

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE, CHIMIE, SCIENCES DE LA TERRE, DE L'UNIVERS
ET DE L'INGENIEUR
(ED-PCSTUI)

Année : 2017 N° d'ordre :

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : ENERGIE SOLAIRE, MATERIAUX ET SYSTEMES

Présentée par

M. Ibrahima DIATTA

Titre : « INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES PARAMETRES ELECTRIQUES (CAPACITE, RESISTANCES SHUNT ET SERIE) DE LA PHOTOPILE AU SILICIUM SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE ET POLYCHROMATIQUE EN REGIME STATIQUE.»

Soutenue publiquement le 15 / 07/ 2017 devant le jury composé de :

Président :	Grégoire	SISSOKO	Professeur titulaire	FST/ UCAD
Rapporteurs :	Emmanuel Birame	NANEMA DIENG	Maître de Recherche Maître de Conférences	CNRST/ Burkina Faso UADB
Examineurs :	Ibrahima Mamadou Mor	LY WADE NDIAYE	Maître de conférences Maître de Conférences Assistant	EPT/ Thiès EPT/ Thiès FST/ UCAD
Directeur :	Senghane	MBODJI	Maître de Conférences	UADB

DEDICACES

Je dédie humblement ce travail à :

A ceux qui m'ont toujours soutenu ; ceux qui sont dévoués et se sont toujours sacrifiés pour moi ; ceux qui ont su me donner sans rien attendre en retour; ceux qui ont toujours été là dans les moments de détresse, **ma très chère mère et mon père** ainsi que mon **regretté Oustaz Ibrahima Faye** qui a rendu l'âme le **06 Novembre 2015**. Mon homonyme m'a appris la base de la religion. Outre mes parents, **Oustaz Ibrahima Faye** m'a toujours conseillé d'aller le plus loin possible dans mes études et m'a toujours rappelé que les énergies renouvelables plus particulièrement l'énergie solaire est un avenir. Qu'Allah l'accueille auprès du prophète Mouhammad (PSL) et que la terre de KEBEMER lui soit légère.

Ce travail est aussi dédié à :

Mes grandes mères

Mes Oncles

Mes Tantes

Mes Frères et Sœurs

Mes Cousins et Cousines

Mon neveu (Mamadou Lamine Badji) et futurs neveux, ma nièce (Ndèye Seynabou Badji) et futures nièces

Mes futurs enfants (Incha Allah)

Mes Ami(e)s

Mes Camarades de promotion

Tous les Membres du laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire

Tous mes proches

Tous (tes) ceux (celles) qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de mes études.

Tous (tes) collégiens (ennes) et tous (tes) lycéens (ennes) qui aiment la science en particulier la physique.

A tous (tes) ceux (celles), de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de ce travail.
Notamment le professeur Grégoire SISSOKO qui m'a toujours encouragé et soutenu depuis
le début de mon cycle de master.

Merci pour tout!

Ce travail a été effectué à la Faculté des Sciences et Techniques (FST), de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) sous la direction de Monsieur Senghane Mbodji Professeur assimilé et vice-recteur à l'UADB sous couvert de Monsieur Grégoire SISSOKO Professeur titulaire de classe exceptionnelle des Universités, Directeur du Groupe International de Recherche en Énergie renouvelable et Rédacteur en chef du Journal des Sciences (www.cadjds.org) au Département de Physique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal).

REMERCIEMENTS

Je tiens vivement et très sincèrement à remercier un grand nombre de personnes sans qui, ce travail n'aurait probablement jamais été mené à terme.

