de C_k pour une température $T = 320 K$ et une vitesse de recombinaison à la surface arrière $S_b = 10^2 cm.s^{-1}$

Epaisseur H (cm)	0,01	0,015	0,02	0,03
Valeurs propres $C_k(cm^{-1})$	103,99	520,01	621,91	785,39

L'analyse des tableaux montre que :

- pour une valeur donnée de la température et de la vitesse de recombinaison à la surface arrière, la valeur du coefficient C_k augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la base de la photopile ;
- pour une même valeur de l'épaisseur de la base, l'augmentation de la température de 300 K à 320 K entraîne une diminution de la valeur de C_k .

L'augmentation du coefficient C_k avec l'augmentation de l'épaisseur de la base de la photopile ainsi que sa diminution avec l'augmentation de la température se traduisent pour les plages de température et de l'épaisseur de la base, une augmentation de la longueur de diffusion et par conséquent une augmentation du coefficient de diffusion dans la base de la photopile.

A l'image de J. Dugas [Dugas, 1994], notre modèle utilise la jonction ($z = 0$), la face arrière ($z = H$) et les joints de grain ($r = R$) pour la résolution de l'équation de continuité.

La méthode de séparation des variables est utilisée pour la résolution de l'équation de continuité. Dans le modèle de grain cylindrique, sont utilisées à la fois la méthode de séparation des variables et les fonctions de Bessel.

La rupture de notre travail réside dans l'introduction de l'effet de la température et de la vitesse dynamique à la jonction (S_f). En effet, tous les anciens travaux ont considéré que la densité des porteurs minoritaires à la jonction est nulle [Madougou et al., 2010; Mbodji et al., 2012; Gueye et al., 2013].

2.3 Profils de la densité des porteurs minoritaires en situation de circuit-ouvert et de court-circuit

Les profils de la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile, fonctionnant en situation de circuit-ouvert ($S_f = 10 \text{ cm.s}^{-1}$) puis en court-circuit ($S_f = 5 \times 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$), sous éclairage monochromatique ($\lambda = 800 \text{ nm}$) sont représentés sur la figure 2.4 pour un éclairage par la face avant :

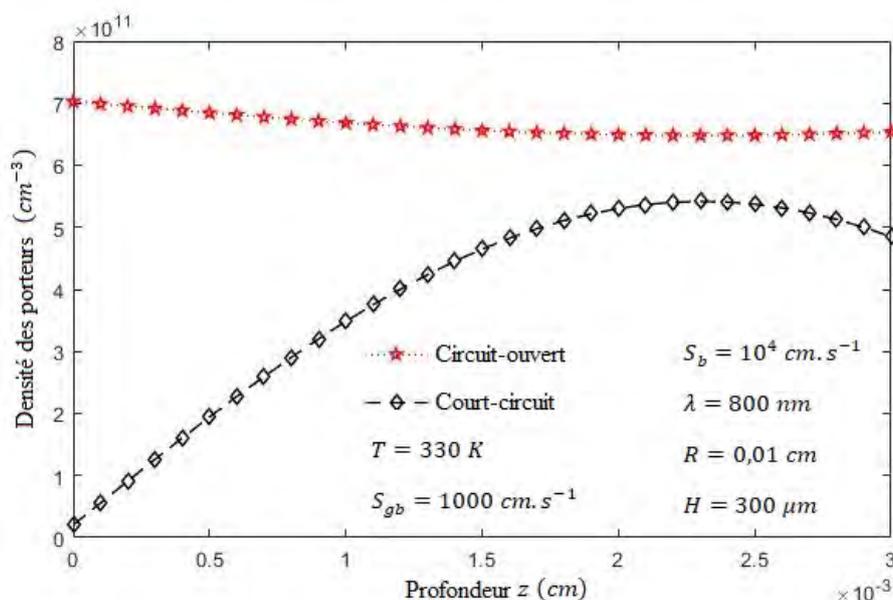


Figure 2.4 – Profils de la densité des porteurs minoritaires en situation de circuit-ouvert et de court-circuit pour un éclairage par la face avant.

La figure 2.4 montre que :

- la densité des porteurs minoritaires en situation de circuit-ouvert diminue avec l'augmentation de la profondeur (z) jusqu'à atteindre un minimum ensuite elle augmente faiblement jusqu'à la limite de la profondeur de la base. Ce résultat est différent de celui réalisé dans les travaux de [Thiam et al, 2013] à une dimension où le densité des porteurs en circuit-ouvert diminue et tend vers zéro ;
- la densité des porteurs minoritaires en situation de court-circuit augmente avec

l'augmentation de la profondeur (z) de la base jusqu'à atteindre son maximum. Cette densité diminue, ensuite, progressivement si on tend vers les limites du grain. Nous pouvons aussi dire que l'allure de la courbe de la figure 2.4, en court-circuit, montre la présence de trois zones sur la courbe [Sissoko et al., 1998]. La première zone correspond aux gradients positif de la densité des porteurs minoritaires. Elle correspond aux électrons qui vont traverser la jonction et vont contribuer au photocourant. La seconde partie représente les gradients négatifs de la densité des porteurs de charges en excès dans la base. Cette zone correspond aux électrons qui se recombinent en volume [Madougou et al., 2010]. En fin, la troisième partie où ces deux zones sont limitées à la profondeur et où la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base est maximale. A cette zone, le gradient est nul : il y existe un stockage des porteurs de charges ; ce qui va induire une extension de la zone de charge d'espace en court-circuit. Ce résultat est globalement différent avec des résultats des autres études. En effet, dans ceux-ci, quelque soit le point de fonctionnement, il était remarqué un maximum qui se déplaçait à l'intérieur de la base ou vers l'émetteur.

2.4 Effets de la longueur d'onde (λ), de la taille de grain (R) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) sur le profil de la densité des porteurs minoritaires

Lorsque la photopile est éclairée par un flux lumineux incident, elle absorbe les photons d'énergie supérieure ou égale à celle du gap du matériau semi-conducteur constituant cette photopile. Chaque photon absorbé crée une paire électron-trou dans la base. La densité des électrons, ainsi photogénérés, varie suivant la profondeur de la base, la longueur d'onde de l'éclairement, la taille de grain et la vitesse de recombinaison aux joints de grain de la photopile. Par la suite, nous étudierons le profil de la densité des porteurs minoritaires de charges en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de la longueur d'onde de l'éclairement, de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain de la photopile pour une valeur de la vitesse dynamique à la jonction $S_f = 4 \times 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$.

2.4.1 Effet de la longueur d'onde (λ) sur le profil de la densité des porteurs minoritaires

L'influence de la longueur d'onde sur le profil de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile en fonction de la profondeur (z) est représentée pour un éclairement par la face avant de la photopile aux figures 2.5 et 2.6 pour les courtes et grandes longueurs respectivement. Nous avons considéré un intervalle de longueurs d'onde de 300 nm à 1100 nm . Cette gamme se subdivise en deux parties : les courtes et les grandes longueurs d'onde [Green et al., 1995].

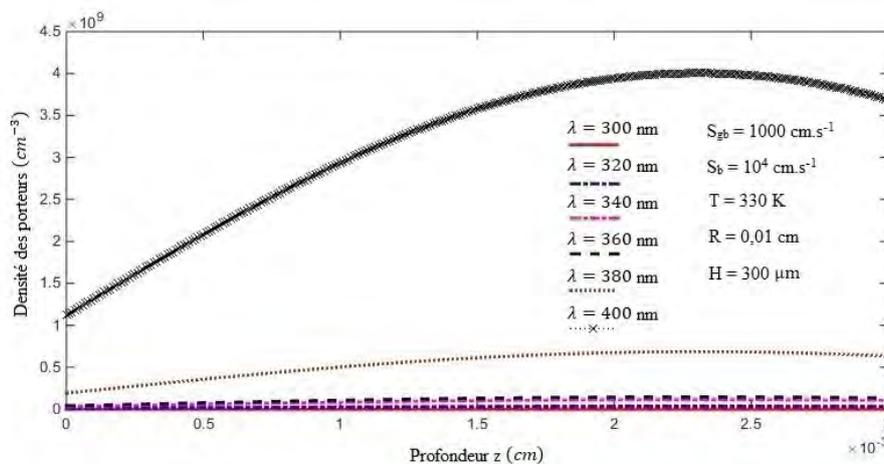


Figure 2.5 – Effet des courtes longueurs d’onde sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairement le face avant.

L’analyse de la figure 2.5 montre qu’aux courtes longueurs d’onde, les porteurs photogénérés augmentent avec l’augmentation de la longueur d’onde lorsque la profondeur (z) de la base augmente jusqu’à atteindre son maximum vers une valeur limite proche de la jonction, puis décroît à partir de $2,25 \mu\text{m}$ tout en gardant toujours son augmentation lorsque la longueur d’onde augmente. Cela s’explique par une diminution du coefficient de réflexion (R') de l’éclairement de la photopile mais également par l’énergie suffisante pour rompre les liaisons métal-électron, impliquant une quantité de mouvement à l’électron extrait qui peut se déplacer de la bande de valence à la bande de conduction.

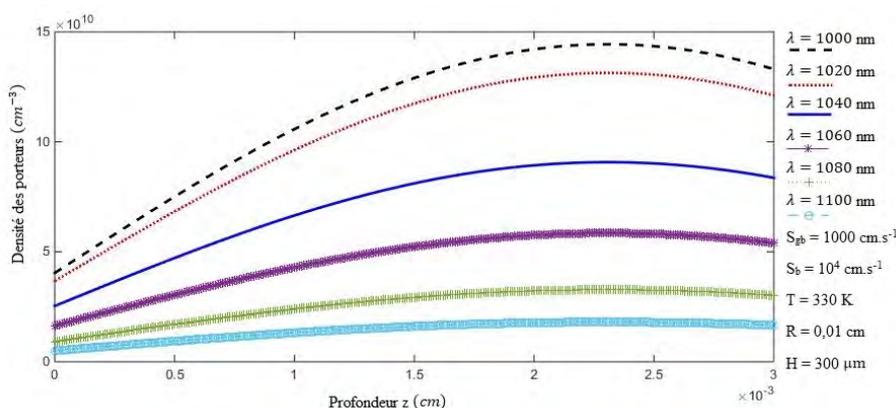


Figure 2.6 – Effet des grandes longueurs d’onde sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairement le face avant.

En analysant les courbes de la figure 2.6 ci-dessus, nous remarquons pour les grandes longueurs d’onde, que la densité des porteurs minoritaires diminue lorsque la longueur d’onde augmente. Ce phénomène est observé car quand la longueur d’onde augmente, dans cette gamme, l’énergie des photons incidents diminue. Les photons efficaces diminuent car l’énergie des photons incidents ne suffisent pas à casser la liaison métal-électron et à fournir

une quantité de mouvement supplémentaire. Le mouvement des électrons de la bande de valence à la bande de conduction est réduit quand la longueur d'onde augmente.

2.4.2 Effets de la taille de grain (R) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) sur le profil de la densité des porteurs minoritaires

• Effet de la taille de grain (R)

Pour étudier l'effet de la taille de grain sur la densité des porteurs minoritaires, nous allons considérer plusieurs photopiles de différentes tailles de grain mais de même vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) et de même température (T).

La figure 2.7 décrit l'évolution de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur (z) par variation de la taille de grain.

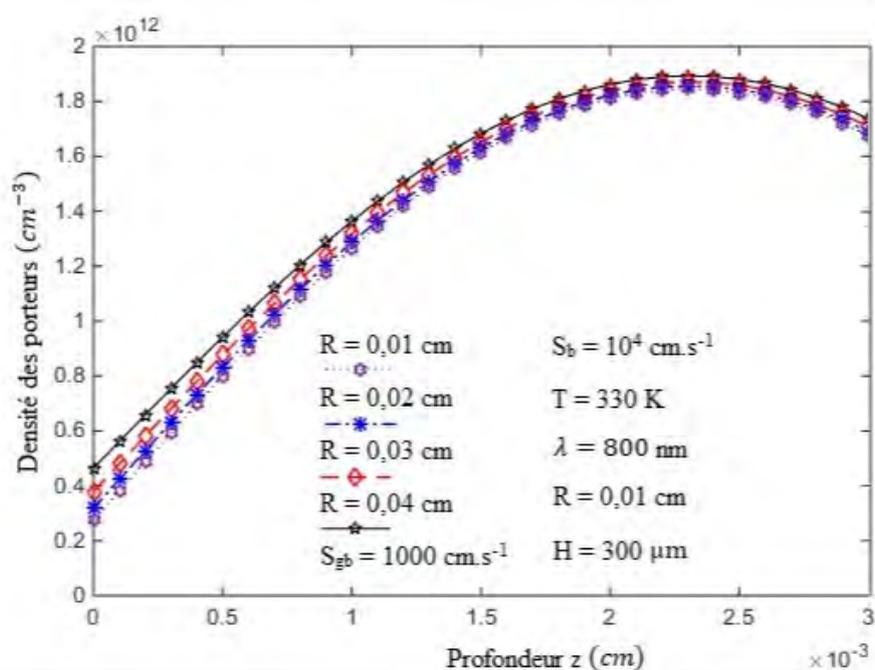


Figure 2.7 – Effet de la taille de grain sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairement le face avant.

La figure 2.7, ci-dessus, illustre le profil de la densité des porteurs minoritaires dans la base en fonction de la profondeur (z) de la base par variation de la taille de grain. Nous notons que le profil des courbes de la densité des porteurs minoritaires de charges augmente lorsque la taille de grain augmente. L'explication qui peut en être tirée est que les recombinaisons en volume baissent avec la taille de grain. Cette explication est tout à fait plausible car nous savons que quand la taille de grain diminue l'activité électrique des joints de grain baissent et donc les pertes de porteurs notées dans ces sites s'amointrissent [Nzonzolo et al., 2014; Zerbo et al., 2014]. Ainsi, le nombre de porteurs qui participent au photocourant croît lorsque la taille de grain augmente [Mbodji et al., 2011a].

• Effet de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb})

La figure 2.8 donne le profil de la densité des porteurs minoritaires de charges dans la base en fonction de la profondeur (z) de la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}).

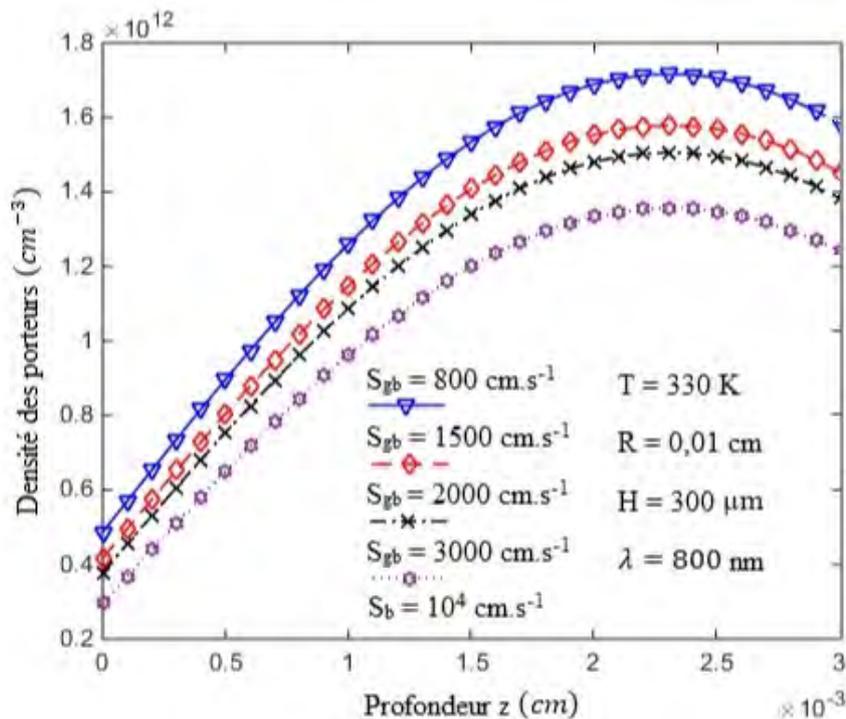


Figure 2.8 – Effet de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour un éclairage le face avant.

Il est noté à travers la figure 2.8 que la densité des porteurs minoritaires de charges décroît lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente. Ce qui décrit, en quelques sortes, l'effet négatif de l'activité recombinante des joints de grain. En effet, la diminution de la densité des porteurs minoritaires dans la base lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente peut s'expliquer par le fait que les joints de grain sont des centres de recombinaisons. Ce phénomène réduit considérablement le nombre de porteurs renvoyés à la jonction de la photopile pour participer à la production du photocourant [Corréa, 1996 ; Gueye et al., 2013].

2.5 Effets du mode d'éclairage et de la température sur le profil de la densité des porteurs minoritaires

Les figures 2.9, 2.10 et 2.11 représentent pour différentes températures (298 K, 310 K, 320 K et 330 K), les profils de la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile, pour respectivement les modes d'éclairage par la face avant, par la face arrière et simultanément par les deux faces.

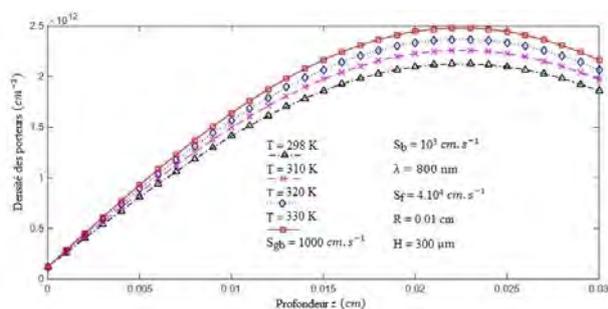


Figure 2.9 – Profils de la densité des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la température pour un éclairage par la face avant

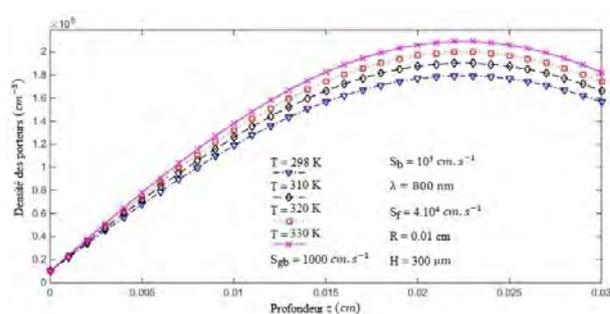


Figure 2.10 – Profils de la densité des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la température pour un éclairage par la face arrière

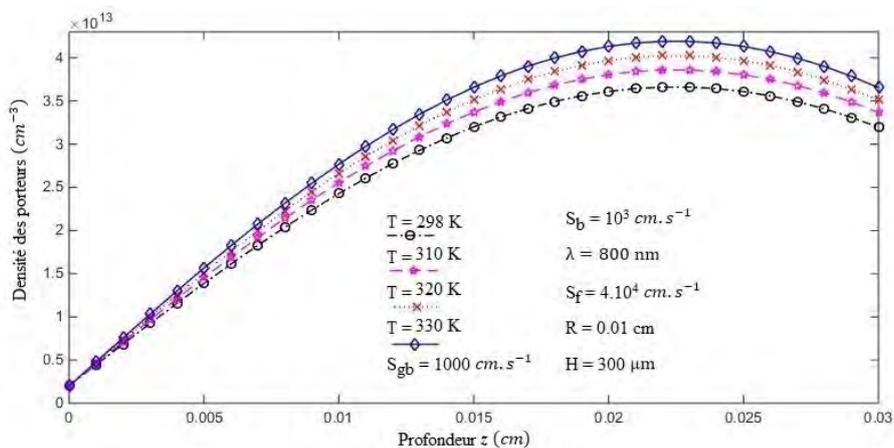


Figure 2.11 – Profils de la densité des porteurs minoritaires pour différentes valeurs de la température pour un éclairage simultané par les deux faces

L'analyse des effets du mode d'éclairage et de la température sur les profils des courbes des figures 2.9, 2.10 et 2.11 nous montre que :

- effet du mode d'éclairage :

Les courbes des figures montrent que l'éclairage simultané par les deux faces donne la densité des porteurs minoritaires la plus importante, suivi de l'éclairage par la face

avant : les porteurs photogénérés sont plus important pour le double éclairage du fait de l'éclairage par les deux faces de la photopile. Le nombre de photons incidents est plus important que pour les deux autres modes et par conséquent le nombre de porteurs photogénérés est plus important.

Cependant la densité des porteurs minoritaires est plus importante pour un éclairage par la face avant, par rapport à l'éclairage par la face arrière, à cause d'importances recombinaisons en mode d'éclairage par la face arrière. De plus, les porteurs générés pour l'éclairage par la face arrière doivent parcourir une grande distance avant d'atteindre la jonction et participer au photocourant. Ces porteurs ont donc moins de chance d'échapper aux recombinaisons en zone arrière et en volume par rapport à ceux du mode d'éclairage par la face avant.

Nous remarquons également que les amplitudes des densités des porteurs minoritaires augmentent lorsqu'on se déplace vers l'intérieur de la base jusqu'à la profondeur $z = 2,25 \mu m$. Contrairement aux travaux réalisés par d'autres auteurs [Mbodji et al., 2011a; Ly et al., 2013] où le maximum de la densité des porteurs minoritaires, selon le mode d'éclairage, se trouve près de la face éclairée. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que le mode de fonctionnement des cellules solaires, en situation de circuit-ouvert, est bref et la photopile tend rapidement vers le court-circuit [Leye et al., 2017; Diouf et al., 2018]

- effet de la température (T) :

La densité des porteurs minoritaires augmente avec la température. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de la température de la photopile entraîne une diminution de la bande d'énergie (E_g) et par conséquent à l'augmentation du nombre de photons pouvant participer à la photocréation des porteurs dans la base de la photopile entraînant également une diminution de la durée de vie des porteurs [Soro et al., 2017]. En effet à haute température les liens interatomiques sont affaiblis et les porteurs de charge ont besoin d'une énergie faible pour casser ces liaisons et passer dans la bande de conduction. De ce fait lorsque la température augmente, la largeur de la bande d'énergie diminue ; les porteurs de charge ont plus de facilité d'acquérir une énergie thermique supérieure à l'énergie du gap qui leur permet de franchir la bande d'énergie et passer de la bande de valence à celle de conduction.