Je commencerai par remercier Monsieur **Grégoire SISSOKO**, PROFESSEUR TITULAIRE de classe exceptionnelle à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar qui, malgré les prérogatives qui sont siennes, a accepté sans réserve, de m'associer : à l'encadrement de ses étudiants de master II énergie solaire matériaux et système, dans les travaux dirigés, dans les cours magistraux et les travaux pratiques. Il s'y est grandement impliqué par ses directives, ses remarques et suggestions, mais aussi par ses encouragements dans les moments clés de son élaboration. Je tiens à le remercier aussi pour cette liberté qu'il a permise, sans laquelle le chercheur ne saurait affirmer sa manière de penser et de procéder, sa manière d'être, bref toute sa personnalité. Merci d'avoir guidé mes premiers pas dans le chemin de la recherche en énergie renouvelable et les conseils d'ordres pédagogique, sociale et familiale que vous me donnez tous les jours.

Je ne manquerai pas non plus de dire un grand merci aux **membres du jury** :

- **Emmanuel Nanema** Maître de conférences et membre au CNRST du Burkina Faso. Je ne pourrai vous payer de votre déplacement du Burkina au Sénégal juste pour faire connaître le contenu de mon mémoire de thèse. Je ne pourrai vous remercier d'avoir accepté, sans aucune réserve, d'évaluer ce mémoire de thèse de doctorat unique à sa juste valeur, et de me faire part de ses remarques surement pertinentes qui, avec un peu de recul, contribueront, sans nul doute, au perfectionnement du présent travail.
- **Monsieur Birame DIENG** Maître de conférences à l'Université Alioune Diop de Bambey car étant un personnage très décisif dans mon travail ; aussi d'avoir accepté, sans réserve d'être membre de mon jury. Vous avez été toujours disponible à mes innombrables sollicitations.
- **Monsieur Ibrahima Ly** Maître de conférences à l'école polytechnique de Thiès, je vous remercie de votre déplacement, d'avoir accepté de participer aux membres du jury. Vos conseils sont les bienvenus pour améliorer ce travail en cours.
- **Monsieur Mamadou Wade** Maître de conférences à l'école polytechnique de Thiès, je n'ai pas de mots suffisants pour vous remercier d'être membre de mon jury, et de vous être déplacé. Vos conseils seront très utiles pour l'amélioration de ce document.

Remerciements

- **Monsieur Mor Ndiaye** Assistant à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar ; étant chaque jour avec vous, avec votre modestie depuis le master j'ai beaucoup appris à votre côté à travers les travaux dirigés, les travaux pratiques et les cours magistraux. Vous avez énormément contribué à l'élaboration de ce travail. Je suis très content de votre présence dans mon jury. Merci encore.
- **Monsieur Senghane Mbodji** Maître de conférences à l'Université Alioune Diop de Bambey, tous les mots de mon agenda ne suffisent point pour vous remercier d'avoir accepté d'encadrer cette mémoire de thèse. Par votre modestie lorsque vous êtes avec vos étudiants on sent que vous maîtrisez votre domaine. Par votre modestie quand une personne est à votre côté vous ne lui montrez pas que vous êtes le recteur de l'UADB, mais vous lui montrez que vous êtes un bon musulman par votre accueil chaleureux qu'il vous rend visite. Or pour être un bon encadreur il faut avoir ces caractères.

Je remercierai sans doute le Professeur **Babacar Mbow** Responsable du Master SOLMATS (Energie Solaire Matériaux et Système) du Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire (L.A.S.E.S) de m'avoir reçu dans votre laboratoire.

Je remercie également **Monsieur Issa Diagne** Maître de Conférences à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar dans la même lancée que Monsieur Mor Ndiaye, il est fréquemment avec nous au bureau, à nous aider dans nos travaux, à nous donner des conseils pédagogiques et aussi de la vie. Merci pour tous les efforts consacrés aux étudiants du groupe GIRER (Groupe de Recherche en Energie Renouvelable) dirigé par le Chef (Professeur Grégoire Sissoko).

Je remercie les Docteurs comme **Marcel Sitor Diouf, Amary Thiam, Moussa Dieng** pour leurs conseils.

Mes remerciements s'étendent également à tous **mes amis et collègues** membres du Groupe de Recherche en énergie renouvelable de la Faculté des Sciences et Techniques au Laboratoire de Semi-conducteurs et d'Énergie solaire (LASES). Je les remercie tous pour cette opportunité, cette atmosphère de recherche conviviale et surtout pour leur esprit d'équipe.

Encore une fois un très grand merci à **ma mère, mon père** ainsi que mon regretté **Oustaz Ibrahima Faye**.

Je remercie également, le Professeur Babacar Mbow qui est le directeur de notre laboratoire LASES, le Professeur Bassirou Lô qui est le chef du département de physique, le Professeur Joseph Sarr qui est le doyen de la Faculté des Sciences et Techniques ; ainsi que tout le personnel de la scolarité de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar de nous avoir soutenu tout au long de notre cursus universitaire.

Table des matières

REMERCIEMENTS	v
Table des matières	vii
Liste des figures.....	xiv
Liste des tableaux	xx
Nomenclature	xxii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Références	3
Chapitre I : Etude bibliographique	5
REGIME STATIQUE	5
Capacitance voltage characterisation of poly si-sio2-si structures[1]	5
Graphic method of substrate doping determination from c-v characteristics of mis capacitors [3]6	
Forward-voltage capacitance of hererojunction space-charge regions [5].....	8
Using Gauss’s law in determining the width emitter extension region of the solar cell operating in Open Circuit Condition [9].....	9
A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition [11]	10
Artificial neural network approach for more accurate solar cell electrical circuit model [15].....	12
Modeling of Solar Cell [20]	16
Mathematical Model for Photovoltaic Cells [22]	17
Analysis Of Mathematical Model Of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment [26]....	22
Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment [27]	24
A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox [33]	29
Reconstitution de la caractéristique I – V et détermination de la puissance d’un système photovoltaïque [34]	30
Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment [37]	30
Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions [38].....	30
Silicon Solar Cell Space Charge Region Width Determination by a Study in Modeling [39].....	32
REGIME DYNAMIQUE TRANSITOIRE	34
A quick method for the determination of bulk generation lifetime in semiconductors from pulsed mos capacitance measurements [41]	34

Table des matières

Minority-Carrier Lifetime Analysis of Silicon Epitaxy and Bulk Crystals with Nonuniformly Distributed Defects [44]	35
Determination of Lifetime and Surface Recombination Velocity of p-n Junction Solar Cells and Diodes by Observing Transients [45].....	37
Theory of photo induced open circuit voltage decay in a solar cell [46]	37
Studies of surface voltage and current transients in solar cells for accurate evaluation of minority carrier lifetime [50]	37
Determination of minority carrier lifetime and surface generation velocity by hysteresis pulsed C-V method [52]	37
Recombination Lifetime Using the Pulsed MOS Capacitor [54]	37
Minority carrier transport in carbon doped gallium arsenide [55]	38
Measurement of solar cell ac parameters using the domain technique [59].....	38
REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL	38
Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaIn/AlN/GaN heterostructures [60].....	38
Admittance and Impedance Spectroscopy on Cu (In, Ga) Se ₂ Solar Cells [61]	39
Effects of Series Resistance and Inductance on Solar Cell Admittance Measurements [62].....	39
Measurement of AC Parameters of Gallium Arsenide (GaAs/Ge) Solar Cell by Impedance Spectroscopy [63].....	39
Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination [64].....	39
A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy [67].	40
Study of silicon solar cell at different intensities of illumination and wavelengths using impedance spectroscopy [69]	41
Conclusion étude bibliographique.....	42
Références bibliographiques	43
[1] G. Yaron and D. F.-Bentchkowsky, « capacitance voltage characterization of poly Si-SiO ₂ -Si structures », Solid-State Electronics, Vol. 23, pp : 433-439, 1980.....	43
[2] S. M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, Wiley, pp: 432, 1969 New York.	43
[3] A. Jakubowski, « Graphic method of substrate doping determination from C-V characteristics of MIS capacitors », Solid-State Electronics, Vol. 24, No. 10, pp: 985-987, 1981.....	44
[5] J. J. Liou, F. A. Lindholm, and D. C. Malocha, « forward-voltage capacitance of hererojunction space-charge region », J. Appl. Phys. 63 (10), pp: 5015-5022, 15 May 1988	44
[8] R. L. Anderson, “Experiments on Ge-GaAs heterojunctions ”Solid-State Electron, Vol. 5, Issue 5, pp: 341-344, in21-in24, pp: 345-351, September-October 1962.	44
[9] E. Sow, S. Mbodji, B. Zouma, M. Zoungrana, I. Zerbo, A. Sere & G. Sissoko, « using Gauss’s law in determinating the width emitter extension region of the solar cell operating	