Par la suite, nous établissons dans le tableau 2 suivant, les résultats de la densité des porteurs de charges minoritaires dans la base selon le mode d'éclairage en fonction de la température pour une étude comparative :

Tableau 2.3 – Etude comparative de l'effet de la température sur la densité des porteurs selon le mode d'éclairage de la photopile

Température (K)	298	310	320	330
$\delta_{av}(r, z, T)(cm^{-3})$	$2,2 \times 10^{12}$	$2,25 \times 10^{12}$	$2,37 \times 10^{12}$	$2,5 \times 10^{12}$
$\delta_{ar}(r, z, T)(cm^{-3})$	$1,67 \times 10^8$	$1,83 \times 10^8$	$1,89 \times 10^8$	$2,3 \times 10^8$
$\delta_d(r, z, T)(cm^{-3})$	$3,56 \times 10^{13}$	$3,75 \times 10^{13}$	$3,87 \times 10^{13}$	$4,26 \times 10^{13}$

L'analyse du tableau 2 de l'étude comparative du mode d'éclairage de la photopile montre que :

- ✕ selon le mode d'éclairement, la densité des porteurs minoritaires augmente avec l'augmentation de la température ;
- ✕ la densité des porteurs minoritaires des cellules solaires est plus élevée lorsque cette dernière est éclairée simultanément par ces deux faces.

2.6 Conclusion

Nous avons déterminé l'équation de continuité des porteurs minoritaires dont la résolution nous a permis d'obtenir pour différents modes d'éclairement, les expressions de la longueur de diffusion et de la densité des porteurs. A partir de l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charges, nous avons analysé les influences de la longueur d'onde, de la taille de grain, de la vitesse de recombinaison aux joints de grain et de la température en fonction de la profondeur de la base. Il est noté que la densité des porteurs augmente lorsque la profondeur z de la base augmente jusqu'à atteindre son maximum vers une valeur limite $z = 2,25 \mu m$ proche de la jonction, puis décroît au delà de cette valeur. La densité des porteurs minoritaires croît aux courtes longueurs d'onde mais diminue avec les grandes longueurs d'onde. Elle augmente également avec l'augmentation de la taille de grain et diminue avec S_{gb} .

Sur la base de l'expression de la densité des porteurs minoritaires, nous avons également étudié les influences du mode d'éclairement et de la température sur le profil de la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile. Les résultats montrent que la densité des porteurs minoritaires est plus importante pour un éclairage simultané par les deux faces. Les résultats montrent aussi que la densité des porteurs minoritaires augmente avec l'augmentation de la température.

Chapitre 3 :
Effet de la température sur les
paramètres électriques de la
photopile bifaciale

Chapitre 3

Effet de la température sur les paramètres électriques de la photopile bifaciale

3.1 Introduction

L'étude des paramètres électriques de la photopile, à savoir la densité de photocourant (I_u), la phototension (V_u), la densité de photocourant de court-circuit ($I_{cc,u}$), la phototension en circuit-ouvert ($V_{co,u}$), la puissance (P_u), le facteur de forme (FF_u), le rendement de conversion (η_u), les coefficients de température et la capacité de diffusion d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sont étudiés dans la gamme de température de 298 K à 330 K sous éclairage monochromatique constant.

3.2 Effet de la température sur la densité de photocourant

La densité de photocourant délivrée par la photopile bifaciale peut être calculée à partir de la relation de l'équation 3.1 [Mbodji, 2009] :

$$I_{ph,u}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = q \cdot D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (3.1)$$

En prenant en compte la condition aux limites à la jonction donnée par l'équation 2.17, nous obtenons l'expression finale de la densité de photocourant donnée par l'équation 3.2 ci-dessous.

$$I_{ph,u}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = q \cdot D(T) \cdot S_f \cdot \delta_u(z=0, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) \quad (3.2)$$

Sur la base de l'équation 3.2, les variations de la densité de photocourant en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f), ont été tracées pour différentes valeurs de la température. Pour un éclairage par la face avant, les courbes de la figure 3.1 ont ainsi été obtenues .

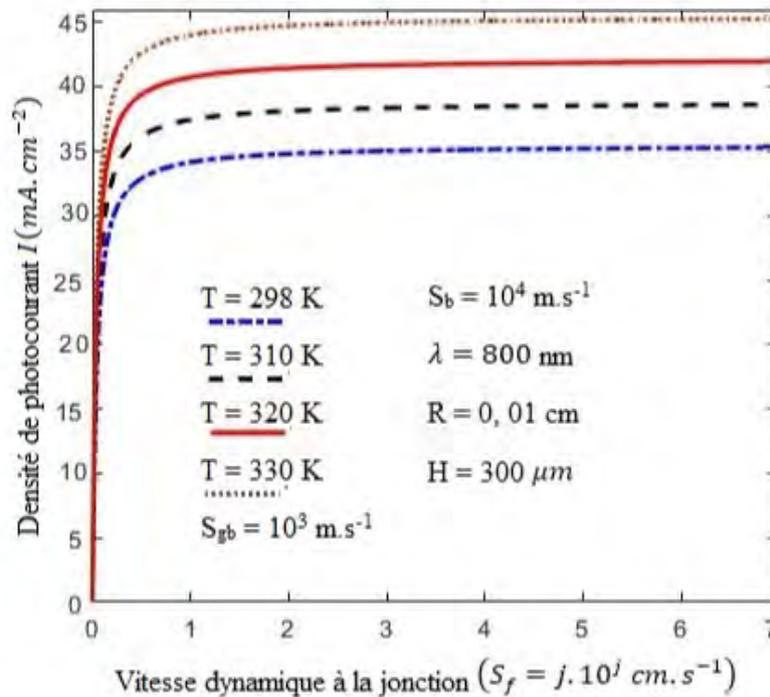


Figure 3.1 – Densité de photocourant en fonction de S_f pour plusieurs températures pour un éclairage par la face avant

Les courbes de la densité de photocourant augmentent avec la température. Cette augmentation de la densité de photocourant avec celle de la température s'explique par le fait que le taux de génération des porteurs minoritaires de charge augmente avec la température [Chander et al., 2015a].

Les courbes de la figure 3.1 montrent aussi que, pour une valeur donnée de la température, la variation de la densité de photocourant en fonction de S_f présente trois parties :

- pour des valeurs de S_f très proche de zéro, la densité de photocourant croît et le circuit-ouvert est bref contrairement aux travaux réalisés avec le modèle colonnaire cubique où la densité de photocourant est quasiment nul pour une zone un peu plus étendue au voisinage du circuit-ouvert. [Thiame et al., 2011 ; Ly et al., 2012 ; Nzonzolo et al, 2014] ;
- dans l'intervalle $0,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \leq S_f \leq 3 \times 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, le photocourant croît avec l'augmentation de S_f ;
- pour des valeurs de $S_f \geq 3 \times 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, le photocourant reste constant avec l'accroissement de S_f [Diasse et al., 2012] ; nous sommes en situation de court-circuit. Nous notons ici que la situation de court-circuit est plus étendue que ceux observés dans les études précédentes [Dieme et al, 2014 ; Nzonzolo et al., 2014 ; Diallo et al., 2012].

L'état de court-circuit est une situation de transfert total vers l'émetteur de tous les électrons photogénérés dans la base en traversant la jonction. Et d'après le profil des photocourants de la figure 3.1, cette situation de court-circuit apparaît aux grandes valeurs de la vitesse dynamique à la jonction (S_f). Pour une telle situation, il n'y a plus de blocage

de porteurs de charge à la jonction et le photocourant est maximal.

3.3 Effet de la température sur la phototension

A partir de la relation de Boltzmann [Nzonzolo, 2004], l'expression de la phototension aux bornes de la photopile sous éclairage est donnée par l'équation 3.3 ci-dessous :

$$V_{ph,u}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = V_T \cdot \ln \left[\frac{N_b}{n_i^2(T)} \cdot \delta_u(z=0, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) + 1 \right] \quad (3.3)$$

où V_T est la tension thermique, donnée par la relation :

$$V_T = \frac{k_b}{q} \cdot T \quad (3.4)$$

$N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ représente la densité de dopage de la base et n_i la concentration intrinsèque des électrons dont l'expression est donnée par l'équation 3.5 [Thurmond, 1975] :

$$n_i(T) = A \cdot T^3 \cdot \exp \left(-\frac{E_g(T)}{k_b \cdot T} \right) \quad (3.5)$$

Dans l'équation 3.5 ci-dessus, A est une constante ; $A = 3,87 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3}$ [Diatta al., 2016]. $E_g(T)$ représente l'énergie de gap, elle correspond à la différence d'énergie entre la bande de conduction (E_c) et celle de valence (E_v). k_b est la constante de Boltzmann. Pour le silicium, elle est donnée par l'équation 3.6 ci-après [Sze et al., 2007] :

$$E_g(T) = \left(E_{g0} - 0,000702 \times \frac{T^2}{T + 1108} \right) (\text{eV}) \quad (3.6)$$

Dans l'équation 3.6, $E_{g0} = 1,16 \text{ eV}$ représente l'énergie de gap à $T = 0 \text{ K}$.

Sur la base de l'expression de la phototension, nous avons obtenu les courbes de la figure 3.2 ci-dessous, qui représentent pour un éclairage par la face avant, les variations de la phototension en fonction de la vitesse dynamique pour différentes températures :

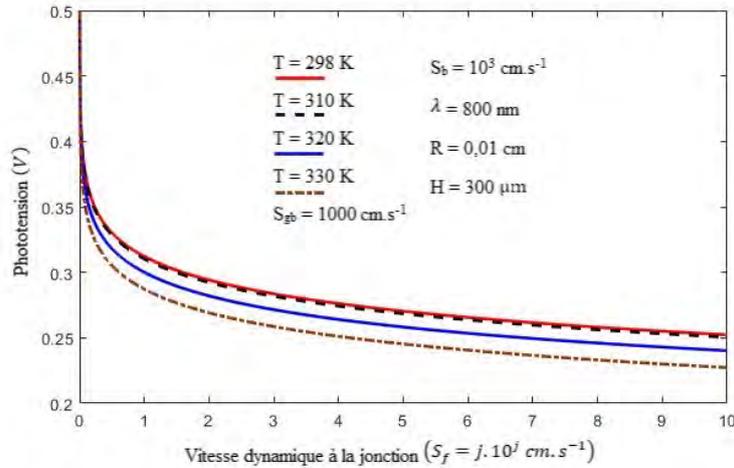


Figure 3.2 – Variations de la phototension en fonction de S_f pour plusieurs températures pour un éclairage par la face avant de la photopile

Les courbes de la figure 3.2 montrent que l'augmentation de la température entraîne la diminution de la phototension puis commence à décroître légèrement ; cela est dû à des augmentations de la densité des porteurs minoritaires, des fuites de courant et de la tension thermique des cellules solaires avec la température de la photopile [Arora et al., 1980].

Nous pouvons également dire, pour une valeur donnée de la température, que la phototension est maximale en situation de circuit-ouvert ($S_f \rightarrow 0$) ; ce qui s'explique par un blocage des porteurs minoritaires à la jonction. Ensuite, elle décroît brusquement lorsque S_f augmente jusqu'aux environs de $7 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$; il y a moins de porteurs à la jonction. Ceci correspond à une augmentation de la densité de photocourant donc, à une baisse de la phototension [Madougou et al., 2007a ; Dione et al., 2009].

Au delà de $S_f = 7 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$, la phototension devient asymptotique ; alors, on est en situation de court-circuit et le maximum de photocourant est obtenu.

3.4 L'influence de la température sur la densité de photocourant de court-circuit ($I_{cc,u}$) et la phototension de circuit-ouvert ($V_{co,u}$)

3.4.1 La densité de photocourant de court-circuit ($I_{cc,u}$)

L'équation 3.7 de la densité de photocourant de court-circuit ($I_{cc,u}$) est obtenue à partir de l'équation théorique de la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$ pour le modèle d'une photopile au silicium polycristallin à une diode [Dinçer et al., 2010].

$$I_{cc,u} = I_{ph,u} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q (V_{ph} + I_{ph,u} \cdot R_s)}{k_b \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{ph} + I_{ph,u} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.7)$$

Où $V_{co,u} = I_{ph,u} \cdot R_s$, R_{sh} et R_s désignent respectivement les résistances shunt et série ; I_0 représente le courant de saturation inverse et son expression est donnée par [Green et al., 1982] : $I_0 = B \cdot T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k_b \cdot T}\right)$ et B est une constante.

De plus, en situation de court-circuit, $V_{ph} = 0$ et l'équation de la densité de photocourant de court-circuit devient :

$$I_{cc,u} = I_{ph,u} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_{co,u}}{k_b \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

Sur la base de l'expression de l'équation 3.8, nous illustrons à la figure 3.3, pour un éclairage par la face avant de la photopile, la variation de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la température :

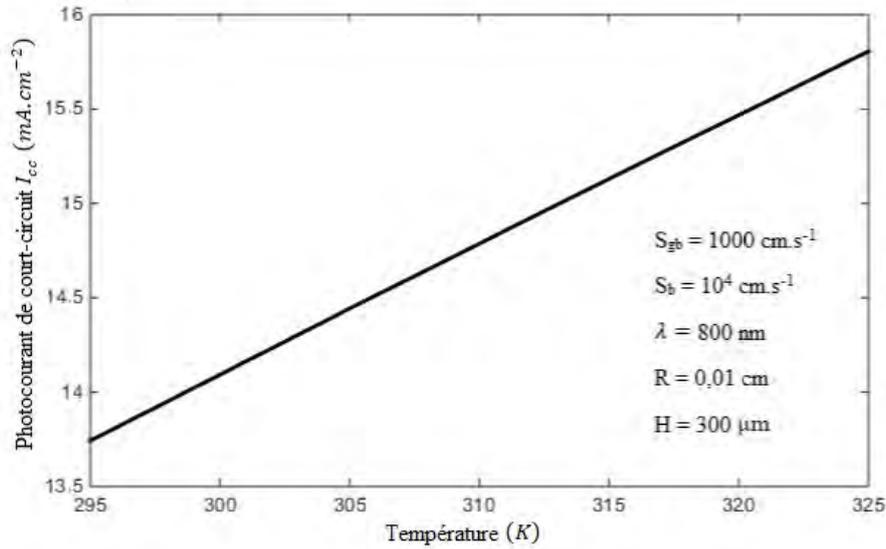


Figure 3.3 – Densité de photocourant de court-circuit en fonction de la température par un éclairage par la face avant

La figure 3.3 montre que la densité de photocourant de court-circuit augmente linéairement avec l'augmentation de la température [Malik et al., 2010]. L'augmentation de la température crée un désordre thermique dans la microstructure de la photopile diminuant la mobilité et la durée de vie des porteurs libres [Soro et al., 2017]. Cette augmentation crée aussi une augmentation exponentielle du courant de saturation inverse du semi-conducteur avec l'augmentation de la température (T) de la photopile [Mikolasek et al., 2017] et cela diminue la largeur de la bande d'énergie interdite du silicium [Singh et al., 2008]. Par conséquent, la densité de photocourant de court-circuit de la photopile augmente linéairement avec la température.

3.4.2 La phototension de circuit-ouvert ($V_{co,u}$)

La phototension de circuit-ouvert ($V_{co,u}$) et le facteur de forme représentent des paramètres fortement affectés par le transport et la collecte des porteurs de charges au sein

la photopile. Ainsi l'étude de ces paramètres devrait fournir des informations sur les facteurs qui limitent le transport et la collecte des porteurs de charges dans la photopile. La phototension de circuit-ouvert peut être exprimé par l'équation 3.9 [Singh et al., 2012] :

$$V_{co,u} = \frac{k_b \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph,u}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.9)$$

où I_0 représente le courant de saturation inverse de la diode et le produit $k_b \cdot T$ représente l'énergie thermique.

A partir de l'équation 3.9, les variations, en mode d'éclairage par la face avant, de la phototension de circuit-ouvert ($V_{co,u}$) en fonction de la température sont montrées par la figure 3.4.

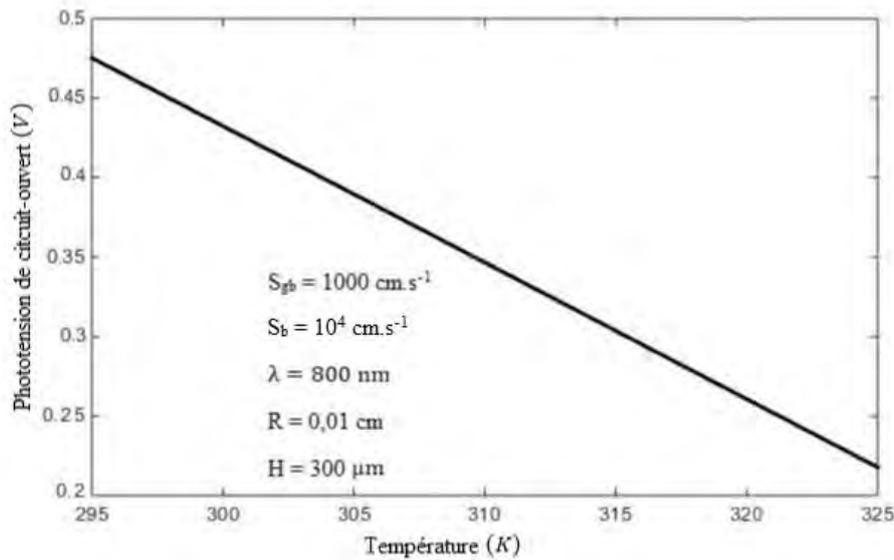


Figure 3.4 – Phototension de circuit-ouvert en fonction de la température pour un éclairage par la face avant

La figure 3.4 montre la diminution de la phototension de circuit-ouvert ($V_{co,av}$) avec l'augmentation de la température [Malik et al., 2010].

Ce résultat est en accord avec celui des auteurs comme Cai et al. [Cai et al., 2012] qui ont montré que l'augmentation de la température de la cellule solaire entraîne une augmentation de la concentration intrinsèque (n_i) et par conséquent la baisse de la phototension aux bornes de la cellule solaire. En outre, la diminution de la phototension est surtout due à une augmentation du courant de saturation inverse avec l'augmentation de la température [Lihan et al., 2014].

3.5 Effet de la température sur les puissances électrique et idéale de la photopile

3.5.1 La puissance de la photopile

La puissance électrique de la cellule solaire est le produit du photocourant et de la phototension. Elle est donnée par relation :

$$P_u = I_{ph,u}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) \cdot V_u(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) \quad (3.10)$$

Les courbes de la figure 3.5 donnent pour le mode d'éclairement par la face avant, les variations de la puissance électrique en fonction de la vitesse dynamique pour différentes valeurs de la température et sous éclairage monochromatique.

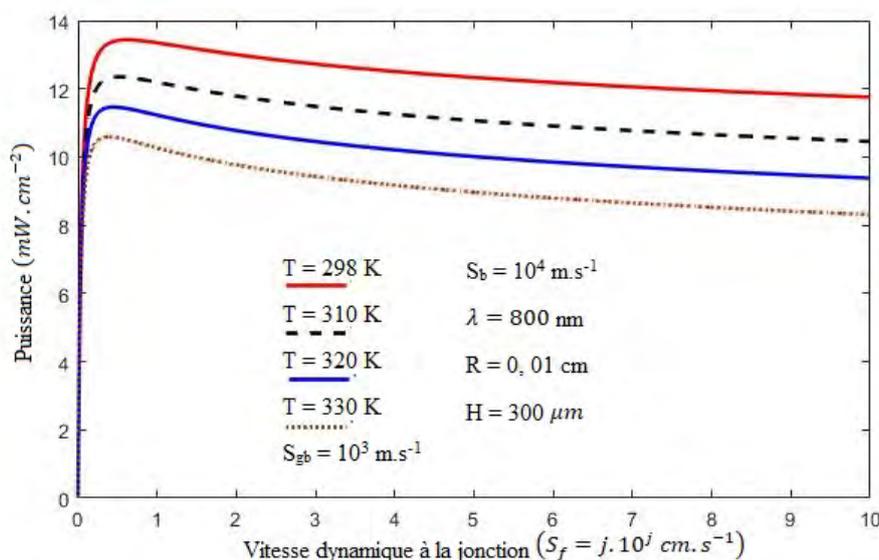


Figure 3.5 – Puissance de la photopile en fonction de S_f pour plusieurs températures pour un éclairage par la face avant

Pour une valeur donnée de la température, les courbes de la figure 3.5 montrent que la puissance croît très rapidement pour atteindre sa valeur maximale au voisinage de $S_f = 0,5 \text{ cm.s}^{-1}$ avant de décroître légèrement. Les courbes montrent également que l'augmentation de la température entraîne la diminution de la puissance de la photopile avec un déplacement du point de puissance maximale (MPP) vers le circuit-ouvert. En effet la diminution de la puissance de la photopile peut être expliquée par une forte diminution de la phototension avec l'augmentation malgré une légère croissance de la densité de photocourant de la photopile lorsque la température augmente [Ali et al., 2017].

3.5.2 La puissance idéale ($I_{cc,u} \cdot V_{co,u}$)

Le produit de la densité de photocourant de court-circuit et de la phototension de circuit-ouvert est communément appelé puissance idéale. La courbe de la figure 3.6 donne pour le mode d'éclairage par la face avant, les variations de cette puissance idéale en fonction de la température.

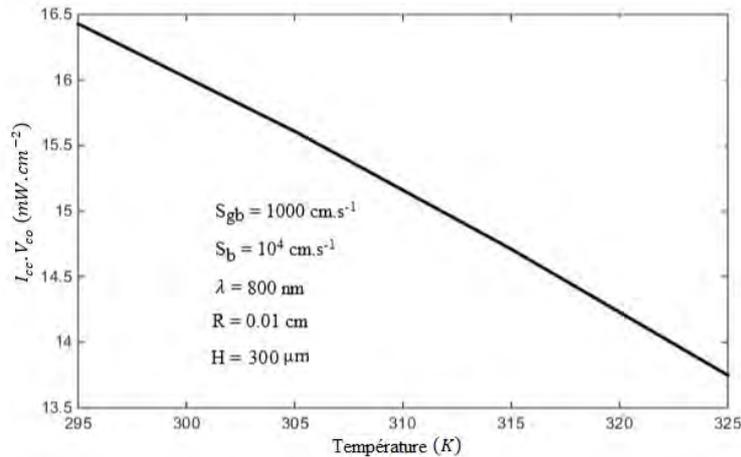


Figure 3.6 – La puissance idéale en fonction de la température pour un éclairage par la face avant

Il résulte que la puissance idéale diminue avec l'augmentation de la température. Cela traduit le fait que l'effet de la température sur la diminution de la phototension de circuit-ouvert est plus important que son effet sur l'augmentation de la densité du photocourant de court-circuit.