in Open Circuit Condition », Global journal of sciences frontier Research physics and space sciences, Vol. 12, issue 6, version 1.0, 2012, 67-71.....	44
[15] k. J. Singh, K L R. Kho, S. J. Singh, Y. C. Devi, N.B. Singh, and S.K. Sarkar, « Artificial neural network approach for more accurate solar cell electrical circuit model », International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA) Vol.4, No.3, pp: 101-116, June 2014.....	45
[20] Ms. Geetam Richhariya, Ms. Aparna Pachori, « Modeling of Solar Cell », International Journal of wind and Renewable Energy Volume 1 Issue 1, pp, 31-34, ISSN: 2277-3975, 2011..	45
[22] Wafaa ABD EL-BASIT, Ashraf Mosleh ABD El-MAKSOOD and Fouad Abd El-Moniem Saad SOLIMAN, «Mathematical Model for Photovoltaic Cells », Issue 23, p. 13-28, July-December 2013.....	45
[26] P.Sudeepika, G.Md. Gayaz Khan, « Analysis Of Mathematical Model Of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment », International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE), Vol. 3, Issue 3, March 2014.	46
[27] J. Surya Kumari and Ch. Sai Babu, « Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment », International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 2, No. 1, pp. 26~34, February 2012.	46
[33] Samer Said, Ahmed Massoud, Mohieddine Benammar and Shehab Ahmed, « A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox », Journal of Energy and Power Engineering 6, pp : 1965-1975, 2012.....	46
[34] A. Zaatri, S. Belhour, « Reconstitution de la caractéristique I – V et détermination de la puissance d’un système photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 pp : 563 – 574, 2009.....	46
[37] J. Surya Kumari and Ch. Sai Babu, « Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment », International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 2, No. 1, pp. 26~34, February 2012.	47
[38] F. Khan, S. H. Baek, Y. Park, J. H. Kim , « Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions », Energy Conversion and Management, pp : 421–429, 2013.....	47
[39] G. Sissoko, B. Dieng, A. Corrêa, M. Adj, and D. Azilinson, « Silicon Solar Cell Space Charge Region Width Determination by a Study in Modeling », Renewable Energy, Vol. 3, pp : 1852-1855, 2004.....	47
[41] K. S. Rabbani and D. S. Lamb, « a quick method for the determination of bulk generation lifetime in semiconductors from pulsed MOS capacitance measurements », Solid-State Electronics, Vol. 24, pp: 661-664, 1981.....	47
[46] S.C. Jain, « theory of photo induces open circuit voltage decay in a solar cell », Solid-State Electronics, Vol. 24, pp: 179-183, 1981.....	47
[50] A. Vishnoi, R. Gopal, R. Dwivedi and S. K. Srivastava, « Studies of surface voltage and current transients in solar cells for accurate evaluation of minority carrier lifetime », Solid-State Electronics, Vol. 32, No. 1, pp: 661-664, 1981.....	48