3.6 Effet de la température sur les caractéristiques

$I_{ph} - V_{ph}$ et $P - V_{ph}$

3.6.1 L'effet de la température sur la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$

Pour le mode d'éclairage par la face avant, la caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$ de la photopile a été tracée pour différentes valeurs de la température comme le montre la figure 3.7 ci-dessous.

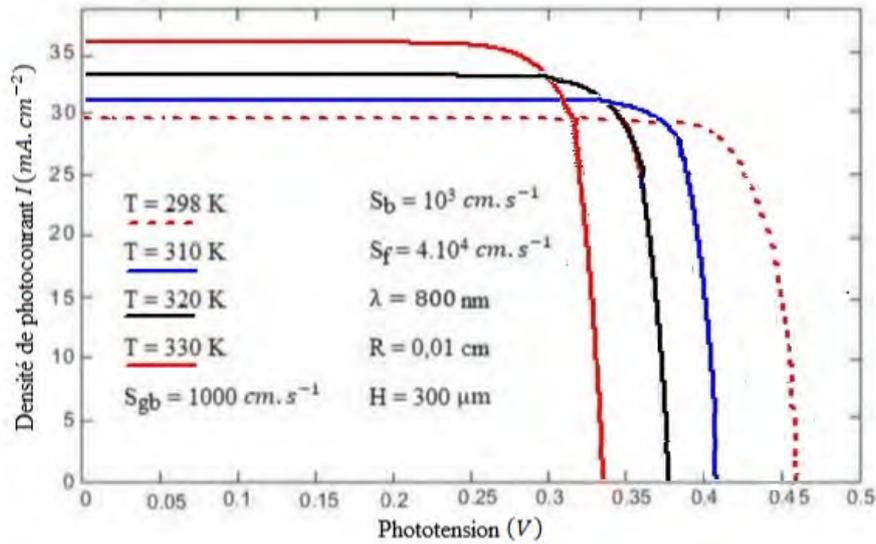


Figure 3.7 – Caractéristique $I_{ph} - V_{ph}$ pour plusieurs températures pour un éclairage par la face avant

La figure 3.7 montre une augmentation de la densité de photocourant de court-circuit et une diminution de la phototension de circuit-ouvert avec l'augmentation de la température due à l'augmentation du courant de saturation inverse de la photopile. Ces résultats ont également été montrés par les études de [Xiao et al., 2014; Chander et al., 2015a; Khan et al., 2016] sur la caractéristique densité de photocourant-phototension. Pour une valeur donnée de la température et pour $0 \leq V_{ph} \leq 0,32\text{ V}$, la densité de photocourant est maximale et constante : cette valeur correspond à la densité de photocourant de court-circuit. Delà $V_{ph} = 0,32\text{ V}$, la densité de photocourant diminue rapidement pour s'annuler pour une certaine valeur de la phototension correspondante à la phototension de circuit-ouvert.

3.6.2 L'effet de la température sur la caractéristique $P - V_{ph}$

Pour étudier l'effet de la température sur la caractéristique $P - V_{ph}$, la photopile est toujours éclairée par la face avant. La caractéristique $P - V_{ph}$ de la photopile a été tracée pour différentes valeurs de la température, comme le montre les courbes de la figure 3.8.

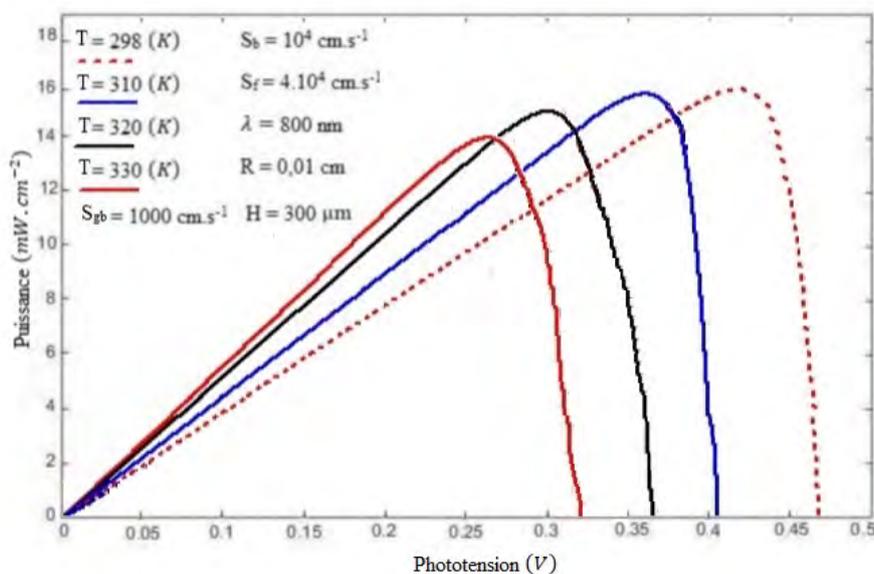


Figure 3.8 – Caractéristique $P - V_{ph}$ pour plusieurs températures pour un éclairage par la face avant

L'analyse de la figure 3.8 montre que la puissance augmente avec la phototension et la température jusqu'à atteindre son maximum avant de décroître rapidement pour s'annuler au voisinage du circuit-ouvert. Cette diminution de la puissance est due à une augmentation du taux de génération des photons à haute température d'où une rapide augmentation du courant de saturation inverse lorsque la température augmente; ce qui entraîne la diminution de la phototension [Arjyadhara et al., 2013; Reich et al., 2009; Khan et al., 2013; Chander et al., 2015a; Purohit et al., 2015].

Nous notons également que la phototension diminue toujours avec l'augmentation de la température de la photopile.

3.7 L'influence de la température sur le facteur de forme (FF_u) et le rendement de conversion (η_u)

3.7.1 Le facteur de forme (FF_u)

L'expression du facteur de forme peut être donnée par l'équation 3.11 ci-après.

$$FF_u = \frac{P_{m,u}}{P_{id,u}} = \frac{I_{m,u} \cdot V_{m,u}}{I_{cc,u} \cdot V_{co,u}} \quad (3.11)$$

où :

- $I_{cc,u}$ représente le photocourant de court-circuit (obtenu pour $V_{ph,u} = 0$);
- $V_{co,u}$ est la phototension de circuit-ouvert (obtenue pour $I_{ph,u} = 0$);
- $I_{m,u}$ et $V_{m,u}$ sont respectivement le photocourant et la phototension au point de puissance maximale (MPP) de la photopile;

• $P_{m,u}$ et $P_{id,u}$ sont respectivement les puissances maximale et idéale de la photopile. Ce coefficient représente le rapport entre, la puissance maximale ($P_{m,u}$) que peut délivrer la photopile et la puissance idéale. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

A partir de l'équation 3.11, les variations, en mode d'éclairage par la face avant, du facteur de forme (FF, u) en fonction de la température ont été tracées sur la figure 3.9.

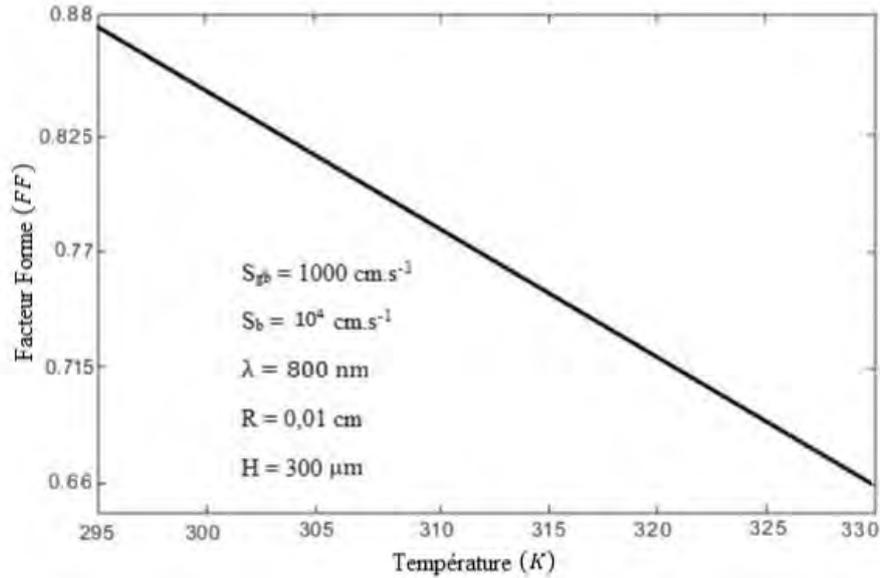


Figure 3.9 – Le facteur de forme en fonction de la température pour un éclairage par la face avant

La figure 3.9 montre la diminution du facteur de forme (FF_{av}) avec l'augmentation de la température [Ghani et al., 2015] due à une légère dégradation de la phototension de circuit-ouvert et une remarquable augmentation de la densité de photocourant de court-circuit. Cette influence s'explique par la forte augmentation du courant d'obscurité en fonction de la température et la diminution de la largeur de la bande interdite. En effet, cela peut également s'expliquer par le fait que l'effet de la température sur la diminution de la puissance maximale est plus important que son effet sur la diminution de la puissance idéale.

3.7.2 Le rendement de conversion (η_u)

Le rendement de conversion de la photopile est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la photopile et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la photopile [Equer, 1993].

$$\eta_u = \frac{P_{m,u}}{P_{inc}} = \frac{FF_u \cdot I_{cc,u} \cdot V_{co,u}}{E \times S} \quad (3.12)$$

avec :

- E : éclairage reçu par unité de surface ;

- S : surface de la photopile.

Sur la base de l'équation 3.12, nous avons tracé, pour le mode d'éclairage par la face avant, les variations du rendement de la photopile en fonction de la température comme le montre la figure 3.10 :

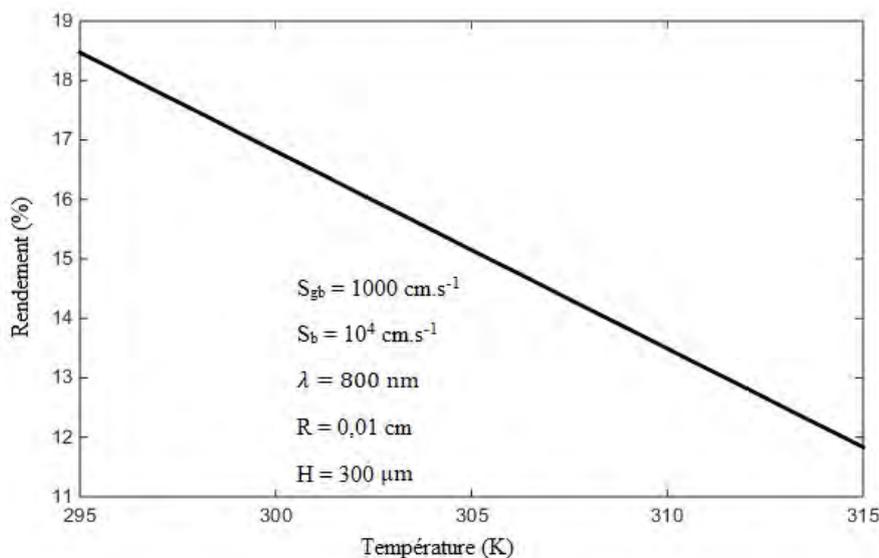


Figure 3.10 – Rendement de conversion en fonction de la température pour un éclairage par la face avant

Il découle de la figure 3.10 que le rendement de conversion diminue linéairement avec l'augmentation de la température, ceci est dû à des diminutions respectives de la phototension de circuit-ouvert et du facteur de forme lorsque la température augmente. Nous pouvons ainsi remarquer que l'augmentation de la température augmente la densité de photocourant de court-circuit pour une faible phototension mais la fait chuter de manière beaucoup plus conséquente dès que la phototension est un peu élevée, réduisant ainsi de manière très significative la puissance disponible.

De plus, l'augmentation de la température n'a pas pour seule conséquence une baisse de rendement. En effet, une forte température peut également endommager les photopiles. Cette détérioration se caractérise par des micro-ruptures (ou craquements) entre les cellules, l'éventuelle corrosion des parties conductrices des cellules et des interconnexions, sans oublier, que la température elle-même contribue à l'accélération du vieillissement des cellules.

Le tableau 3.1 montre l'évolution de la phototension de circuit-ouvert (V_{co}), la densité de photocourant de court-circuit (I_{cc}), la puissance maximale extraite (P_m), le facteur de forme (FF) et le rendement de la conversion de la photopile (η) en fonction de l'augmentation de la température sous éclairage $E = 1000 \text{ W.m}^{-2}$ avec un spectre solaire AM1,5.

Tableau 3.1 – Evolution de (I_{cc}) , (V_{co}) , P_m , FF et η avec la température

T (K)	295	300	305	310	315	320	325	330
$I_{cc} (mA.cm^{-2})$	13,75	13,76	13,771	13,78	13,792	13,8	13,81	13,83
$V_{co} (mV)$	455	451	447	443	439	435	431	427
$P_m (mW.cm^{-2})$	5505,5	5088,7	4924,5	4700,5	4541	4388,2	41069,95	3895,9
FF	0,88	0,82	0,8	0,77	0,75	0,73	0,69	0,66
$\eta (\%)$	18,5	16,75	15,4	13,5	11,8	11,2	10,75	10,15

Les résultats du tableau 3.1 sont une conséquence de l'augmentation des porteurs dans la base de la photopile avec l'augmentation de la température. Le rendement de conversion varie de 18,5 % à 10,15 % quand la température augmente de 295 K à 330 K, lequel représente un écart significatif de 8,35 % . La réduction du rendement de conversion de la photopile est également due à des diminutions respectives de la phototension de circuit-ouvert, du facteur de forme et de la puissance maximale des cellules solaires lorsque la température de la photopile augmente.

Alors, pour un meilleur rendement de conversion, il faut que le fabricant tienne compte, lors de la fabrication des photopiles de l'effet de la température en y installant des appareils de refroidissement et cela permettra de rendre optimale l'efficacité de ces photopiles.

3.8 Etude des coefficients de températures

Le coefficient de température d'un paramètre électrique de la photopile indique comment varie ce paramètre électrique (densité de photocourant de court-circuit, phototension de circuit-ouvert, facteur de forme, rendement, puissance...) lorsque la température de la photopile augmente d'un degré.

Le coefficient peut être positif, lorsque la grandeur concernée augmente avec la température ou négatif dans le cas contraire.

3.8.1 Coefficient de température de la densité de photocourant de court-circuit ($\alpha_{I_{cc,u}}$)

La bande de gap d'une cellule solaire au silicium diminue avec la température en provoquant l'augmentation du photocourant du court-circuit ($I_{cc,u}$) [Berthod et al., 2016]. En dérivant l'équation 3.8 par rapport à la température, nous obtenons l'équation 3.13 du coefficient de température de la densité de photocourant de court-circuit de la photopile [Lihan et al., 2014].

$$\alpha_{I_{cc,u}} = \frac{dI_0}{dT} - \frac{q \cdot I_0}{k_b \cdot T} \exp\left(\frac{q \cdot V_{co,u}}{k_b \cdot T}\right) \left[\frac{dV_{co,u}}{dT} - \frac{V_{co,u}}{T} \right] \quad (3.13)$$

Les variations du coefficient de température de la densité de photocourant du court-circuit ($\alpha_{I_{cc,u}}$) ont été tracées pour le mode d'éclairément par la face avant, comme le montre la figure 3.11.

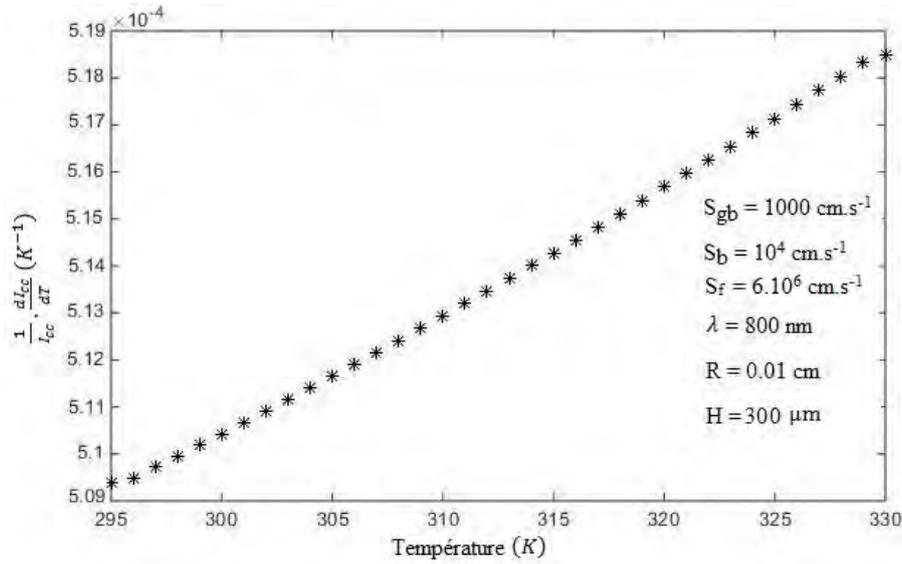


Figure 3.11 – Variation du coefficient de température de la densité de photocourant de court-circuit pour un éclairage par la face avant

Le courbe de variation du coefficient de température de la densité de photocourant de court-circuit montre une augmentation linéaire avec l'augmentation de la température. Cela s'explique par une augmentation de la densité de photocourant de court-circuit et du courant de saturation inverse et une diminution de la phototension de circuit-ouvert lorsque la température augmente. Ce qui se traduit par une diminution de la largeur de la bande interdite de la photopile permettant aux porteurs de charge d'avoir plus de facilité d'acquérir une énergie thermique supérieure à l'énergie du gap pour franchir la bande interdite et passer de la bande de valence à la bande de conduction.

3.8.2 Coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert ($\beta_{V_{co,u}}$)

L'expression du coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert est donnée par l'équation 3.14 [Green, 2003] ci-après :

$$\beta_{V_{co,u}} = -\frac{1}{V_{co,u} \cdot T} \left[\frac{E_{g0}}{q} - V_{co,u} + \frac{n \cdot k_b \cdot T}{q} \right] \quad (3.14)$$

où E_{g0} représente l'énergie de gap à $T = 0 K$.

La courbe de variation du coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert en fonction de la température de la photopile est présentée à la figure 3.12.

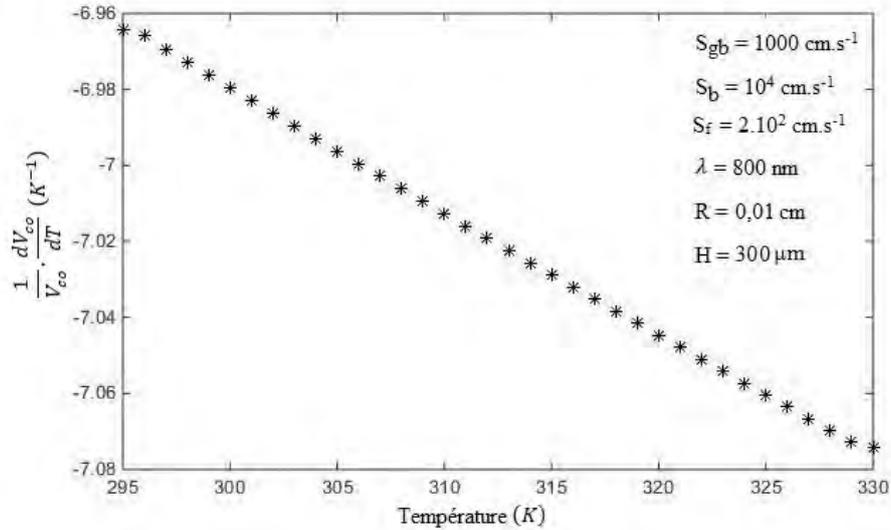


Figure 3.12 – Variation du coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert pour un éclairage par la face avant

La variation du coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert montre une diminution linéaire et négative avec l'augmentation de la température. Ce qui est expliqué par les diminutions de la phototension de circuit-ouvert et la largeur de la bande interdite de la photopile.

3.8.3 Coefficient de température de la puissance maximale ($\gamma_{P_{max,u}}$)

Le coefficient de température de la puissance maximale de la photopile est donné par l'équation 3.15. Il est la somme des coefficients de température de la densité de photocourant de court-circuit ($\alpha_{I_{cc,u}}$), de la phototension de circuit-ouvert ($\beta_{V_{co,u}}$) et du facteur de forme [Chander et al., 2015a].

$$\gamma_{P_{max,u}} = \alpha_{I_{cc,u}} + \beta_{V_{co,u}} + \chi_{FF_u} \quad (3.15)$$

Les variations du coefficient de température de la puissance maximale en fonction de la température pour un éclairage par la face avant sont présentées à la figure 3.13.

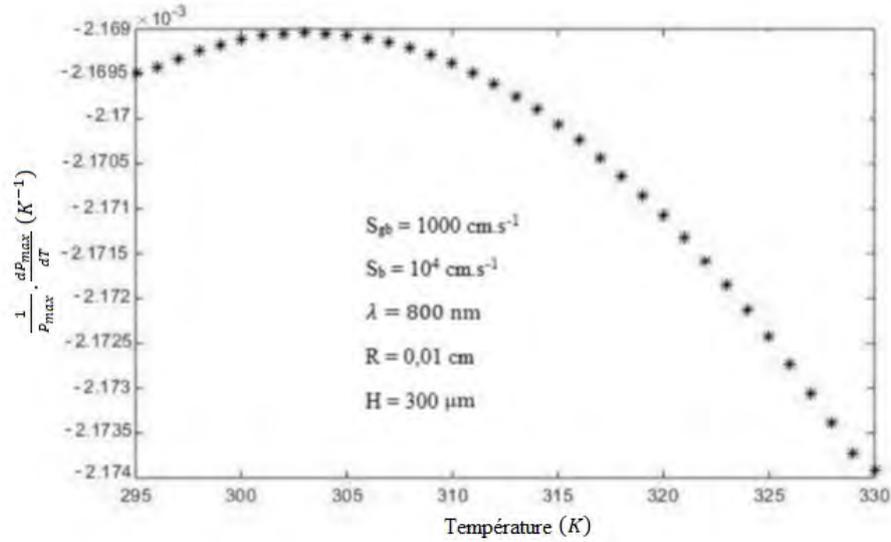


Figure 3.13 – Variation du coefficient de température de la puissance maximale en fonction de la température pour un éclairage par la face avant

La figure 3.13 montre que l'allure de la variation du coefficient de température de la puissance maximale augmente rapidement avec la température pour atteindre sa valeur maximale à $T = 302,5 \text{ K}$ avant de décroître. Ce résultat se traduit par une augmentation de la densité de photocourant de court-circuit qui est plus importante que les diminutions de la phototension de circuit-ouvert et du facteur de forme aux faibles températures. Cependant, la diminution du coefficient de température de la puissance maximale à partir de $T = 302,5 \text{ K}$ se traduit par une augmentation de la densité de photocourant de court-circuit moins importante que les diminutions de la phototension de circuit-ouvert et du facteur de forme lorsque la température augmente conduisant ainsi la diminution de la puissance maximale aux grandes températures.