[52] J. J. Liou, F. A. Lindholm, and D. C. Malocha, « determination of minority carrier lifetime and surface generation velocity by hysteresis pulsed C-V method », Solid-State Electronics, Vol. 23, pp: 513-514, 1980.....	48
[54] D. K. Schroder, J. D. Whitfield, and C. J. Varker, « recombination lifetime using the pulsed MOS capacitor », IEEE Transactions on electron devices, Vol. ED-31, No. 4, pp: 462-467, April 1984.....	48
[55] C. M. Colomb, S. A. Stockman, and G. E. Stillman, « minority carrier transport in carbon doped gallium arsenide », Appl. Phys. Lett. Vol 60, No. 1, pp: 65-67, 6 January 1992.....	48
[59] M. P. Deshmukh, R. A. Kumar, and J. Nagaraju, « measurement of solar cell ac parameters using the time domain technique », Review of Scientific Instruments, Vol. 75, No. 8, pp : 2732-2735, August 2004.	49
[60] Engin Arslan, Yasemin Safak, Semsettin Altındal, Özgür Kelekçi, Ekmel Özbay, « Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaIn/AlN/GaN heterostructures », Journal of Non-Crystalline Solids 356, pp : 1006–1011, 2010.....	49
[61] H. Bayhan, A. S. Kavasglu, « admittance and impedance spectroscopy on Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells », Turk. J. Phys., 27, pp: 529-535, 2003.	49
[62] J. H. Scofield, « effets of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements », Solar Energy Materials and Solar Cells, 37 (2), pp: 217-233, May 1995.....	49
[63] R. A. Kumar, M. S. Suresh, and J. Nagaraju, « measurement of AC parameters of Gallium Arsenide (GaAs /Ge) solar cell by impedance spectroscopy », IEEE Transactions on electron devices, Vol. 48, No. 9, pp: 2177-2179, September 2001.....	49
[64] Gokhan Sahin, Moustapha Dieng, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Moussa Ibra Ngom, Amary Thiam, Grégoire Sissoko, « Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination », Journal of Applied Mathematics and Physics, 3, pp :1536-1543, 2015.	49
[67] J. Lauwaert, K. Decock, S. Khelifi, M. Burgelman, “A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy”, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.94, pp: 966–970, 2010.....	49
[69] S. Kumar, P.K. Singh, G.S. Chilana, “Study of silicon solar cell at different intensities of illumination and wavelengths using impedance spectroscopy”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 93, pp: 1881–1884, 2009.....	49
Chapitre II : Influence de la température sur la capacité de la photopile sous éclairnement monochromatique.....	li
II.1. Introduction.....	li
Taux de génération en fonction de la profondeur.....	liii
II.1a Effet de la température sur la longueur de diffusion, le coefficient de diffusion, sur la mobilité des porteurs et sur le coefficient de mobilité.....	54
II.1b Effet de la longueur d’onde sur le coefficient d’absorption et la profondeur de pénétration des porteurs.....	58
II.2 Densité des porteurs minoritaires de charge.....	58
II.2.1 Effet de la température sur la densité des porteurs minoritaires de charge.....	58