3.8.4 Coefficient de température du facteur de forme χ_{FF_u}

Le facteur de forme est un paramètre électrique qui décrit le niveau de la puissance de production qu'on peut extraire de la photopile. Il est fonction de la densité de photocourant de court-circuit ($I_{cc,u}$) et de la phototension de circuit-ouvert ($V_{co,u}$). Dans notre étude, le coefficient de température du facteur de forme est donné par l'équation 3.16 ci-dessous [Green et al., 1982; Green, 2003].

$$\chi_{FF_u} = (1 - 1,02 \cdot FF_0) \left(\frac{1}{V_{co,u}} \frac{dV_{co,u}}{dT} - \frac{1}{T} \right) - \frac{R_s}{\frac{V_{co,u}}{I_0} - R_s} \left(\frac{1}{R_s} \frac{dR_s}{dT} \right) \quad (3.16)$$

FF_0 représente le facteur de forme idéal sans l'effet des résistances shunt (R_{sh}) et série (R_s) et est donnée par [Green et al., 1982] :

$$FF_0 = \frac{v_{co} - \ln(v_{co} + 0,72)}{v_{co} - 1}$$

où v_{co} est la phototension de circuit-ouvert normalisée de la photopile :

$$v_{co} = \frac{V_{co}}{V_T}$$

La résistance série d'une bonne photopile cristalle est nulle [Berthod et al., 2016] donc l'équation 3.16 peut être simplifiée avec $R_s = 0$. Cependant, cette hypothèse peut être erronée pour des photopiles avec des couches passivées complexes où χ_{FF_u} peut être positif pour de telles photopiles [Seif et al., 2014].

Sur la base de l'équation 3.16, les variations du coefficient de température du facteur de forme en fonction de la température ont été tracées à la figure 3.14.

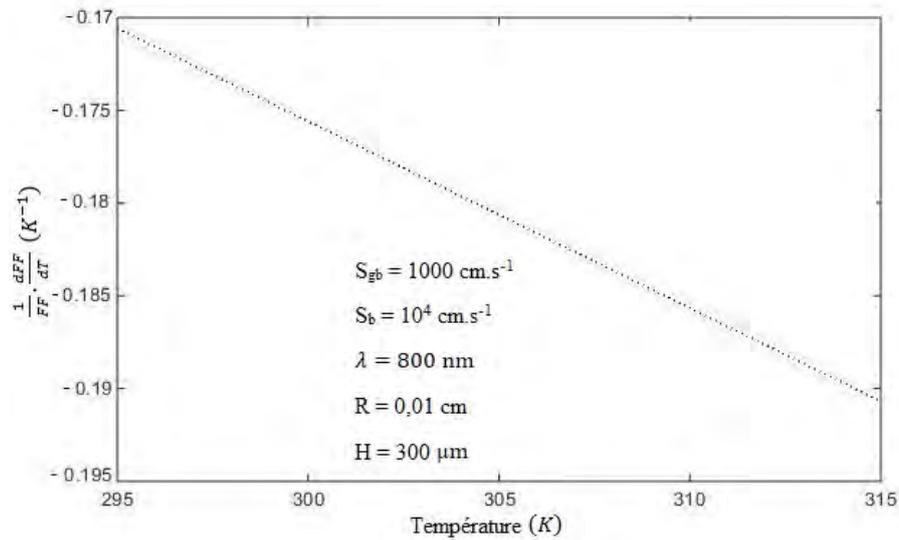


Figure 3.14 – Variation du coefficient de température du facteur de forme en fonction de la température pour un éclairage par la face avant

L'analyse de la courbe de la figure 3.14 montre que le coefficient de température du facteur de forme diminue légèrement et de manière linéaire, avec des valeurs négatives comme celui de la phototension de circuit-ouvert. Cela s'explique par les grandes variations du coefficient de température de la phototension de circuit-ouvert entraînant de grandes variations sur le facteur de forme avec l'augmentation de la température. En outre, le facteur forme des photopiles au silicium est très sensible avec l'augmentation de la température [Green, 2003].

3.8.5 Coefficient de température du rendement (σ_{η_u})

L'expression du rendement d'une photopile en fonction de la température des cellules solaires peut être donnée par l'équation 3.17 [Chander et al., 2015a].

$$\eta_u(T) = \frac{1}{E \times S} \cdot [I_{cc,u}(T) \times V_{co,u}(T) \times FF_u(T)]$$

En dérivant le rendement par rapport à la température, on déduit l'expression du coefficient de température du rendement de la photopile qui est donnée par l'équation 3.18.

$$\sigma_{\eta_u} = \frac{1}{E \times S} \cdot [\alpha_{I_{cc,u}} + \beta_{V_{co,u}} + \chi_{FF_u}] \quad (3.18)$$

Les variations du coefficient de température du rendement en fonction de la température sont tracées à la figure 3.15 ci-après.

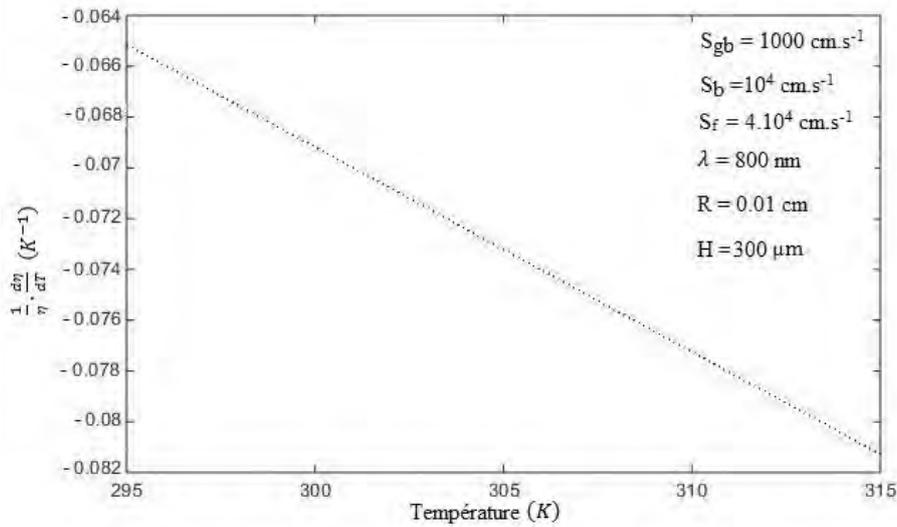


Figure 3.15 – Variation du coefficient de température du rendement en fonction de la température pour un éclairage par la face avant

Il est noté que la variation du coefficient de température du rendement est négative et diminue linéairement avec l'augmentation de la température. Nous pouvons dire que cette diminution est provoquée par les diminutions simultanées des coefficients de température de la phototension de circuit-ouvert et du facteur de forme quand la température augmente. Cette diminution est également liée au fait que l'augmentation de la température de la photopile conduit au rétrécissement de la largeur de la bande interdite. Le rétrécissement de la largeur de la bande interdite se traduit par une augmentation du nombre de photons pouvant créer des paires électron-trou au sein de la photopile. Ces phénomènes sont également liés à l'augmentation du taux de recombinaison des porteurs au sein de la photopile.

3.9 Effets du mode d'éclairement et de la température sur la capacité de diffusion de la photopile bifaciale

3.9.1 Capacité de diffusion de la photopile à l'interface jonction-base

Lorsque la photopile est éclairée, il apparaît un stockage des porteurs de charges photogénérés de part et d'autre de la jonction base-émetteur. Cette jonction peut alors être assimilée à un condensateur dont la capacité est donnée par l'équation 3.19 [Mbodji, 2009].

$$C_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = \frac{dQ_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)}{dV_{ph,u}(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)} \quad (3.19)$$

où $Q_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = q \cdot \delta_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)$ est la charge stockée à la jonction, q est la charge élémentaire,

$\delta_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)$ est la densité des porteurs minoritaires à la jonction,

$V_{ph,u}(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)$ représente la phototension délivrée par la photopile.

En prenant en compte des expressions de la densité des porteurs et de la phototension, nous obtenons l'équation 3.20.

$$C_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = \frac{q}{V_T(T)} \left[\delta_u(z=0, R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) + \frac{n_i^2(T)}{N_b} \right] \quad (3.20)$$

Cette capacité de diffusion à la jonction est une fonction de la température (T), de la taille de grain (R), de la longueur d'onde (λ), de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) et des vitesses de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) et à la face arrière (S_b).

3.9.2 Effet du mode d'éclairement

Nous montrons, à la figure 3.16 suivante, le profil de la capacité de diffusion de la photopile en fonction de la vitesse dynamique à la jonction pour les trois types d'éclairement de la photopile.

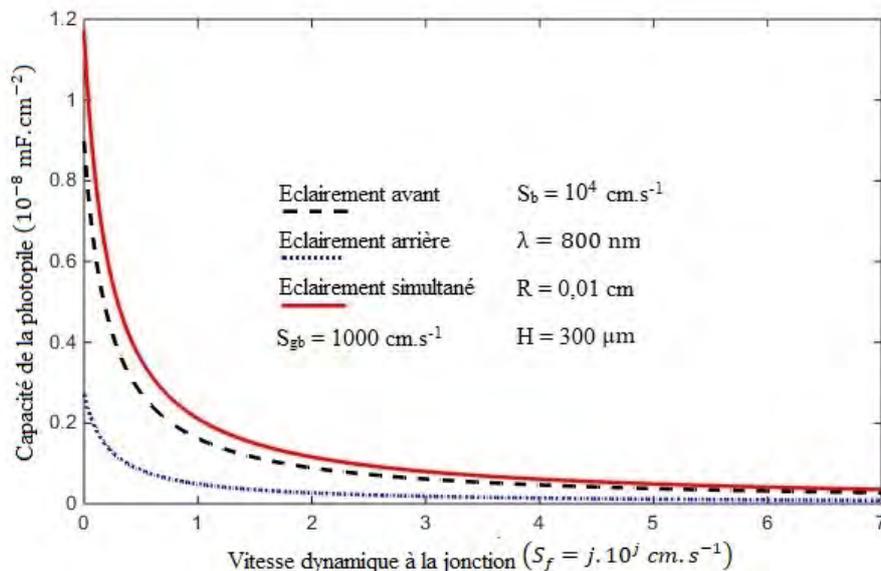


Figure 3.16 – Capacité de la photopile pour les trois modes d'éclairement

L'analyse des courbes de la figure 3.16 montre que la capacité de la photopile pour le double éclairage est plus importante que celle de l'éclairage par la face avant. Cela s'explique par le fait qu'en mode d'éclairage simultané par les deux faces, le nombre de photons incidents est plus important que les deux autres modes d'éclairage ; d'où le nombre de porteurs photogénérés est plus important. Nous notons également que la capacité de la photopile, pour le mode éclairage par la face avant, est plus importante que celle du mode d'éclairage par la face arrière due à l'importance des recombinaisons en mode d'éclairage par la face arrière.

Par ailleurs, l'analyse de la capacité en fonction de S_f montre que :

- la capacité en circuit-ouvert est très brève. On peut voir ici qu'il existe une différence entre le modèle considéré et celui des grains cubiques où le fonctionnement en circuit-ouvert est suffisamment long [Mbodji et al., 2010] ;
- le fonctionnement de court-circuit est très important et, ici, la capacité est faible comme il a été constaté dans les précédentes études [Mbodji, 2009 ; Mbodji et al., 2011a ; Mbodji et al., 2012] ;
- une capacité de diffusion, dépendante du point de fonctionnement liée à S_f apparaît entre les points de fonctionnement de circuit-ouvert et de court-circuit.

L'augmentation de S_f correspond à une augmentation de l'épaisseur de la zone de charge d'espace entraînant ainsi à une diminution de la capacité de la photopile d'où une augmentation de la densité de photocourant de la photopile comme indiqué par [Mbodji et al., 2011a].

3.9.3 Effets de la longueur d'onde (λ), de la taille de grain (R) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) sur la capacité

- Etude de l'effet de la longueur d'onde (λ)

Dans cette partie, nous étudions la variation de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour différentes longueurs d'onde.

Dans les figures 3.17, nous illustrons les courbes de variation de la capacité de la photopile en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) de la photopile.

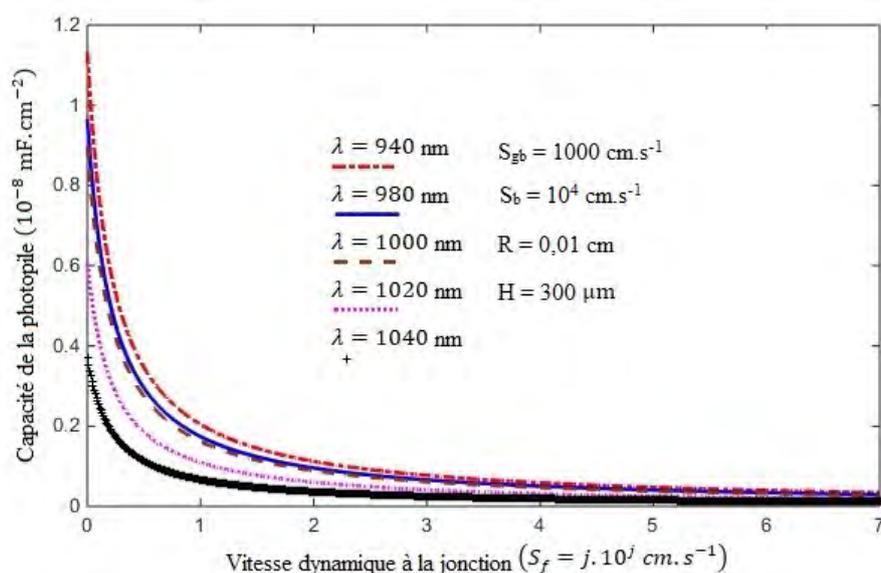


Figure 3.17 – Variations de la capacité de la photopile, pour différentes valeurs de la longueur d'onde, en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour un éclairage par la face avant.

Nous remarquons à la figure 3.17 qu'en situation de circuit-ouvert, la capacité de diffusion de la photopile est maximale ; cela est due à une réduction de l'épaisseur de la zone de charge d'espace qui également est liée à la présence des porteurs libres à la jonction. La variation de la capacité en fonction de S_f est plus sensible en situation de circuit-ouvert du fait du blocage des porteurs minoritaires photogénérés. En fonctionnement de court-circuit, la capacité de diffusion de la photopile diminue très rapidement pour atteindre des valeurs très faibles au-delà des valeurs de $S_f > 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; cela se traduit par la contribution des porteurs de charge fixe dans la jonction entraînant ainsi un élargissement de l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photoile.

L'analyse de la figure 3.17 montre aussi que la capacité de diffusion diminue lorsque la longueur d'onde de la lumière incidente augmente. Ceci est également liée à une extension importante de la zone de charge d'espace car les grandes longueurs d'ondes génèrent des porteurs de charges en profondeur de la base.

- effet de la taille de grain (R)

L'effet de la variation de ce paramètre est montré en traçant à la figure 3.18 les courbes de la capacité de diffusion en fonction de S_f pour différentes valeurs de R .

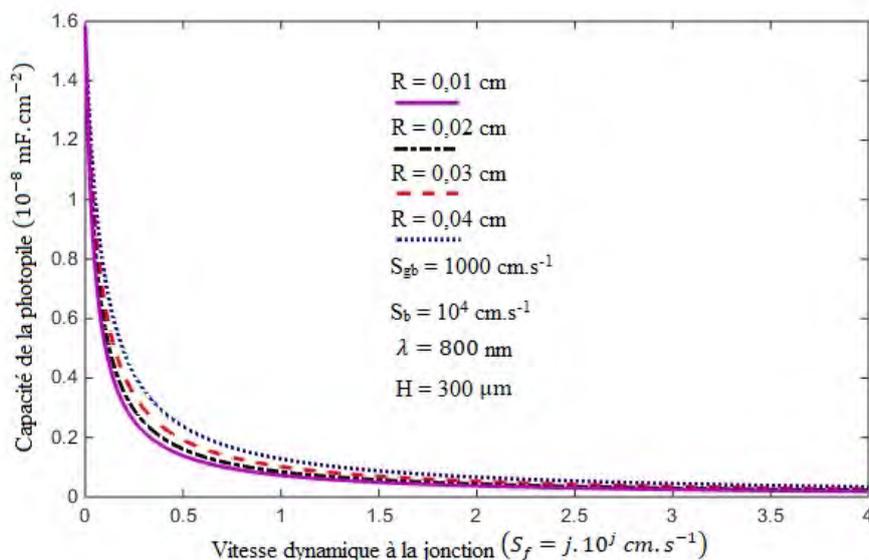


Figure 3.18 – Variations de la capacité de la photopile, pour différentes valeurs de la taille de grain, en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour un éclairage par la face avant.

En analysant la figure 3.18 ci-dessus, nous remarquons que la capacité de diffusion de la photopile augmente avec la taille de grain de la photopile; cela se traduit par une augmentation de la surface du condensateur de la photopile lorsque la taille de grain augmente. Cette augmentation de la capacité de la photopile avec la taille de grain s'explique également par les faibles activités recombinantes et donc une grande présence de porteurs minoritaires à la jonction de la photopile.

Nous notons également que la variation de la taille de grain montre que les capacités les plus élevées sont obtenues aux grandes tailles de grain.

- effet de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb})

Nous représentons sur la figure 3.19 ci-dessous l'allure de la capacité de la photopile en fonction de la vitesse dynamique à la jonction pour différentes vitesses de recombinaisons aux joints de grain. Pour cela, nous fixons la taille grain.

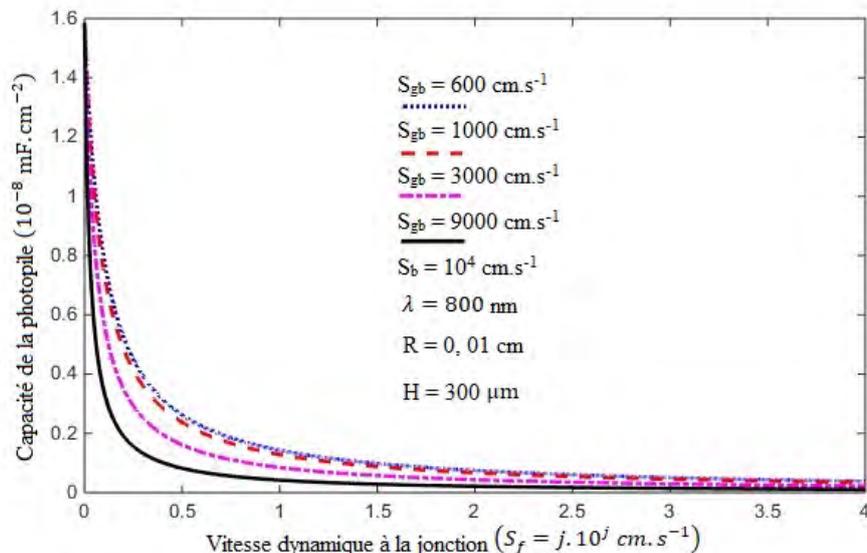


Figure 3.19 – Variations de la capacité de la photopile, pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison aux joints de grain, en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour un éclairage par la face avant.

A la figure 3.19 ci-dessus, nous constatons, d’une part, que l’amplitude de la capacité de la photopile en situation de circuit-ouvert décroît lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente d’où une augmentation de la zone de charge de charge d’espace des cellules solaires. En effet, une augmentation de la vitesse de recombinaison aux joints de grain entraîne des pertes d’électrons à la jonction ; ce qui induit une diminution de la capacité de la photopile en situation de circuit-ouvert. D’autre part, en fonctionnement de court-circuit, nous notons que la variation de la capacité de diffusion de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison aux joints de grain est faible. Ainsi, pour ce régime de fonctionnement, la variation de la vitesse de recombinaison aux joints de grains n’influe pas sur le dépeuplement des porteurs minoritaires dans la zone de stockage de charges.

Nous avons aussi remarqué précédemment que la densité des porteurs de charge minoritaires diminue lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente, ceci entraîne également une diminution de la capacité de la photopile lorsque la vitesse de recombinaison aux joints de grain augmente.

3.9.4 Effet de la température

- effet de la température sur la capacité de diffusion de la photopile en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f)

L’effet de la température sur la capacité de la photopile en fonction de la vitesse dynamique à la jonction est tracée à la figure 3.20.

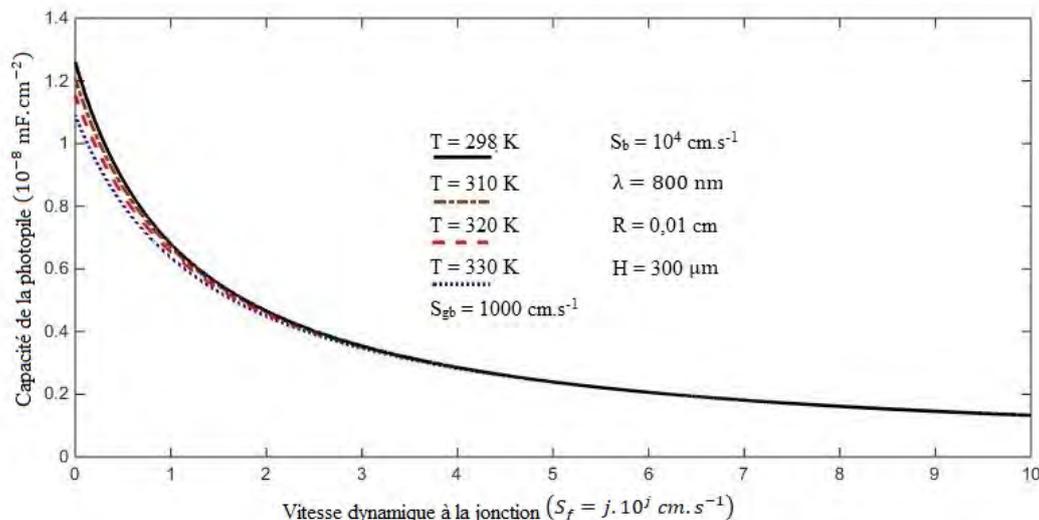


Figure 3.20 – Capacité de la photopile bifaciale éclairée par sa face avant en fonction de S_f pour différentes températures.