Table des matières

II.2.2 Effet de la longueur d'onde sur la densité des porteurs minoritaires de charge	61
II.2.3 Effet du point de fonctionnement sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge	63
II.2.4 Effet de la température sur le point de fonctionnement de la photopile	65
a. Circuit ouvert	65
a. Court-circuit	67
II.2.5 Effet de la longueur d'onde sur le point de fonctionnement de la photopile	70
a. Circuit ouvert	70
b. Court-circuit	75
II.2.6 Effet de la longueur d'onde sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge	79
II.3 Densité de photocourant	80
II.3.1 Effet de la température sur la densité de photocourant	80
II.3.2 Effet de la longueur d'onde sur la densité de photocourant.....	81
II.3.3 Vitesse de recombinaison à la face arrière.....	82
II.4 Phototension	85
II.4.1 Effet de la température sur la phototension	86
II.4.2 Effet de la longueur d'onde sur la phototension	87
II.5 Détermination expérimentale des photocourant de court-circuit J_{phcc} et phototension de circuit ouvert V_{phco}	87
II.6 Capacité	90
II.6.1 Effet de la température sur la capacité	91
II.6.2 Effet de la longueur d'onde sur la Capacité.....	93
II.6.3 Influence de la température sur la Capacité de la photopile en fonctionnement de court-circuit.....	99
II.7. Conclusion	108
II.8 Références.....	109
Chapitre III : Influence de la température sur la capacité de la photopile sous éclairement polychromatique.....	113
III.1 Introduction	113
III.2 Densité des porteurs minoritaires de charge.....	116
III.2.1 Effet de la température sur la densité des porteurs minoritaires de charge	116
III.2.2. Effet du point de fonctionnement sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge.	118
III.2.3 Effet de la température sur le point de fonctionnement de la photopile	121
a. Circuit ouvert.....	121
b. Court-circuit	123

Table des matières

III.3. Densité de photocourant.....	126
III.3.1 Effet de la température sur la densité de photocourant.....	126
III.3.2 Vitesse de recombinaison à l'arrière de la photopile.....	128
III.4. Phototension.....	129
III.4.1. Effet de la température sur la phototension.....	130
III.5 Détermination expérimentale des photocourant de court-circuit J_{phcc} et phototension de circuit ouvert V_{phco}	131
III.6. Capacité.....	134
III.6.1 Effet de la température sur la capacité.....	135
III.6.2 Influence de la température sur la Capacité de la photopile en fonctionnement de court circuit.....	139
III.7. Conclusion.....	144
III.8. Références.....	145
Chapitre IV : Influence de la température sur les résistances parasites shunt et série d'une photopile monofaciale au silicium sous éclairage monochromatique.....	149
IV.1 Introduction.....	149
IV.2 Caractéristique I-V.....	152
IV.2.1 Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	152
IV.2.2 Effet de la longueur d'onde sur la caractéristique I-V.....	153
IV.3 Résistance shunt.....	154
IV.3.1 Effet de la température sur la résistance shunt.....	155
IV.3.2. Effet de la longueur d'onde sur la résistance shunt.....	157
IV.4. Résistance série.....	159
IV.4.1. Effet de la température sur la résistance série.....	160
IV.4.2 Effet de la longueur sur la résistance série.....	161
IV.5. Détermination expérimentale des résistances shunt et série.....	164
IV.6. Conclusion.....	167
IV.6. Référence	168
Chapitre V : Influence de la température sur les résistances parasites shunt et série d'une photopile monofaciale au silicium sous éclairage polychromatique.....	172
V.1. Introduction.....	172
Densité de photocourant.....	174
Phototension.....	174
V.2. Caractéristique I-V.....	175
V.2.1. Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	175
V.3. Résistance shunt.....	176

Table des matières

V.3.1. Effet de la température sur la résistance shunt	177
Nous allons à présent faire l'étude sur la résistance série.	179
V.4. Résistance série	179
V.4.1 Effet de la température sur la résistance série	180
V.5. Détermination expérimentale des résistances shunt et série.....	182
V.6 Conclusion.....	185
V.7 Références	187
VI. Conclusion générale et perspectives	191
VII. Annexe mathématiques.....	197
PUBLICATIONS	203
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR.....	

Liste des figures

Figure 1: Structure d'une photopile de type n ⁺ -p-p ⁺	lii
Figure 2: Taux de génération des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour de faibles longueurs d'onde.....	54
Figure 3: Taux de génération des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour de grandes longueurs d'onde.....	54
Figure 4: Coefficient de mobilité en fonction de la température.....	54
Figure 5: Coefficient de mobilité en fonction de la température.....	55
Figure 6: Coefficient de diffusion en fonction du coefficient de mobilité.....	56
Figure 7: Coefficient de diffusion en fonction de la température.....	57
Figure 8: Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration en fonction de la longueur.....	58
Figure 9: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=2.10^2$ cm/s, $\lambda = 0,68$ μ m, photopile en circuit ouvert.	
Figure 10: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=2.10^2$ cm/s, $\lambda = 0,98$ μ m, photopile en circuit ouvert.....	59
Figure 11: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=6.10^6$ cm/s, $\lambda= 0,68$ μ m, photopile en court-circuit.	Figure
Figure 12: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=6.10^6$ cm/s, $\lambda= 0,98$ μ m, photopile en court-circuit.....	60
Figure 13: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f= 10$ cm/s (circuit ouvert) T = 330 K.	
Figure 14: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f = 10$ cm/s (circuit ouvert) T = 330 K.....	61
Figure 15: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f= 6.10^6$ cm/s (court-circuit) T = 330 K.....	62
Figure 16: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f = 6.10^6$ cm/s (court-circuit) T = 330 K.....	62
Figure 17: : Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison et pour de faible valeur de la longueur d'onde ($\lambda= 0,68$ μ m) T = 330 K.....	63
.Figure 18: Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison et pour de grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda= 0,98$ μ m), T = 330 K.....	63
Figure 19: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert et en court-circuit en fonction de la profondeur ($\lambda= 0,98$ μ m), T = 330K.....	64
Figure 20: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda= 0,98$ μ m), T = 330 K..	65
Figure 21: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda= 0,98$ μ m), T = 340 K.	65
Figure 22: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda= 0,98$ μ m), T = 350 K.	66
Figure 23: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda= 0,98$ μ m), T = 360 K.	66
Figure 24: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en circuit ouvert en fonction de la température $\lambda= 0,98$ μ m.....	67

Liste des figures

Figure 25: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T = 330\text{K}$	68
Figure 26: : Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$). $T = 340\text{K}$	68
Figure 27: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$). $T = 350 \text{K}$	68
Figure 28: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$). $T = 360 \text{K}$	68
Figure 29: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en court-circuit en fonction de la température $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$	69
Figure 30 : Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330\text{K}$	70
Figure 31: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330\text{K}$	70
Figure 32: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330\text{K}$	71
Figure 33: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330\text{K}$	71
Figure 34: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en circuit ouvert en fonction des faibles valeurs de la longueur d'onde $T = 330 \text{K}$	72
Figure 35: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	73
Figure 36: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	73
Figure 37: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	73
Figure 38: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	73
Figure 39: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en circuit ouvert en fonction des grandes valeurs de la longueur. $T = 330 \text{K}$	74
Figure 40: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	75
Figure 41: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	75
Figure 42: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	75
Figure 43: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	75
Figure 44: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en court-circuit en fonction des faibles longueurs d'onde. $T = 330 \text{K}$	76
Figure 45: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330\text{K}$	77
Figure 46: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{K}$	77
Figure 47: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330\text{K}$	77
Figure 48: Densité relative des	

Liste des figures

porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330 \text{ K}$	77
Figure 49: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en court-circuit en fonction des grandes longueurs d'onde. $T = 330\text{K}$	78
Figure 50: Densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur de la photopile en circuit ouvert pour une faible et une grande valeur de la longueur d'onde ($S_f=10\text{cm/s}$, $T=330\text{K}$).	79
Figure 51: Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la photopile en court-circuit ($S_f = 6.10^6 \text{ cm/s}$) pour une faible et grande longueur d'onde. $T = 330\text{K}$	80
Figure 52: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).	81
Figure 53: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$).	82
Figure 54: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$).	82
Figure 55: vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température pour de faibles longueurs d'onde.	
Figure 56: vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température pour de grandes longueurs d'onde.....	83
Figure 57: vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures.	85
Figure 58: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).	86
Figure 59: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$).	87
Figure 60: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$).	87
Figure 61: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).	88
Figure 62: : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).	88
Figure 63: Densité de photocourant expérimentale en fonction de la température.	89
Figure 64: Phototension expérimentale en fonction de la température.	90
Figure 65: Capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température. ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).	91
Figure 66: Rendement de la capacité de la photopile en fonction de la température. $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$	93
Figure 67: Capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$).	94
Figure 68: Rendement de la capacité de la photopile en fonction des faibles longueurs d'onde. $T=330 \text{ K}$	95
Figure 69: Capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$).	96
Figure 70: Rendement de la capacité de la photopile en fonction des fortes longueurs d'onde. $T=330\text{K}$	97
Figure 71: : Capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm/s}$) en fonction de la température pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde.	98
Figure 72: Capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm/s}$) en fonction de la température pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde.	98