Les courbes de la capacité de diffusion de la figure 3.20 montrent une diminution de la capacité de la photopile lorsque S_f et la température augmentent. Cette décroissance est due au fait qu'un grand nombre de porteurs de charges minoritaires en excès dans la base traverse la jonction émetteur-base pour participer à la génération du photocourant. Ce qui induit un dépeuplement de porteurs de charges minoritaires dans la zone de stockage lorsque S_f augmente d'où un élargissement de l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile.

Les courbes de la figure 3.20 montrent également :

- une capacité maximale au voisinage du circuit-ouvert ($S_f = 0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$); cela se traduit par le fait qu'aucun porteur ne traverse la jonction. Les porteurs sont stockés au niveau de la jonction, la densité des porteurs au niveau de la jonction est maximale ainsi que la capacité de la photopile;
- en situation de court-circuit, que la capacité est minimale. En effet, en fonctionnement de court-circuit, tous les porteurs traversent la jonction pour participer à la génération du photocourant. Ce qui induit un dépeuplement de porteurs dans la zone de stockage. La densité des porteurs au niveau de la jonction est quasiment nulle et par conséquent la capacité de la photopile est faible.

Entre ces deux points de fonctionnement, la capacité diminue et cela correspond à une migration des porteurs à travers la jonction.

L'effet de la température sur la capacité de la photopile est plus visible lorsque la photopile est en fonctionnement de circuit-ouvert ($S_f < 2 \times 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) [Diatta et al., 2016]. Les faibles capacités entraînent un élargissement de leurs épaisseurs [Diatta et al., 2015]. Cet élargissement est dû au déplacement du point de fonctionnement en situation de court-circuit.

Toutefois, nous constatons que l'amplitude de la capacité de la photopile, pour un point de fonctionnement différent du court-circuit, diminue lorsque la température sur cette

dernière augmente. Ceci découle du fait que le nombre de porteurs photocréés dans la base de la photopile décroît lorsque la température augmente; d'où une réduction du stockage de porteurs de charges dans la zone de charge d'espace. Cependant, pour la photopile en situation de court-circuit, la valeur de la capacité est indépendante de la température et reste faible.

• **L'effet de la température sur la capacité en fonction de la phototension**
 ($V_{ph,u}$)

La figure 3.21 donne les courbes de variation de la capacité en fonction de la phototension de la photopile pour différentes valeurs de la température.

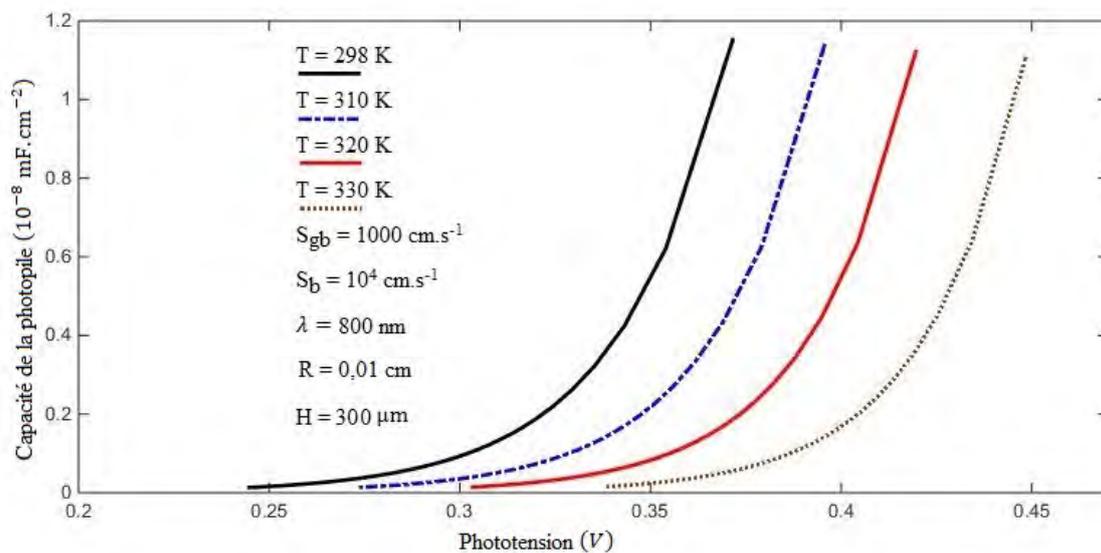


Figure 3.21 – Capacité de la photopile bifaciale éclairée par sa face avant en fonction de la phototension pour différentes températures.

La figure 3.21 montre, d'une part, que la capacité de diffusion de la photopile augmente lorsque la phototension croît. Ainsi, pour des faibles valeurs de la phototension ($V_{ph} < 0,35 \text{ V}$), correspondant à un fonctionnement de la photopile en court-circuit; la capacité de la photopile est faible. Ce qui se traduit par une absence de porteurs de charges au voisinage de la jonction base-émetteur d'où l'élargissement important de la zone de charge d'espace de la photopile. De même, pour les grandes valeurs de la phototension ($V_{ph} > 0,35 \text{ V}$), correspondant à un fonctionnement de la photopile en circuit-ouvert, la capacité de diffusion est maximale; ce qui s'explique par un stockage important de porteurs de charges au niveau de la jonction.

Par ailleurs, nous remarquons également des diminutions respectives de la capacité de diffusion et de la phototension de la photopile lorsque la température augmente.

Après avoir étudié l'effet de la température sur la caractéristique $C_u - V_{ph,u}$, nous pouvons déterminer la capacité de la photopile lorsqu'elle est sous obscurité afin d'étudier l'effet de la température sur la capacité d'obscurité. Pour cela, nous décomposons l'équation

3.20 pour obtenir l'équation 3.21 ci-après :

$$C_u (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = q \times \frac{\frac{n_i^2(T)}{N_b}}{V_T (T)} \left[1 + \frac{N_b}{n_i^2(T)} \delta_u (z = 0, R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) \right] \quad (3.21)$$

En posant :

$$C_0 (T) = \frac{\frac{q \times n_i^2(T)}{N_b}}{V_T (T)}$$

qui représente la capacité intrinsèque de la photopile à l'obscurité.

L'équation de la capacité de la photopile devient :

$$C_u (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = C_0 + \frac{q}{V_T(T)} \times \delta_u (z = 0, R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) \quad (3.22)$$

A partir de l'équation 3.22, l'équation 3.23 de la capacité de la photopile est exprimée en fonction de la capacité intrinsèque, de la phototension $V_{ph,u}$ et de la tension thermique ($V_T (T)$).

$$C_u (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = C_0 \times \exp \left(\frac{V_{ph,u} (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)}{V_T (T)} \right) \quad (3.23)$$

Avec l'équation 3.23, nous obtenons l'équation 3.24 ci-après :

$$\frac{C_u (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)}{C_0} = \exp \left(\frac{V_{ph,u} (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)}{V_T (T)} \right) \quad (3.24)$$

En appliquant à l'équation 3.24 la fonction du logarithme népérien, nous obtenons l'équation 3.25.

$$\ln (C_u (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)) - \ln (C_0) = \frac{V_{ph,u} (R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)}{V_T (T)} \quad (3.25)$$

Sur la base de l'équation 3.25, nous présentons à la figure 3.22 les profils du logarithme népérien de la capacité en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température de la photopile pour une meilleure apperçue de l'effet de la température sur la capacité d'obscurité (C_0).

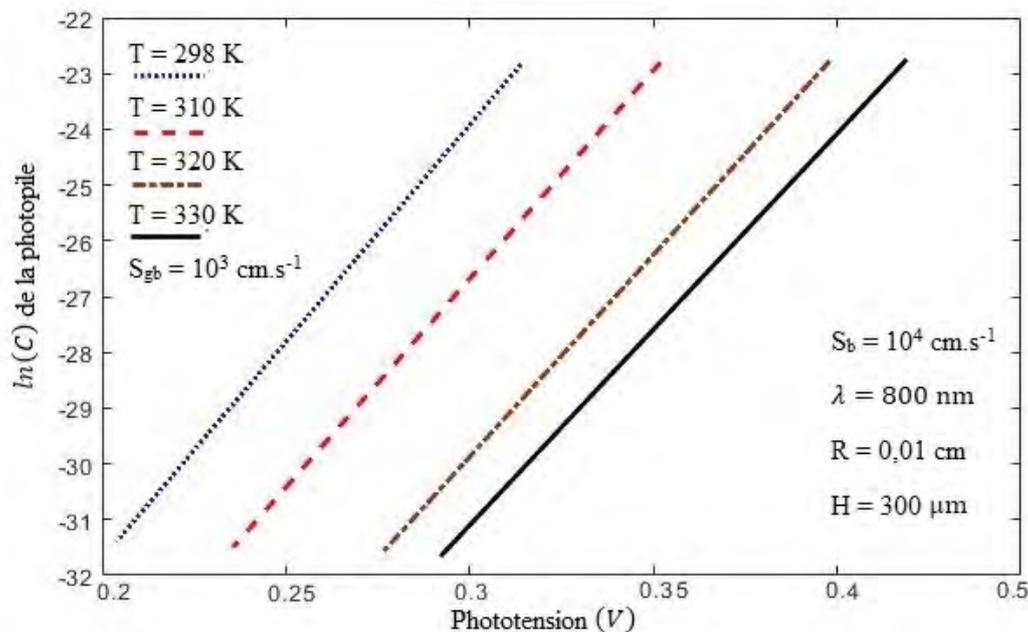


Figure 3.22 – Logarithme de la capacité de la photopile bifaciale éclairée par sa face avant en fonction de la phototension.

L'analyse des courbes de la figure 3.22 montre que la capacité diminue également avec l'augmentation de la température. Cependant, les pentes des courbes du logarithme népérien de la capacité en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température correspondent à l'inverse de la tension thermique (V_T^{-1}) de la photopile et les courbes interceptent respectivement l'axe de la du logarithme népérien de la capacité de la photopile à une valeur qui correspond au logarithme népérien de la capacité d'obscurité [Dieng, 1997] de la photopile. Cette tension thermique, quant à elle, augmente avec l'augmentation de la température [Barro et al., 2015].

Par ailleurs, les valeurs de la capacité intrinsèque et de l'inverse de la tension thermique sont rapportées dans le tableau 3.2 ci-dessous.

Tableau 3.2 – Les valeurs de la capacité intrinsèque $C_0(T)$ et de l'inverse de la tension thermique de la photopile pour différentes valeurs de la température

Température (K)	298	310	320	330
$C_0(F.cm^{-2})$	$2,08 \times 10^{-14}$	$1,71 \times 10^{-15}$	$6,3 \times 10^{-16}$	$2,32 \times 10^{-16}$
$V_T^{-1}(1/V)$	38,9	37,45	36,23	35,21

Sur la base du tableau 3.2, la capacité intrinsèque de la photopile diminue également avec l'augmentation de la température; cela se traduit par une augmentation de la tension thermique plus importante que celle de la concentration intrinsèque lorsque la température augmente; ce phénomène diminue ainsi de manière très significative la capacité intrinsèque.

3.9.5 Effet de la température sur le rendement de la capacité de la photopile

Il a été montré dans les précédentes études [Deme, 2008 ; Mbodji, 2009 ; Deme et al., 2010] que le rendement de la capacité peut s'exprimer sous la forme ci-après :

$$\eta_c(T) = 1 - \frac{C_{cc}(T)}{C_{co}(T)} \quad (3.26)$$

Ainsi, nous fixons les valeurs de la taille de grain (R) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) puis nous faisons varier la température. Pour différentes températures, nous déterminons la capacité de la photopile en situation de circuit-ouvert et de court-circuit. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.3 ci-dessous.

Tableau 3.3 – Les valeurs du rendement de la capacité de la photopile pour différentes températures

Température (K)	298	310	320	330
$C_{co}(mF.cm^{-2})$	$1,28 \times 10^{-8}$	$1,24 \times 10^{-8}$	$1,15 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
$C_{cc}(mF.cm^{-2})$	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$
$\eta_c(\%)$	88,28	87,9	86,95	86,36

L'analyse du tableau 3.2 montre, lorsque la température augmente, que :

- ✘ la capacité en circuit-ouvert diminue ;
- ✘ la capacité en court-circuit est faible et ne varie pas car tous les porteurs ont traversé la jonction pour participer à la production du photocourant ;
- ✘ le rendement de la capacité diminue faiblement.

L'augmentation de la capacité de diffusion en fonctionnement de circuit-ouvert avec la température, nous montre que la capacité de la photopile joue le rôle d'un appareil qui permet de mesurer le nombre de porteurs stockés au niveau de la jonction de la photopile. Nous pouvons également dire qu'en fonctionnement de circuit-ouvert, la vitesse dynamique à la jonction est très faible voir nulle et la capacité est maximale. Lorsque la température de la photopile augmente, cette capacité diminue entraînant ainsi, une excitation des porteurs minoritaires laquelle augmente l'agitation thermique de la photopile.

A partir des résultats du tableau 3.2, nous traçons également le profil de la courbe de la figure 3.23 ci-après qui donne les variations du rendement de la capacité de la photopile en fonction de la température.

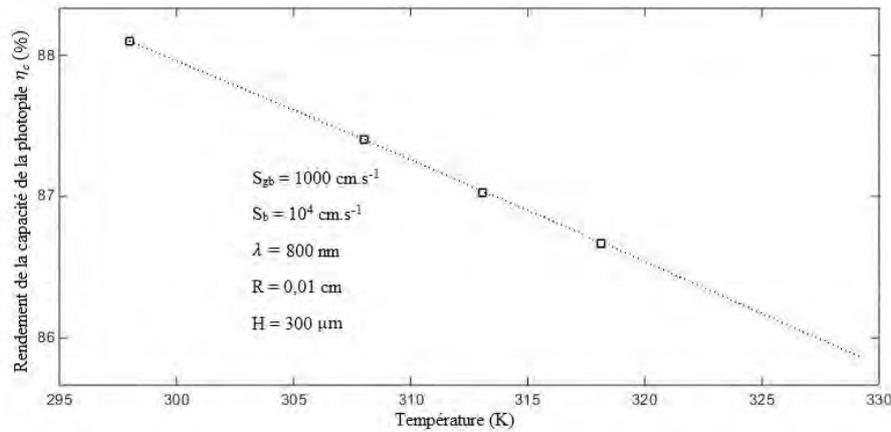


Figure 3.23 – Effet de la température sur le rendement de la capacité pour un éclairage par la face avant

L'allure de la courbe de la figure 3.23 montre que le rendement de la capacité de la photopile décroît linéairement lorsque la température de la photopile augmente ; cela s'explique par une réduction du stockage de porteurs de charges dans la zone de charge d'espace lorsque la température évolue et donc à une diminution du nombre de porteurs photocréés dans la base. En outre, cette diminution du rendement de la capacité de diffusion de la photopile peut être expliquée par une diminution de l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile, en fonctionnement de circuit-ouvert, est moins importante que l'augmentation de cette épaisseur en situation de court-circuit lorsque la température augmente.

3.9.6 Profils à 3D de la capacité de la photopile

L'utilisation des courbes à trois dimensions nous permet d'illustrer les effets simultanés des différents paramètres que nous avons étudiés précédemment.

Ainsi, les effets de T et S_f sur la capacité sont montrés à la figure 3.24 ci-après.

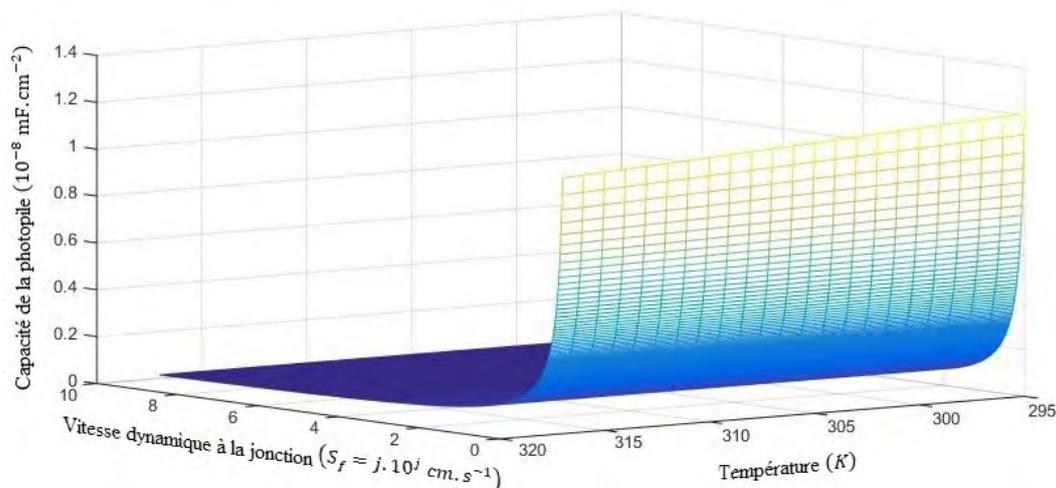


Figure 3.24 – Effets de la température et de la vitesse dynamique à la jonction sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant

La figure 3.24 montre que la capacité de diffusion de la photopile diminue lorsque T et S_f augmentent respectivement. Cela s'explique par un nombre de porteurs photocréés dans la base qui décroît lorsque la température croît entraînant ainsi une réduction du stockage de porteurs de charges qui se déplace vers la zone de charge d'espace.

Les effets de la température (T) et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) sur la capacité de la photopile sont illustrés à la figure 3.25.

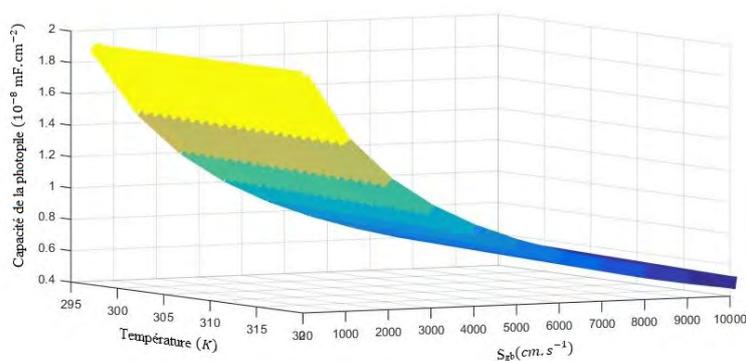


Figure 3.25 – Effets de la température et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant

La figure 3.25 montre que la capacité de la photopile décroît avec l'augmentation de la température et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}). Les phénomènes de recombinaisons étant synonymes de perte de charges accrues en volume aux niveaux des joints de grain, une augmentation de leurs vitesses entraîne une réduction du nombre de porteurs de charges au voisinage de la jonction.

A la figure 3.26, nous présentons les variations de la capacité en fonction de la température (T) et de la taille de grain (R). Nous supposons que les activités aux interfaces

latérales des grains sont constantes.

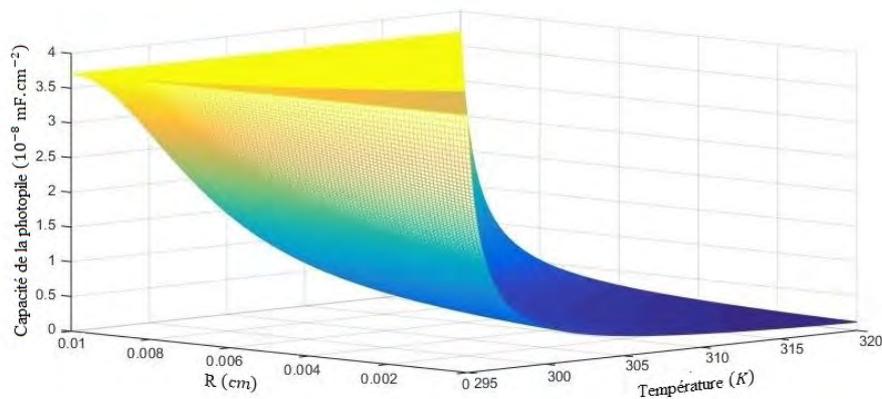


Figure 3.26 – Effets de la taille de grain et de la température sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant

La figure 3.26 montre que la capacité de la photopile augmente avec l'augmentation de la taille de grain de la photopile due à une diminution des joints de grain et une augmentation de la surface du condensateur de la photopile lorsque la taille de grain augmente; d'où une réduction des centres de recombinaisons. Cependant, la capacité de la photopile diminue toujours avec l'augmentation de la température due également à un élargissement de la zone de charge d'espace. Alors les bonnes photopiles sont obtenues avec les tailles de grain élevées et celles-ci doivent être utilisées sous de faibles températures.

La figure 3.27 donne la capacité de la photopile en fonction de la longueur d'onde (λ) et de la température (T). La photopile est éclairée par la face.

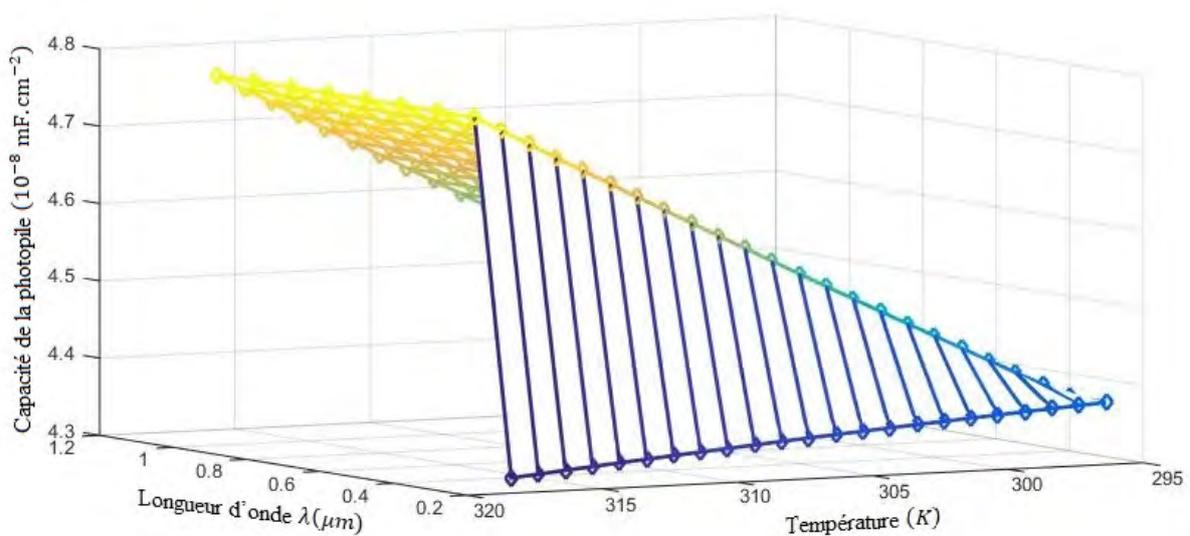


Figure 3.27 – Effets de la longueur d'onde et de la température sur la capacité de la photopile bifaciale pour un éclairage par la face avant

La figure 3.27 montre que la capacité croît avec l'augmentation de la longueur d'onde d'une part et d'autre part, elle est quasiment constante pour les grandes longueurs d'ondes. Cela s'explique par une diminution du coefficient d'absorption de façon générale en fonction de la longueur d'onde. Cette décroissance étant moins visible aux grandes longueurs d'onde [Green et al., 1995]. Nous remarquons également une diminution de la capacité lorsque la température augmente.

3.10 Conclusion

L'effet de la température sur les paramètres électriques de la photopile est présentée. De l'expression de la densité des porteurs dans la base de la photopile, les expressions du photocourant, de la phototension, de la puissance, des coefficients de température de la densité de photocourant de court-circuit, de la phototension de circuit-ouvert, de la puissance idéale, du facteur de forme et du rendement de la photopile et de la capacité, ont été établies en fonction de la température de la photopile. Nous avons montré que l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la densité de photocourant de court-circuit. Cependant on assiste à une diminution nette de la phototension, de la puissance, du facteur de forme et du rendement de conversion de la photopile avec la température.

Nous notons également que les coefficients de température diminuent avec l'augmentation de la température ; ce qui s'explique par une augmentation de la température de la photopile correspondant à un rétrécissement de la largeur de la bande interdite due à une augmentation du nombre de photons pouvant créer des paires électron-trou au sein de la photopile. Par contre, le coefficient de température de la densité de photocourant de court-circuit croît avec l'augmentation de la température causée par une augmentation de la densité de photocourant qui est liée à l'augmentation du taux de recombinaisons des porteurs au sein de la photopile lorsque la température augmente.

L'étude du rendement de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) et de la température a été réalisée en utilisant les capacités en situation de circuit-ouvert et de court-circuit. Nous nous sommes rendu compte que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la capacité en situation de court-circuit tandis que la capacité en situation de court-circuit est indépendante de la température et ne varie pas lorsque cette dernière augmente. Nous notons également que le rendement de la capacité diminue linéairement et faiblement avec l'augmentation de la température traduisant ainsi une diminution de l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile, en fonctionnement de circuit-ouvert, qui est moins importante que l'augmentation de l'épaisseur de la zone de charge d'espace, en situation de court-circuit, lorsque la température augmente.

Par ailleurs, l'étude à trois dimensions de la capacité de diffusion de la photopile bifaciale en régime statique sous éclairage polychromatique constant en fonction de la température a été réalisée. Ainsi, la distribution des porteurs à la jonction montre que :

- les porteurs sont plus présents à la jonction en situation de circuit-ouvert ;
- l'augmentation de la température de la photopile et de la vitesse de recombinaisons aux joints de grain entraînent un élargissement de la zone de charge d'espace de la photopile donc à une réduction de la capacité de diffusion de la photopile ;

- l'augmentation de la taille de grain entraîne un accroissement de la surface du condensateur de la photopile d'où une augmentation de la capacité de la photopile.

L'étude de l'effet du mode d'éclairement, de la longueur d'onde, de la taille de grain et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur la capacité de la photopile nous a également montré respectivement que :

- les meilleures capacités sont obtenues avec un éclairage simultané par les deux faces de la photopile ;
- l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution du coefficient d'absorption ; ce qui implique une baisse des porteurs minoritaires photogénérés dans la base de la photopile. Ceci explique la diminution de la capacité de la photopile lorsque la longueur d'onde augmente dans cette zone.
- les capacités les plus élevées sont obtenues aux grandes tailles de grain et les grains de petites tailles ayant des activités recombinantes élevées fournissent des capacités faibles et donc une présence de porteurs minoritaires à la jonction faible ;
- la capacité de diffusion diminue avec la vitesse de recombinaison aux joints de grain. Nous pouvons dire que, l'action de S_{gb} est de favoriser un vide en porteurs minoritaires dans l'interface jonction-base.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Nous avons présenté, dans cette étude portant sur la caractérisation d'une photopile bifaciale au silicium polycristalline sous éclairage à l'aide du modèle cylindrique, une étude bibliographique sur les effets de la température, de la taille de grain, de la vitesse dynamique à la jonction, des vitesses de recombinaisons aux joints de grain et de la capacité de la photopile à une (1D) et à trois dimension(s) (3D), nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, à l'étude de la densité des porteurs de charges minoritaires en excès en fonction de la profondeur de la base pour différentes températures de la photopile. Les résultats montrent une augmentation de la densité des porteurs minoritaires avec l'augmentation de la profondeur de la base et de la température de la photopile.

A partir de l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès, les expressions du photocourant, de la phototension et de la capacité de diffusion de la zone de charge d'espace ont été aussi établies. Les expressions du photocourant et de la phototension de la photopile bifaciale, nous ont permis de tracer les courbes du photocourant, de la phototension et des caractéristiques photocourant-phototension et puissance-phototension pour différentes valeurs de températures. Ces résultats montrent une augmentation du photocourant et une diminution de la phototension et de la puissance lorsque la température augmente.

L'étude des coefficients de température des paramètres électriques de la photopile nous a montré une augmentation linéaire des variations du coefficient de température du photocourant de court-circuit et une diminution linéaire et négative des coefficients de température de la phototension de circuit-ouvert, du facteur de forme et du rendement de conversion avec l'augmentation de la température. Ainsi, l'allure de la courbe du coefficient de température du photocourant a une pente ascendante tandis que les autres coefficients de température des paramètres électriques de la photopile ont respectivement une pente descendante. Nous notons également une dépendance de la densité de photocourant de court-circuit (I_{cc}) et de la phototension de circuit-ouvert (V_{co}) qui est quasi linéaire. Les pentes des courbes des coefficients de température de la densité de photocourant de court-circuit ($\alpha_{I_{cc}}$) et de la phototension de circuit-ouvert ($\beta_{V_{co}}$) sont respectivement ascendante et descendante. Alors, la variation relative de V_{co} est plus élevée en valeur absolue que celle de I_{cc} . Cela montre que la phototension de circuit-ouvert est plus impactée par la température.

L'étude de la capacité de diffusion de la photopile en fonction de la vitesse dynamique à la jonction (S_f) pour plusieurs températures (T) ou pour plusieurs vitesses de recombinaison aux joints de grain (S_{gb}) ou plusieurs tailles de grain (R) a été exposée. L'étude a montré que :

- la capacité de la photopile est maximale et brève en situation de circuit-ouvert tandis qu'elle est faible et très étendue en situation de court-circuit ;
- la capacité diminue lorsque S_f , T et S_{gb} augmente car l'épaisseur du condensateur de la photopile est très élevée lorsque ces trois paramètres augmentent ;
- la capacité de la photopile augmente avec l'augmentation de R due à l'accroissement de la surface du condensateur de la photopile.

Par ailleurs, l'expression de la capacité de diffusion de la photopile, nous a également permis de déterminer la variation de la capacité d'obscurité et de l'inverse de la tension thermique de la photopile en exploitant les courbes du logarithme népérien en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température. Ces résultats ont montré que la capacité sous obscurité et l'inverse de tension thermique diminuent respectivement avec l'augmentation de la température.

L'étude faite sur le rendement de la capacité de diffusion de la photopile, sous éclaircissement, a aussi montré que le rendement de la capacité de la photopile diminue faiblement avec la température.

Cette étude, effectuée à l'aide du modèle cylindrique, ouvre une grande perspective dans la caractérisation des photopiles à l'aide de cette méthode en trois dimensions, en prenant en compte :

- l'épaisseur de la base de la photopile ;
- de la contribution de l'effet du taux de dopage et du champ électrique dans la base de la photopile, de l'angle d'incidence, du niveau d'éclaircissement et du champ magnétique, en régime dynamique transitoire (excitations optiques ou électriques) ou fréquentiel (modulation de tension ou de la fréquence) ;
- la jonction verticale ou multiple de la photopile bifaciale ;
- un système de refroidissement sur les cellules solaires, c'est-à-dire développer un modèle thermique pouvant être associé aux photopiles pour qu'il puisse optimiser la température.

Références bibliographiques

Bibliographie

- [Ali et al., 2017] W. H. ALI, P. COFIE, J. H. FULLER, S. LOKESH, E. S. KOLAWOLE (2017). *Performance and Efficiency Simulation Study of a Smart-Grid Connected Photovoltaic System*. Energy and Power Engineering, 9 :71-85.
- [Arjyadhara et al., 2013] P. ARJYADHARA, S. M. ALI et J. CHITRALEKHA (2013). *Analysis of Solar PV cell Performance with Changing Irradiance and Temperature*. International Journal of Engineering And Computer Science, 2(1) :214-220.
- [Arora et al., 1980] J. D. ARORA, P. C. MATHUR (1980). *Behavior of diffused junction silicon solar cells in the temperature range 77-500 K*. J. Appl. Phys, 52 :3646-3650.
- [Banerjee et al., 1986] S. BANERJEE et W. A. ANDDERSON (1986). *Temperature dependence of shunt resistance in photovoltaic devices*. Appl Phys Lett, 49 :38-40.
- [Barbisio, 2000] E. BARBISIO (2000). *Diffusion capacitance identification of PV cells*. Proc. 16th European photovoltaic solar energy conference, Glasgow, UK, 919-922.
- [Barro et al., 2004] F. I. BARRO, S. MBODJI, A. L. NDIAYE, I. ZERBO, S. MADOU-GOU, F. ZOUGMORE et G. SISSOKO (2004). *Bulk and Surface Parameters Determination by a Transient Study of Bifacial Silicon Solar Cell under Constant White Bias Light*. Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 262-265.
- [Barro et al., 2015] F. I. BARRO, M. SANE et B. ZOUMA (2015). *On the capacitance of crystalline silicon solar cells in steady state*. Turkish Journal of Physics, 39 :122-127.
- [Bennouna et al., 2007] A. BENNOUNA, D. ZEJLI et R. BENCHRIFA (2007). *Les énergies renouvelables pour un développement durable et global*. Revue des Énergies Renouvelables, 7 :1-8.
- [Bensalem, 2011] S. BENSALEM (2011). *Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires*. Mémoire de master, Université Ferhat Abbas-SETIF.
- [Bensalem et al., 2017] S. BENSALEM, M. CHEGAAR et A. HERGUTH (2017). *Band gap dependence with temperature of semiconductors from solar cells electrical parameters*. Current Applied Physics, 17 :55-59.
- [Berthod et al., 2016] C. BERTHOD, R. STRANDBERG, G. H. YORDANOV, H. G. BEYER et J. O. ODDEN (2016). *On the variability of the temperature coefficients of mc-Si solar cells with irradiance*. Energy Procedia 92 :2-9.
- [Breitenstein et al., 2004] O. BREITENSTEIN, J. P. RAKOTONIAINA, M. H. AI RIFAI et M. WERNER (2004). *Shunt type in crystalline silicon solar cells*. Prog Photovolt : Res Appl, 12 :529-538.

- [Cai et al., 2012] W. CAI, F. CHAO, T. J. LONG, L. D. XIONG, H. S. FU et X. Z. GANG (2012). *The Influence of Environment Temperatures on Single Crystalline and Polycrystalline Silicon Solar Cell Performance*. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 55 :235-241.
- [Cédric, 2008] C. CEDRIC (2008). *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [Champness et al., 1991] C. H. CHAMPNESS, Z. A. SHUKRI et C. H. CHAN (1991). *Minority carrier diffusion length determination from capacitance measurements in Se-CdO photovoltaic cells*. Cano. J. Phys, 69 :538-542.
- [Chander et al., 2015a] S. CHANDER, A. PUROHIT, A. SHARMA, ARVIND, S. P. NEHRA et M. S. DHAKA (2015). *A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature*. Energy Reports, 1 :104-109.
- [Chander et al., 2015b] S. CHANDER, A. PUROHIT, A. SHARMA, ARVIND, S. P. NEHRA et M. S. DHAKA (2015). *Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells*. Energy Reports 1 :175-180.
- [Chegaar et al., 2006] M. CHEGAAR, G. AZZOUZI et P. MIALHE (2006). *Solid-State Electronics*, 50 :1234-1237.
- [Chenvidhya et al., 2005] D. CHENVIDHYA, K. KIRTIKARA et C. JIVACATE (2005). *PV Module Dynamic Impedance and Its Voltage and Frequency Dependencies*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 86 :243-251.
- [Corinne, 2003] A. CORINNE (2003). *Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- [Corréa, 1996] A. CORREA (1996). *Modélisation de la recombinaison aux interfaces d'une photopile au silicium polycristallin en régime stationnaire*. Thèse de doctorat de troisième cycle, UCAD, DAKAR.
- [De Soto et al., 2006] W. DE SOTO, S. A. KLEIN et W. A. BECKMAN (2006). *Solar Energy*, 80 :78-88.
- [Deceglie et al., 2014] M. G. DECEGLIE, T. J. SILVERMAN, B. MARION et S. R. KURTZ (2014). *Metastable changes to the temperature coefficients of thin-film photovoltaic modules*. Proceedings of the 40th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, Honolulu, HI :337-340.
- [Deme, 2008] M. M. M. DEME (2008). *Etude a trois dimensions de la capacité d'une photopile monofaciale en régime statique sous éclairage polychromatique constant et sous différents angles d'incidence de l'éclairage sur la photopile*. Thèse de 3^e de physique, FST-UCAD (sénégal).
- [Deme et al., 2010] M. M. DEME, S. MBODJI, S. NDOYE, A. THIAM, A. DIENG et G. SISSOKO (2010). *Influence of illumination incidence angle, grain size and grain boundary recombination velocity on the facial solar cell diffusion capacitance*. Revue Des Energies Renouvelables, 13(1) :109-121.

- [Diallo et al., 2008] H. L. DIALLO, A. S. MAIGA, A. WAREME et G. SISSOKO (2008). *New Approach of Both Junction and Back Surface Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell*. European Physical Journal Applied Physics, 42 :203-211.
- [Diallo et al., 2012] H. L. DIALLO, B. DIENG, I. LY, M. M. DIONE, M. NDIAYE, O. H. LEMRABOTT, Z. N. BAKO, A. WEREME et G. SISSOKO (2012). *Determination of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 1-6.
- [Diasse et al., 2012] O. DIASSE, R. S. SEYDOU, H. L. DIALLO, M. NDIAYE, N. THIAM, S. MBODJI et G. SISSOKO (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*. International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS), 1(3) :2278-6856.
- [Diatta et al., 2015] I. DIATTA, I. DIAGNE, C. SARR, K. FAYE, M. NDIAYE et G. SISSOKO (2015). *Silicon solar cell capacitance : Influence of both temperature and wavelength*. IPASJ International Journal of Computer Science (IJCS), 3(12) :1-8.
- [Diatta et al., 2016] I. DIATTA, I. LY, M. WADE, M. S. DIOUF, S. MBODJI et G. SISSOKO (2016). *Temperature Effect on Capacitance of a Silicon Solar Cell under Constant White Biased Light*. World Journal of Condensed Matter Physics, 6 :261-268.
- [Dieme et al., 2014] N. DIEME, M. ZOUNGRANA, S. MBODJI, H. L. DIALLO, M. NDIAYE, F. I. BARRO et G. SISSOKO (2013). *Influence of Temperature on the Electrical Parameters of a Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Polychromatic Illumination in Steady State*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 7(12) :2559-2562.
- [Dieng, 1997] B. DIENG (1997). *Etude en modélisation de la capacité de la photopile au silicium en régime statique*. Mémoire de DEA, UCAD, DAKAR, SENEGAL.
- [Dieng, 2002] B. DIENG (2002). *Etude en modélisation d'une photopile bifaciale au silicium éclairée par une lumière monochromatique en régime statique*. Thèse de 3^e cycle de physique, FST-UCAD, SENEGAL.
- [Dieng et al., 2011] A. DIENG, N. THIAM, A. THIAM, A. S. MAIGA et G. SISSOKO (2011). *Magnetic Field Effect on the Electrical Parameters of a Polycrystalline Silicon Solar Cell*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 3(7) :602-611.
- [Dieye et al., 2015] M. DIEYE, S. MBODJI, M. ZOUNGRANA, I. ZERBO, B. DIENG et G. SISSOKO (2015). *A 3D Modelling of Solar Cell's Electric Power under Real Operating Point*. World Journal of Condensed Matter Physics, 5 :275-283.
- [Dinçer et al., 2010] F. DINÇER et M. E. MERAL (2010). *Critical Factors that Affecting Efficiency of Solar Cells*. Journal of Smart Grid and Renewable Energy, 1 :47-50.
- [Dione et al., 2009] M. M. DIONE, M. THIAME, Z. N. BAKO, A. SAMOURA, F. I. BARRO et G. SISSOKO (2009). *Etude en régime statique d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairage monochromatique*. J. Sci., 9(1) :43-50.

- [Dione et al., 2013] M. M. DIONE, I. LY, A. DIAO, S. GUEYE, A. GUEYE, M. THIAME et G. SISSOKO (2013). *Determination of the impact of the grain size and the recombination velocity at grain boundary on the values of the electrical parameters of a bifacial polycrystalline silicon solar cell*. IRACST-Engineering Science and Technology : An International Journal, 3(1) :2250-3498.
- [Diouf et al., 2017] M. S. DIOUF, G. SAHIN, A. THIAM, M. I. NGOM, K. FAYE, D. GAYE et G. SISSOKO (2017). *Capacitance Voltage Characterization of Bifacial Silicon Solar Cell :Effect of External Electric Polarization*. Current Trends in Technology and Science ISSN : 2279-0535,5(6) :669-672.
- [Diouf et al., 2018] A. DIOUF, A. DIAO, S. MBODJI (2018). *Effect of the grain radius on the electrical parameters of an n^+/p polycrystalline silicon solar cell under monochromatic illumination considering the cylindrical orientation*. Journal of Scientific and Engineering Research, 5(2) :174-180.
- [Dugas, 1994] J. DUGAS (1994). *3D Modelling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafers*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 32 :71-88.
- [Dupré et al., 2015] O. DUPRE, R. VAILLON et M. A. GREEN (2015). *Physics of the temperature coefficients of solar cells*. Solar Energy Materials & Solar Cells, 140 :92-100.
- [Ehemba et al., 2016] A. K. EHEMBA, I. WADE, D. DIALLO, D. NIANE et M. DIENG (2016). *Influence of the use temperature on the Capacitance-Frequency measures of a $Cu(In,Ga)Se_2$ thin film solar cell*. Advances in Applied Science Research, 7(3) :169-174.
- [Elnahwy et al., 1988] S. ELNAHWY et N. ADEEB (1988). *Exact analysis of a three-dimensional cylindrical model for a polycrystalline solar cell*. Journal of Applied Physics, 64 :5214-5219.
- [Elnozahy et al., 2016] A. ELNOZAHY, A. K. A. RAHMAN, A. H. H. ALI, M. ABDEL-SALAM et S. OOKAWARA (2016). *Thermal/Electrical Modeling of a PV Module as Enhanced by Surface Cooling*. Journal of Clean Energy Technologies, 4(1) :1-7.
- [Equer, 1993] B. EQUER (1993). *Energie Solaire Photovoltaïque*. Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, Ellipses, Unesco, (1).
- [Fesharaki et al., 2011] V. J. FESHARAKI, M. DEHGHANI et J. J. FESHARAKI (2011). *The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency*. In : Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation- ETEC, Tehran, Iran, November 20-22.
- [Furlan et al., 1985] J. FURLAN et S. AMON (1985). *Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon*. Solid State Electronics. 28(12) :1241-1243.
- [Gaye et al., 2017] T. A. GAYE, B. DIENG, S. MBODJI, O. SOW, G. SISSOKO (2017). *Study and Optimization of a Photovoltaic Mill System Functioning on the Course of the Sun*. Energy and Power Engineering, 9 :260-272.
- [Gueye et al., 2013] S. GUEYE, H. L. DIALLO, M. NDIAYE, M. M. DIONE et G. SISSOKO (2013). *Effect of the Boundary Recombination Velocity and the Grain Size at*

- the Phenomenological Parameters of the Monofacial Solar Cells under Multispectral Illumination in Steady State*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(12) :1-8.
- [Ghani et al., 2015] F. GHANI, G. ROSENGARTEN, M. DUKE et J. K. CARSON (2015). *On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterization parameters*. Solar Energy, 112 :437-445.
- [Green et al., 1982] M. A. GREEN, K. EMERY, A. W. BLAKERS (1982). *Silicon solar cells with reduced temperature sensitivity*. Electron. Lett., 2 :7-98.
- [Green et al., 1995] M. A. GREEN et M. KEEVERS (1995). *Optical properties of intrinsic silicon at 300 K*. Progress in Photovoltaics, 3(3) :189-92.
- [Green, 2003] M. A. GREEN (2003). *General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling*. Progress in Photovoltaics :Research and Applications, 11(5) :333-340.
- [Halder et al., 1983] N. C. HALDER et T. R. WILLIAMS (1983). *Solar Cells*. 8 :201-223.
- [Hamidou et al., 2013] A. HAMIDOU, A. DIAO, S. A. DOUANI, A. MOISSI, M. THIAME, F. I. BARRO et G. SISSOKO (2013). *Capacitance determination of a vertical parallel junction solar cell under multispectral illumination in steady state*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2(3) :2278-3075.
- [Helmers et al., 2013] HELMERS, M. G. DECEGLIE, T. J. SILVERMAN, B. MARION et S. R. KURTZ (201). *Influence of temperature and irradiance on triple-junction solar subcells*. Solar Energy Materials & Solar Cells, 116 :144-152.
- [Hovel, 1975] J. H. HOVEL (1975). *Semiconductors and Semimetals*. Academic Press New York, USA, 11.
- [Ike et al., 2013] IKE et C. U (2013). *The Effect of Temperature on the Performance of A Photovoltaic Solar System In Eastern Nigeria*. Research Inventy : International Journal Of Engineering And Science, 3(12) :10-14.
- [Ishikawa et al., 2000] Y. ISHIKAWA, Y. YAMAMOTO, T. HATAYAMA, Y. URAOKA et T. FUYUKI (2000). *Quasi Tree-Dimensional Simulation for Thin Film Polycrystalline Silicon solar Cells*. 28th IEEE PVSC, 15-22 Sept., Anchorage, USA.
- [Jakubowski, 1981] A. JAKUBOWSKI (1981). *Graphic method of substrate doping determination from C-V characteristics of MIS capacitors* Solide-State Electronics, 24(10) :985-987.
- [Jellison et al., 1982] G. E. JELLISON, Jr. et F. A. MODINE (1982). *Optical Absorption of Silicon Between 1.6 and 4.7 eV at Elevated temperature*. Appl. Phys. Lett., 41(2).
- [Jensen et al., 2000] N. JENSEN, U. RAU, R. HAUSNER, S. UPPAL, L. OBERBECK, R. BERGMANN et J. WERNER (2000). *Recombination mechanisms in amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction solar cells*. J. Appl. Phys., 87(5) :2639-2645.
- [Karatepe et al., 2006] E. KARATEPE, M. BOZTEPE, M. COLAK (2006). *Energy Conversion and Management*, 47 :1159-1178.

- [Khan et al., 2013] F. KHAN, S. H. BAEK, Y. PARK et J. H. KIM (2013). *Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions*. Energy Convers. Manage, 76 :421–429.
- [Khan et al., 2016] F. KHAN, S. BAEK et J. H. KIM (2016). *Wide range temperature dependence of analytical photovoltaic cell parameters for silicon solar cells under high illumination conditions*. Applied Energy, 183 :715-724.
- [Kolsi et al, 2010] S. KOLSI, H. SAMET et M. B. AMAR (2010). *An Efficiency Optimization of a Polysilicon Photovoltaic Module Using a 2-D Analytical and a Two-Diode i-v Model for an Illuminated Solar Cell*. Lebanese Science Journal, 11 :87-104.
- [Krustok et al., 2009] J. KRUSTOK, R. JOSEFSON, M. DANILSON et D. MEISSNER (2009). Solar Energy
- [Kunst et al., 1992] M. KUNST et A. SANDERS (1992). *Transport of Excess Carriers in Silicon Wafers*. Semiconductor Science and Technology, 7 :51-59.
- [Lee et al., 2015] Y. LEE, C. PARK, N. BALAJI, Y. J. LEE et V. A. DAO (2015). *High-efficiency Silicon Solar Cells : A Review*. Israel Journal of Chemistry, 55(10) :1050-1063.
- [Lemrabott et al., 2008] O. H. LEMRABOTT, I. LY, A. S. MAIGA, A. WEREME, F. I. BARRO et G. SISSOKO (2008). *Bulk and surface recombination parameters measurement in silicon double sided solar cell under constant monochromatic illumination*. J. Sci, 8(1) :44-50.
- [Leye et al., 2016] S. N. LEYE, S. MBODJI, F. S. DIA, A. DIAO, et G. SISSOKO (2016). *Optimum sizing and exploitation of ndem's solar power plant production*. Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, Germany :2077-2080.
- [Leye et al., 2017] S. N. LEYE, A. DIOUF, S. MBODJI et G. SISSOKO (2017). *A method to determine the transient capacitance of the bifacial solar cell considering the cylindrical grain and the dynamic junction velocity (S_f)*. EAI Endorsed Transactions on Collaborative Computing, 3(11) :1-5.
- [Leye et al., 2018] S. N. LEYE, I. FALL, S. MBODJI, P. L. T. SOW et G. SISSOKO (2018). *Analysis of T-Coefficients Using the Columnar Cylindrical Orientation of Solar Cell Grain*. Smart Grid and Renewable Energy, 9 :43-56.
- [Lhermite, 1988] H. LHERMITE (1988). *Modélisation mono et bidimensionnelle des phénomènes électrostatiques dans le silicium polycristallin petits grains. Application à l'effet de champ dans une structure M.O.S*. Thèse de Physique, Université de Rennes I, n°193.
- [Lihan et al., 2014] C. LIHAN, R. XIANPEI, F. BAODIAN, Z. JINCHENG et C. CHAO (2014). *Effect of temperature on crystalline silicon solar cells processed from chemical and metallurgical route*. Optik, 125 :3918–3921.
- [Liou et al., 1988] J. J. LIOU, F. A. LINDHOLM et D. C. MALOCHA (1988). *Forward-voltage capacitance of heterojunction space charge regions*. J. Appl. Phys, 63(10).

- [Ly et al., 2012] I. LY, O. H. LEMRABOTT, B. DIENG, I. GAYE, S. GUEYE, M. S. DIOUF et G. SISSOKO (2012). *Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique*. Revue des Energies Renouvelables, 15(2) :87-206.
- [Ly et al., 2013] I. LY, M. NDIAYE, M. WADE, N. THIAM, S. GUEYE et G. SISSOKO (2013). *Concept of Recombination Velocity S_{fc} at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit Condition*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 5(1) :203-208.
- [Madougou et al., 2007] S. MADOUGOU, F. MADE, M. S. BOUKARY et G. SISSOKO (2007). *I-V characteristics for bifacial silicon solar cell studied under a magnetic field*. Advanced Materials Research, 18(19) :303-312.
- [Madougou et al., 2007a] S. MADOUGOU, F. MADE, M. S. BOUKARY et G. SISSOKO (2007). *Recombination Parameters Determination by Using Internal Quantum Efficiency Data of Bifacial Silicon Solar Cells*. Advanced Materials Research, 18(19) :313-324.
- [Madougou et al., 2010] S. MADOUGOU, M. KAKA et G. SISSOKO (2010). *Silicon Solar Cells : Recombination and Electrical Parameters*. Solar Energy, 69-80.
- [Malik et al., 2010] A. MALIK, L. CHEE, T. K. HENG et M. BLUNDELL (2010). *Influence of temperature on the performance of photovoltaic polycrystalline silicon module in the bruneian climate*. ASEAN Journal Science and Technology Development, 26(2) :61-72.
- [Mane et al., 2017] R. MANE, I. LY, M. WADE, I. DATTA, M. S. DOUF, Y. TRAORE, M. NDIAYE, S. TAMBA et G. SISSOKO (2017). *Minority Carrier Diffusion Coefficient $D^*(B, T)$: Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field*. Energy and Power Engineering, 9 :1-10.
- [Mbodji, 2009] S. MBODJI (2009). *Etude en modélisation de l'élargissement de la zone de charge d'espace et de la capacité de transition d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage monochromatique constant*. Thèse d'Etat de physique, FST-UCAD (sénégal).
- [Mbodji et al., 2010] S. MBODJI, M. DIENG, B. MBOW, F. I. BARRO et G. SISSOKO (2010). *Three dimensional simulated modelling of diffusion capacitance of polycrystalline bifacial silicon solar cell*. Journal of Applied Science and Technology (JAST), 15(1 & 2) :109-114.
- [Mbodji et al., 2011a] S. MBODJI, B. MBOW, F. I. BARRO et G. SISSOKO (2011). *A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition*. Turkish Journal of Physics, 35 :281-291.
- [Mbodji et al., 2011b] S. MBODJI et G. SISSOKO (2011). *A Method to Determine the Solar Cell Resistances from Single $I - V$ Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (S_f)*. International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology, 6(2) :103-114.

- [Mbodji et al., 2012] S. MBODJI, B. MBOW, I. ZERBO et G. SISSOKO (2012). *Analysis of the Diffusion Capacitance's Efficiency of the Bifacial Silicon Solar Cell in Steady State Operating Condition*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 4(4) :282-288.
- [Mbodji et al., 2015] S. MBODJI, M. ZOUNGRANA, I. ZERBO, B. DIENG et G. SISSOKO (2015). *Modelling Study of Magnetic Field's Effects on Solar Cell's Transient Decay*. World Journal of Condensed Matter Physics, 5 :284-293.
- [Meier et al., 1988] D. L. MEIER, J. HWANG et R. B. CAMPBELL (1988). *Study of base doping rate effect on parallel vertical junction silicon solar cell under magnetic field*. IEEE Transactions on Electron Devices, 35(1) :70-78.
- [Mikolasek et al., 2015] M. MIKOLASEK, J. KOVAC, J. HURAN, M. PERNY, V. SALY et L. HARMATHA (2015). *Analysis of low temperature current-voltage measurements under illumination of silicon heterojunction solar cells*. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Proceedings, 14–18 September, Hamburg, Germany : 5817-5820.
- [Misiakos et al., 1990] K. MISIAKOS, C. H. WANG, A. NEUGROSCHER et F. A. LINDHOLM (1990). *Simultaneous Extraction of minority-carrier parameters in crystalline semiconductors by lateral photocurrent*. J. Appl. Phys. 67(1) :321-333.
- [Mohammad, 1987] S. N. MOHAMMAD (1987). *An Alternative Method for the Performance Analysis of Silicon Solar Cells*. J. Appl. Phys, 61(2) :767-772.
- [Muller et al., 1986] R. S. MULLER et KAMINS. (1986). *Devices Electronics for Integrated Circuits*. 2nd Ed (Wiley, New York).
- [Nam et al., 1992] L. Q. Nam, M. RODOT, J. NIJS, M. GHANNAM et J. COPPYE (1992). *Réponse spectrale de photopiles de haut rendement en silicium multicristallin*. J. Phys. III France 2, 1305-1316.
- [Nanema, 1996] M. E. NANEMA (1996). *Modélisation d'une photopile bifaciale au silicium : méthodes de détermination des paramètres de recombinaison*. Thèse de 3^e cycle de physique, FST-UCAD, Sénégal.
- [Ndiaye et al., 2012] M. NDIAYE, H. L. DIALLO, M. WADE, I. LY, B. DIENG, O. H. LEMRABOTT, A. S. MAÏGA et G. SISSOKO (2012). *1D Modeling of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation Monochromatic Illumination : Determination of the Equivalent Electrical Circuit Related to the Surface Recombination Velocity*. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, 1-5.
- [Ndiaye et al., 2015] E. NDIAYE, G. SAHIN, M. DIENG, A. THIAM, H. L. DIALLO, M. NDIAYE et G. SISSOKO (2015). *Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation*. Journal of Applied Mathematics and Physics, 3 :1522-1535.
- [Nzonzolo, 2004] Nzonzolo (2004). *Recombination Parameters Determination from the Study of Current-Voltage Characteristic of a Bifacial Solar Cell under Constant Illumination*. Doctorat de troisième Cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal).

- [Nzonzolo et al., 2014] NZONZOLO, D. LILONGA-BOYENGA et G. SISSOKO (2014). *Illumination Level Effects on Macroscopic Parameters of a Bifacial Solar Cell*. Energy and Power Engineering, 6 :25-36.
- [Nzonzolo et al., 2016] NZONZOLO, D. LILONGA-BOYENGA, C. N. MABIKA et G. SISSOKO (2016). *Two-dimensional finite element method analysis effect of the recombination velocity at the grain boundaries on the characteristics of a polycrystalline silicon solar cell*. Circuits and Systems, 7 :4186-4200.
- [Oleksiy, 2005] N. OLEKSIY (2005). *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdiguées*. Thèse de doctorat (Lyon).
- [Park et al., 2010] K. PARK, G. KANG, H. KIM, G. YU et J. KIM (2010). *Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module*. Energy, 35(6) :2681-2687.
- [Pastor, 2006] A. C. PASTOR (2006). *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [Pazheri et al., 2014] F. PAZHERI, M. OTHMAN et N. MALIK (2014). *A review on global renewable electricity scenario*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31 :835-845.
- [Pene et al., 2013] A. D. PENE, L. BITJOKA, F. I. BARRO, G. E. NKENG, C. KAPSEU et G. SISSOKO (2013). *Influence of Magnetic Field on the Electrical Parameter of A Bifacial Silicon Solar Cell Front Side Illuminated by A Multispectral Light Under Steady State*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(9) : 19-23.
- [Purohit et al., 2015] A. PUROHIT, S. CHANDER, A. SHARMA, ARVIND, S. P. NEHRA, M. S. DHAKA (2015). *A study on the performance parameters of single crystalline silicon solar cell with irradiance*. Energy Environ. Focus, 4 :64–70.
- [Rabbani et al., 1981] K. S. RABBANI et D. R. LAMB (1981). *A quick method for the determination of bulk generation lifetime in semiconductors from pulsed MOS capacitance measurements*. Solid-State Electronics, 24 :661-664.
- [Radziemska et al., 2002] E. RADZIEMSKA et E. KLUGMANN (2002). *Thermally affected parameters of the current-voltage characteristics of silicon photocell*. Energy Conversion and Management, 43(14) :1889-1900.
- [Reich et al., 2009] NN. H. REICH, W. G.J. H. M. V. SARK, E. A. ALSEMA, R. W. LOF, R. E. I. SCHROPP, W. C. SINKE, W. C. TURKENBURG (2009). *Crystalline silicon cell performance at low light intensities*. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 93 :1471–1481.
- [Ricaud, 1997] A. RICAUD (1997). *Photopiles Solaires*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [Rodot et al., 1988] M. RODOT et A. KATTY (1988). Workshop on planning of network projects in materials science and solar energy, Aruscha (Tanzania), Nov, 21-26 :1-22.
- [Rohatigi et al., 1988] A. ROHATIGI, S. NARASIMHA et D. S. RUBY (1988). Proc 2th World Conference and Exhibition on photovoltaic Solar Energy Conversion, 1464-1466.

- [Sabry et al., 2008] M. SABRY, A. E. GHITAS (2008). *Influence of temperature on methods for determining Silicon solar cell series resistance*. J. Sol. Energy Eng, 129 :331-335.
- [Sam et al., 2011] R. SAM, M. ZOUNGRANA, F. I. BARRO, I. GUEYE, A. WEREME et G. SISSOKO (2011). *Etude de l'influence des états d'interfaces du grain sur la durée de vie effective des porteurs de charge dans une photopile au silicium polycristallin*. Journal des Sciences, 11(1) :37-44.
- [Samb et al., 2010] M. L. SAMB, M. ZOUNGRANA, F. TOURE, M. T. D. DIOP et G. SISSOKO (2010). *Etude en modélisation à 3-D d'une photopile au silicium en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral : détermination des paramètres électriques*. J. Sci., 10(4) :23-38.
- [Scenario et al., 2015] N. SCENARIO, M. EAST et P. CEDEX (2015). *World energy outlook 2014 factsheet*. Paris : International Energy Agency.
- [Schneider et al., 2001] A. SCHNEIDER, C. GERHARDS, F. HUSTER, W. NEU, M. SPIEGEL, P. FATH, E. BUCHER, R. J. S. YOUNG, A. G. PRINCE, J. A. RABY et A. F. CAROLL (2001) *A BSF for thin screen printed multicrystalline Si Solar Cells*. Proc. 17th European PVSEC, Munich :1768-1771.
- [Schroder et al., 1984] D. K. SCHRODER, J. D. WHITFIELD et C. J. VARKER (1984) *Recombination Lifetime Using the Pulsed MOS Capacitor*. IEEE Transactions on Electron Devices, 31 :462-467.
- [Seif et al., 2014] J. P. SEIF, A. DESCOEUDRES, M. FILIPIB, F. SMOLE, M. TOPIB, Z. C. HOLMAN, et al (2014). *Amorphous silicon oxide window layers for high-efficiency silicon heterojunction solar cells*. Journal of Applied Physics, 115(2).
- [Séraphin et al., 1979] B. O. SERAPHIN et al. (1979). *Topics in Applied Physics*. Edition B. O. Seraphin, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York, 31.
- [Sims, 2004] R. SIMS (2004). *Renewable energy : a response to climate change*. Solar energy, 76(1) :9-17.
- [Singh et al., 2008] P. SINGH, S. N. SINGH, M. LAL et M. HUSAIN (2008). *Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell*. Solar Energy Materials & Solar Cells, 92 :1611-1616.
- [Singh et al., 2012] P. SINGH et N. M. RAVINDRA (2012). *Temperature dependence of solar cell performance-an analysis*. Solar Energy Materials & Solar Cells 101 :36-45.
- [Sissoko, 1993] G. SISSOKO (1993). *Caractérisation par phénomènes transitoires de photopiles au silicium polycristallin*. Doctorat d'Etat de Physique, Faculté des Sciences et Technique, UCAD-Sénégal.
- [Sissoko et al., 1996] G. SISSOKO, C. MUSERUKA, A. CORREA, I. GAYE et A. L. NDIAYE (1996). *Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell*. Proc. World Renewable energy Congress, Part III, Denver-USA, 1487-1490.
- [Sissoko et al., 1998] G. SISSOKO, B. DIENG, A. CORREA, M. ADJ et D. AZILINON (1998). *Silicon solar cell space charge region width determination by a study in modeling*. WREC, 1852-1855.

- [Soro et al., 2017] B. SORO, M. ZOUNGRANA, I. ZERBO, M. SAVADOGO et D. J. BATHIEBO (2017). *3-D Modeling of Temperature Effect on a Polycrystalline Silicon Solar Cell under Intense Light Illumination*. Smart Grid and Renewable Energy, 8 :291-304.
- [Sow et al., 2012] E. SOW, S. MBODJI, B. ZOUMA, M. ZOUNGRANA, I. ZERBO, A. SERE et G. SISSOKO (2012). *Determination in 3D modelling study of the width emitter extension region of the solar cell operating in open circuit condition by the gauss's law*. International Journal of Science, Environment and Technology, 1(4) :331-340.
- [Søndena et al., 2015] R. SØNDENÅ, C. BERTHOD, J. O. ODDEN, A. SØILAND, M. S. WIIG et E. S. MARSTEIN (2015). *Temperature dependent quantum efficiencies in multicrystalline silicon solar cells*. Energy Procedia, 77 :639-645.
- [Sze et al., 2007] S. M. Sze et K. K. Ng (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey.
- [Tayyib et al., 2014] M. TAYYIB, J. O. ODDEN et T. O. SAETRE (2014). *Irradiance Dependent Temperature Coefficients for MC Solar Cells from Elkem Solar Grade Silicon in Comparison with Reference Polysilicon*. Energy Procedia, 55 :602-7.
- [Thiam et al., 2012] N. THIAM, A. DIAO, M. NDIAYE, A. DIENG, A. THIAM, M. SARR, A. S. MAÏGA et G. SISSOKO (2012). *Electric Equivalent Models of Intrinsic Recombination Velocities of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Magnetic Field Effect*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4(22) :4646-4655.
- [Thiam et al., 2013] N. THIAM, A. DIAO, M. WADE, M. NDIAYE, I. ZERBO, M. SARR, A. S. MAÏGA et G. SISSOKO (2013). *Study of the Photothermal Response of a Monofacial Solar Cell in Dynamic Regime Under a Multispectral Illumination*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(1) :134-141.
- [Thiame et al., 2011] M. THIAME, H. L. DIALLO, M. M. DIONE, Z. N. BAKO, M. I NGOM., M. SANE, A. G. CAMARA, A. WEREME et G. SISSOKO (2011). *Etude en modélisation à trois dimensions de l'effet des joints de grain sur une photopile à jonction vertical série au silicium polycristallin*. J. Sci.,11(1) :27-36.
- [Thiaux, 2010] Y. THIAUX, (2010). *Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur le cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides, Evaluation du potentiel de la technologie Li-ion*. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [Thurmond, 1975] C. D. THURMOND (1975). *The Standard Thermodynamic Functions for the Formation of Electron and Hole in Ge, Si, GaAs and GaP*. Journal of the Electrochemical Society, 122 :133-141.
- [Tobnaghi et al., 2013] D. M. TOBNAGHI, R. MADATOV et D. NADERI (2013). *The Effect of Temperature on Electrical Parameters of Solar Cells*. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2(12) :6404-6407.

- [Tobnaghi et al., 2015] D. M. TOBNAGHI et D. NADERI (2015). *The Effect of Solar Radiation and Temperature on Solar cells Performance*. Extensive Journal of Applied Sciences, 3(2) :39-43.
- [Trabelsi et al., 2009] A. TRABELSI, A. ZOUARI et A. BEN ARAB (2009). *Modeling of polycrystalline N^+/P junction solar cell with columnar cylindrical grain*. Revue des Energies Renouvelables, 12(2) :279-297.
- [Weakiem et al., 1979] H. A. WEAKIEM et D. REDFIELD (1979). *Temperature Dependence of the Optical Properties of Silicon*. J. Appl. Phys., 50(3) :1491-1493.
- [Xiao et al., 2012] C. XIAO, D. YANG, X. YU, X. GU et D. QUE (2012). *Influence of the compensation level on the performance of p-type crystalline silicon solar cells : theoretical calculations and experimental study*. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 107 :263-271.
- [Xiao et al., 2014] C. XIAO, X. YU, D. YANG et D. QUE (2014). *Impact of solar irradiance intensity and temperature on the performance of compensated crystalline silicon solar cells*. Solar Energy Materials & Solar Cells 128 :427-434.
- [Zerbo et al., 2014] I. ZERBO, M. ZOUNGRANA, A. OUEDRAOGO, B. KORGO, B. ZOUMA et D. J. BATHIBO (2014). *Influence of Electromagnetic Waves Produced by an Amplitude Modulation Radio Antenna on the Electric Power Delivered by a Silicon Solar Cell*. Global Journal of Pure and Applied Sciences, 20 :139-148.
- [Zerbo et al., 2016] I. ZERBO, M. ZOUNGRANA, I. SOURABIE, A. OUEDRAOGO, B. ZOUMA et D. J. BATHIEBO (2016). *External Magnetic Field Effect on Bifacial Silicon Solar Cell's Electrical Parameters*. Energy and Power Engineering, 8 :146-151.
- [Zoungrana et al., 2007] M. ZOUNGRANA, I. LY, B. ZOUMA, F. I. BARRO et G. SIS-SOKO (2007). *3D study of bifacial silicon solar cell under intense light concentration and under external constant magnetic field : effect of magnetic field and base depth on excess minority carrier generation*. J. Sci., 7(4) :73-81.
- [Zoungrana et al., 2011] M. ZOUNGRANA, I. ZERBO, F. I. BARRO, R. SAM, F. TOURE, M. L. SAMB et F. ZOUGMORE (2011). *Modélisation à 3 – D de l'influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur une photopile au silicium polycristallin sous éclairnement concentré*. Revue des Energies Renouvelables, 14(4) :649-664.

Annexe A

Mathématiques

Annexe A

Annexe Mathématiques

L'expression du taux de génération des porteurs pour les modes d'éclairement est présentée au tableau A.1 et les valeurs du coefficient d'absorption (α), du coefficient de réflexion (R') et du flux incident (I_0), pour chaque longueur d'onde (λ), sont données au tableau A.2.

Tableau A.1 – Taux de génération [Mbodji, 2009]

Mode d'éclairement	Taux de génération
Eclairement Avant	$G_{av}(z) = G_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z)$
Eclairement Arrière	$G_{ar}(z) = G_0 \cdot \exp(-\alpha(H - z))$
Eclairement Simultané	$G_d(z) = G_0 \cdot (\exp(-\alpha \cdot z) + \exp(-\alpha(H - z)))$

Où :

$$G_0 = \alpha \cdot I_0 (1 - R')$$

Le tableau A.2 donne les différentes valeurs du coefficient d'absorption, du coefficient de réflexion et du flux incident pour chaque longueur d'onde.

Tableau A.2 – Valeurs des paramètres dont est tributaire le taux de génération [Mbodji, 2009]

λ (μm)	α (cm^{-1})	R'	I_0 ($\times 10^{17} W.cm^{-2}$)
0,3	$1,73 \times 10^6$	0,623488	0,00154309475806
0,32	$1,28 \times 10^6$	0,57413	0,331080645161
0,34	$1,09 \times 10^6$	0,561749	0,859939516129
0,36	$1,02 \times 10^6$	0,58291	1,0853891129
0,38	293000	0,5465	1,34220060484
0,4	95200	0,48602	2,24616935484
0,42	50000	0,45152	2,37774193548

λ (μm)	α (cm^{-1})	R'	I_0 ($\times 10^{17} \text{ W.cm}^{-2}$)
0,44	31100	0,42891	2,99372983871
0,46	21000	0,41149	3,54529233871
0,48	14800	0,39788	3,91475806452
0,5	11100	0,38711	3,89390120968
0,52	8800	0,378	3,99330645161
0,54	7050	0,37043	4,03503024194
0,56	5780	0,36422	4,16048387097
0,58	4880	0,35867	4,39092741935
0,6	4140	0,35411	4,46159274194
0,62	3520	0,34979	4,6059375
0,64	3040	0,34641	4,62580645161
0,66	2580	0,34331	4,65459677419
0,68	2210	0,34028	4,78776209677
0,7	1900	0,33764	4,52424395161
0,72	1660	0,33529	3,57641129032
0,74	1420	0,33333	4,54853830645
0,76	1190	0,33147	1,01910483871
0,78	1010	0,3296	4,57463709677
0,8	850	0,32803	4,32459677419
0,82	707	0,32667	3,56220564516
0,84	591	0,32541	4,30034274194
0,86	480	0,32415	4,28335483871
0,88	383	0,32288	4,16744758065
0,9	306	0,3216	3,36864919355
0,92	240	0,32033	3,45064919355
0,94	183	0,31915	2,23539012097
0,96	134	0,31808	2,0354516129
0,98	95,9	0,31711	2,9868266129
1	64	0,31625	3,70625
1,02	39,9	0,3155	3,59344354839
1,04	22,6	0,31485	3,52100806452
1,06	11,1	0,28967	3,39718245968
1,08	6,2	0,31366	3,25099596774
1,1	3,5	0,31312	2,69328125
1,12	2	0,29413	8,00991935484
1,14	1	0,31214	1,47091028226
1,16	0,42	0,3117	1,67498387097
1,18	0,065	0,31127	2,62103931452
1,2	0,022	0,31083	2,71118951613

Le coefficient d'absorption décroît en fonction de la longueur d'onde selon la courbe ci-dessous qui englobe les longueurs d'onde de 250 à 1450 nm.

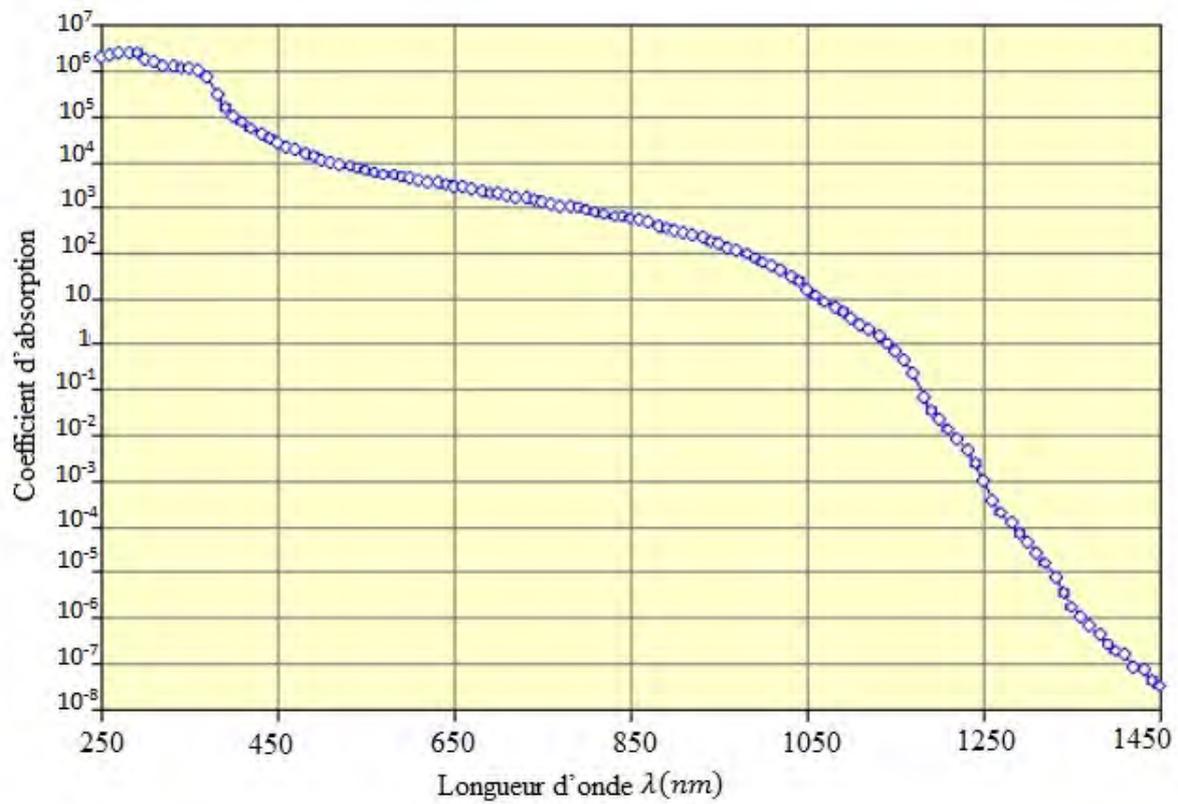


Figure A.1 – Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [Mbodji, 2009]

L'équation de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de photopile se présente comme suit :

$$\frac{\partial^2 \delta_u(r, z)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \delta_u(r, z)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \delta_u(r, z)}{\partial r} - \frac{1}{L^2(T)} \delta_u(r, z) = -\frac{G_u(z)}{D(T)} \quad (\text{A.1})$$

En procédant par la méthode de séparation des variables utilisées par [Trabelsi et al., 2009], nous posons la solution de la densité des porteurs comme suit :

$$\delta_u(r, z, T) = \sum_{k \geq 1}^{+\infty} f_{k,u}(r, T) \sin(C_k \cdot z) + k_{k,u}(T) \quad (\text{A.2})$$

En calculant les dérivées premières et secondes par rapport au rayon r et à la profondeur z de la photopile puis en remplaçant les expressions obtenues dans l'équation (A.1) et en utilisant l'expression (A.3) de la condition d'orthogonalité de la fonction sinus sur la longueur de la base [Trabelsi et al., 2009], nous obtenons les équations différentielles des trois modes d'éclairement de la photopile bifaciale :

$$\int_0^H \sin(C_k \cdot z) \cdot dz = \frac{H}{2} \cdot \delta'_{kk} \quad (\text{A.3})$$

— pour un éclairage avant :

$$f''_{k,av}(r, T) + \frac{1}{r} \cdot f'_{k,av}(r, T) - \frac{1}{L_k^2} \cdot f_{k,av}(r, T) = N_{k,av} + P_{k,av}(T) \quad (\text{A.4})$$

En posant :

$$L_k = \left(C_k^2 + \frac{1}{L^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{A.5})$$

qui est la longueur de diffusion de la photopile.

$$N_{k,av} = -\frac{2G_0}{H \cdot D} \cdot \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} (1 + (-1)^{k+1} \cdot \exp(-\alpha \cdot H)) \quad (\text{A.6})$$

et

$$P_{k,av}(T) = \frac{2K_{k,av}(T)}{L^2 H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k} \quad (\text{A.7})$$

— pour un éclairage arrière :

$$f''_{k,ar}(r, T) + \frac{1}{r} \cdot f'_{k,ar}(r, T) - \frac{1}{L_k^2} \cdot f_{k,ar}(r, T) = N_{k,ar} + P_{k,ar}(T) \quad (\text{A.8})$$

Avec :

$$N_{k,ar} = -\frac{2G_0}{H \cdot D} \cdot \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} \cdot \exp(-\alpha \cdot H) \quad (\text{A.9})$$

et

$$P_{k,ar}(T) = \frac{2K_{k,ar}(T)}{L^2 T} H \cdot \frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k} \quad (\text{A.10})$$

— pour un éclairage simultané :

$$f''_{k,d}(r, T) + \frac{1}{r} \cdot f'_{k,d}(r, T) - \frac{1}{L_k^2} \cdot f_{k,d}(r, T) = N_{k,d} + P_{k,d}(T) \quad (\text{A.11})$$

Avec :

$$N_{k,d} = -\frac{2G_0}{H.D} \cdot \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} (1 + (1 + (-1)^{k+1}) \cdot \exp(-\alpha.H)) \quad (\text{A.12})$$

et

$$P_{k,d}(T) = \frac{2K_{k,d}(T)}{L^2 H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (\text{A.13})$$

La solution générale s'écrit sous la forme :

— pour un éclairage avant :

$$f_{k,av}(r, T) = A_{k,av} \cdot r + M_{k,av}(T) \quad (\text{A.14})$$

Où

$$M_{k,av}(T) = \frac{2G_0}{H.D} \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} (1 + (-1)^{k+1} \cdot \exp(-\alpha.H)) - \frac{2K_{k,av}(T)}{L^2 H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (\text{A.15})$$

— pour un éclairage arrière :

$$f_{k,ar}(r, T) = A_{k,ar} \cdot r + M_{k,ar}(T) \quad (\text{A.16})$$

Où

$$M_{k,ar}(T) = \frac{2G_0}{H.D} \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} \cdot \exp(-\alpha.H) - \frac{2K_{k,ar}(T)}{L^2 H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (\text{A.17})$$

— pour un éclairage arrière :

$$f_{k,d}(r, T) = A_{k,d} \cdot r + M_{k,d}(T) \quad (\text{A.18})$$

Où

$$M_{k,d}(T) = \frac{2G_0}{H.D} \frac{C_k}{C_k^2 + \alpha^2} (1 + (1 + (-1)^{k+1}) \cdot \exp(-\alpha.H)) - \frac{2K_{k,d}(T)}{L^2(T) H} \cdot \frac{1 - \cos(C_k.H)}{C_k} \quad (\text{A.19})$$

Les valeurs de $A_{k,u}$ et $K_{k,u}$ sont déterminées à l'aide des conditions aux limites à la jonction et aux joints de grain [Trabelsi et al. 2009].

— à la jonction de la photopile ($z = 0$) :

$$D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(r, z, T)}{\partial z} \right|_{z=0} = S_f \cdot \delta_u(r, z = 0, T) \quad (\text{A.20})$$

— aux joints de grain ($r = R$) :

$$D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(r; z, T)}{\partial r} \right|_{r=R} = -S_{gb} \cdot \delta_u(r = R, z, T) \quad (\text{A.21})$$

Détermination des C_k à partir des conditions aux limites à la face arrière.

$$D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(r; z, T)}{\partial z} \right|_{z=H} = -S_b \cdot \delta_u(r, z = H, T) \quad (\text{A.22})$$

A partir de l'équation (A.22), nous obtenons l'équation transcendante (A.23)

$$\tan(C_k \cdot H) = -\frac{D(T)}{S_b} \cdot C_k \left(1 - \frac{S_b}{S_f \cdot \cos(C_k \cdot H)}\right) \quad (\text{A.23})$$

Photocourant de la photopile

Le photocourant dû aux électrons minoritaires à travers la jonction peut être calculé par le biais de la relation :

$$I_{ph,u}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = q \cdot D(T) \cdot \left. \frac{\partial \delta_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (\text{A.24})$$

En réécrivant l'équation A.24 à l'aide de la condition à la limite à la jonction, il vient que :

$$I_{ph,u}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = q \cdot D(T) \cdot S_f \cdot \delta_u(z = 0, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) \quad (\text{A.25})$$

Les expressions du photocourant selon le mode d'éclairage sont données respectivement par :

- en éclairage par la face avant :

$$I_{ph,av}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = q \cdot D(T) \cdot S_f \cdot \left[\sum_{k \geq 1}^{+\infty} f_{k,av}(r, T) \cdot \sin(C_k \cdot z = 0) + K_{k,av}(T) \right] \quad (\text{A.26})$$

avec :

$$K_{k,av}(T) = \frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}\right) (D(T) + S_{gb})\right)}$$

- en éclairage par la face arrière :

$$I_{ph,ar}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = q \cdot D(T) \cdot S_f \cdot \left[\sum_{k \geq 1}^{+\infty} f_{k,ar}(r, T) \sin(C_k \cdot z = 0) + K_{k,ar}(T) \right] \quad (\text{A.27})$$

avec :

$$K_{k,ar}(T) = \frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot \exp(-\alpha \cdot H)}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}\right) (D(T) + S_{gb})\right)}$$

- en éclairage simultané par les deux faces :

$$I_{ph,d}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = q \cdot D(T) \cdot S_f \cdot \left[\sum_{k \geq 1}^{+\infty} f_{k,d}(r, T) \sin(C_k \cdot z = 0) + K_{k,d}(T) \right] \quad (\text{A.28})$$

avec :

$$K_{k,d}(T) = \frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}\right) (D(T) + S_{gb})\right)}$$

Phototension de la photopile

$$V_u(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = V_T(T) \cdot \ln \left[\frac{N_b}{n_i^2(T)} \cdot \delta_u(z = 0, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) + 1 \right] \quad (\text{A.29})$$

Les expressions de la phototension selon le mode d'éclairement sont données respectivement par :

- en éclairage par la face avant :

$$V_{av}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = V_T(T) \cdot \ln \left[\frac{N_b}{n_i^2(T)} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}\right) (D(T) + S_{gb})\right)} \right) + 1 \right] \quad (\text{A.30})$$

- en éclairage par la face arrière :

$$V_{ar}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = V_T(T) \cdot \ln \left[\frac{N_b}{n_i^2(T)} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot \exp(-\alpha \cdot H)}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}\right) (D(T) + S_{gb})\right)} \right) + 1 \right] \quad (\text{A.31})$$

- en éclairage simultané par les deux faces :

$$V_d(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = V_T(T) \cdot \ln \left[\frac{N_b}{n_i^2(T)} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{\left(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R\right) \left(S_f + \left(\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}\right) (D(T) + S_{gb})\right)} \right) + 1 \right] \quad (\text{A.32})$$

Capacité de la photopile

$$C_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = \frac{dQ_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)}{dV_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)} \quad (\text{A.33})$$

En introduisant la différentielle dz au numérateur et au dénominateur, nous avons :

$$C_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = \frac{dQ_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)}{dz} \cdot \frac{dz}{dV_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)} \quad (\text{A.34})$$

En dérivant $V_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)$ par rapport à z , nous obtenons :

$$\frac{dV_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)}{dz} = V_T(T) \cdot \frac{\frac{d\delta_u(z, R, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T)}{dz}}{\delta_u(z, S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) + \frac{n_i^2(T)}{N_b}} \quad (\text{A.35})$$

En sachant que :

$$Q_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = q \cdot \delta_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T)$$

et en faisant le rapport des équations (A.30) et (A.31), l'expression de la capacité de la photopile à la jonction devient :

$$C_u(R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) = \frac{q}{V_T(T)} \left[\delta_u(z=0, R, S_f, S_{gb}, S_b, \lambda, T) + \frac{n_i^2(T)}{N_b} \right] \quad (\text{A.36})$$

Les expressions de la capacité selon le mode d'éclairement sont également données respectivement par :

- en éclairage par la face avant :

$$C_{av}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = \frac{q}{V_T(T)} \cdot \left[\frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H)}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R)(S_f + (\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}))(D(T) + S_{gb})} + \frac{n_i^2(T)}{N_b} \right] \quad (\text{A.37})$$

- en éclairage par la face arrière :

$$C_{ar}(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = \frac{q}{V_T(T)} \cdot \left[\frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot \exp(-\alpha \cdot H)}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R)(S_f + (\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}))(D(T) + S_{gb})} + \frac{n_i^2(T)}{N_b} \right] \quad (\text{A.38})$$

- en éclairage simultané par les deux faces :

$$C_d(S_f, S_b, R, S_{gb}, \lambda, T) = \frac{q}{V_T(T)} \cdot \left[\frac{\frac{2 \cdot G_0}{H} \cdot \frac{C_k \cdot (1 + (1 + (-1)^{(k+1)}) \cdot \exp(-\alpha \cdot H))}{C_k^2 \cdot \alpha^2}}{(1 + \frac{S_{gb} \cdot R}{D(T)} + R)(S_f + (\frac{1 - \cos(C_k \cdot H)}{C_k \cdot L^2(T) \cdot H}))(D(T) + S_{gb})} + \frac{n_i^2(T)}{N_b} \right] \quad (\text{A.39})$$

Annexe B.
Communications et publications

Annexe B

Annexe Communications et publications

Publications dans des revues Internationales indexées

Serigne Ndiangue Leye, Ibrahima Fall, Senghane Mbodji, Papa Lat Tabara Sow & Gregoire Sissoko, (2018). *Analysis of T-Coefficients Using the Columnar Cylindrical Orientation of Solar Cell Grain*. Smart Grid and Renewable Energy, 9 :43-56.

LEYE, S. N., DIOUF, A., MBODJI, S., & SISSOKO, G. (2017). *A method to determine the transient capacitance of the bifacial solar cell considering the cylindrical model of the grain and the dynamic junction velocity (S_f)*. EAI Endorsed Transactions on Collaborative Computing, 3(11) :1-5.

LEYE, S. N., DIOUF, A., DIAO, A., MBODJI, S., SISSOKO, G. (2017). *Temperature effect on the capacitance of the bifacial solar cell considering the columnar cylindrical orientation*. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PV-SEC), 25-29 Septembre, Amsterdam, Pays Bas.

Communications ou Présentation de poster dans des conférences Internationales ou régionales

LEYE, S. N., DIOUF, A., DIAO, A., MBODJI, S., SISSOKO, G. (2017). *Temperature effect on the capacitance of the bifacial solar cell considering the columnar cylindrical orientation*. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PV-SEC), 25-29 Septembre, Amsterdam, Pays Bas.

Serigne Ndiangue LEYE, Assane DIOUF & Senghane Mbodji, (2018). *Méthode de détermination de la capacité d'une photopile solaire bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage polychromatique en considérant le modèle d'un grain cylindrique et la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f)*. Colloque sur les Applications des Mathématiques dans l'Ingénierie et les Sciences, 21-22 février, Bambey, Sénégal.

Serigne Ndiangue LEYE & Senghane MBODJI, (2018). *Etude des coefficients de température (T -coefficients) à travers le modèle colonnaire cylindrique des grains d'une photopile au silicium polycristallin sous éclairage monochromatique constant*. Deuxième édition Doctoriales du 26 et 27 juin de l'Ecole Doctorale Développement Durable et Société (ED2DS) de l'Université de Thiès.

Nom et prénoms : **LEYE Serigne Ndiangue**

Titre de la thèse : « **Etude, à 3D et à l'aide du modèle cylindrique, de la capacité de transition et de l'effet de la température sur les paramètres de la photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage monochromatique constant** »

Résumé :

Une étude bibliographique sur les méthodes et techniques de détermination, en régime statique, des photopiles au silicium polycristallin est présentée.

Une étude théorique de la densité des porteurs minoritaires de la photopile bifaciale au silicium polycristallin et aux grains cylindriques, en régime statique, sous éclairage monochromatique et sous l'effet de la température, est faite pour les trois modes d'éclairage. Il ressort que la densité des porteurs minoritaires augmente avec l'augmentation de la température de la photopile.

L'étude de l'effet de la température sur les paramètres électriques de la photopile est faite. De la solution de l'équation de continuité, de la densité des porteurs dans la base de la photopile, les expressions du photocourant, de la phototension, de la puissance, des coefficients de température et de la capacité, ont été établies en fonction de la température de la photopile. Ainsi les courbes de la capacité de la photopile en fonction de S_f montre que la capacité est brève au voisinage du circuit-ouvert. L'étude a également montré que le photocourant de court-circuit, la phototension de circuit-ouvert, le facteur de forme, le rendement et les coefficients de température dépendent linéairement de la température.

Mots clés : Taille de grain ; Vitesse dynamique à la jonction ; Vitesse de recombinaison aux joints de grains ; Polycristallin ; Photopile ; Longueur d'onde ; Photocourant ; Phototension ; Puissance ; Capacité ; Rendement ; Facteur de forme ; Température ; Coefficient de température.

Name and first name : **LEYE Serigne Ndiangue**

Thesis title : « **Study, with 3D and with the help of the cylindrical model, of the transition capacitance and the effect of the temperature on the parameters of the bifacial solar cell with polycrystalline silicon under constant monochromatic illumination** »

Summary :

A literature review on methods and techniques of determination static, polycrystalline silicon solar cells is presented.

A theoretical study of the minority carriers density of the silicon bifacial solar cell polycrystalline and cylindrical grains, in static conditions, under illumination monochromatic and under the effect of temperature, is made for the three modes illumination. It appears that the minority carriers density increases with temperature of solar cell.

The study of the effect of temperature on the electrical parameters of the solar cell is made. Of the solution of the continuity equation, of the carrier density in the base of the solar cell, the expressions of the photocurrent, the phototension, the power, the coefficients of temperature and capacitance, were established according to the temperature of the solar cell. So the curves of the capacitance of the solar cell as a function of S_f shows that the capacitance is short in the vicinity of the open circuit. The study also showed that the photocurrent of short circuit, open circuit phototension, fill factor, efficiency and temperature coefficients depend linearly on the temperature.

Keywords : Grain size ; Junction dynamic velocity ; Grain boundary recombination velocity ; Polycrystalline ; Solar Cell ; Wavelength ; Photocurrent ; Photovoltage ; Power ; Capacitance ; Efficiency ; Fill Factor ; Temperature ; Temperature coefficient.