Liste des figures

Figure 73: Capacité de la photopile en court-circuit ($S_f = 9.10^9$ cm/s) en fonction de la température pour de petites valeurs de la longueur d'onde.	Figure 74: Capacité de la photopile en court-circuit ($S_f = 9.10^9$ cm/s) en fonction de la température pour de grandes valeurs de la longueur d'onde.....	99
Figure 75: Logarithme de la capacité en fonction de la phototension pour différentes de la température ($\lambda = 0,98$ μ m).		100
Figure 76: Capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température ($\lambda = 0,98$ μ m). ...		101
Figure 77: Logarithme de la capacité en fonction de la température ($\lambda = 0,98$ μ m).		102
Figure 78: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en court-circuit($S_f=6.10^6$ cm/s) en fonction du logarithme de la température pour de faibles valeurs de la longueur d'onde.....		103
Figure 79: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en court-circuit($S_f=6.10^6$ cm/s) en fonction du logarithme de la température pour de grandes valeurs de la longueur d'onde.		103
Figure 80: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f= 10$ cm/s) en fonction du logarithme de la température pour de faibles valeurs de la longueur d'onde.....		106
Figure 81: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f= 10$ cm/s) en fonction du logarithme de la température pour de grandes valeurs de la longueur d'onde.....		106
Figure 82: Structure d'une photopile de type n ⁺ -p-p ⁺		114
Figure 83: Taux de génération des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la		116
Figure 84: : Densité des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température. La photopile est en circuit ouvert ($S_f = 10$).		117
Figure 85: Densité des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température. La photopile est en court-circuit($S_f = 6.10^6$ cm/s).		118
Figure 86: Densité relative des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur x pour différentes valeurs de la vitesse recombinaison ($T = 330$ K).		119
Figure 87: Densités relatives des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert et de la photopile en court-circuit en fonction de la profondeur x. $T = 330$ K.		120
Figure 88: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x. $T=330$ K.....		121
Figure 89: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x. $T=340$ K.....		121
Figure 90: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x. $T=350$ K.....		122
Figure 91: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x. $T=360$ K.....		122
Figure 92: Epaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert en fonction de la température.		123
Figure 93: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x. $T=330$ K.....		124
Figure 94: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x. $T=340$ K.....		124
Figure 95: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x. $T=350$ K.....		124
Figure 96: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x. $T=360$ K.....		124
Figure 97: Epaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit en fonction de la température.		125
Figure 98 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.....		126

Liste des figures

Figure 102: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température.....	130
Figure 103: Détermination de J_{phcc} à partir de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.	131
Figure 111: Logarithme de la capacité en fonction de la phototension pour différentes de la température.....	139
Figure 112: Capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température.....	140
Figure 113: Logarithme de la capacité de la photopile en fonction de la température.....	141
Figure 114: Capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm/s}$) en fonction de la température.	142
Figure 115: Capacité de la photopile en court-circuit ($S_f = 6.10^6 \text{ cm/s}$) en fonction de la température.	143
Figure 118: Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde ($T=330\text{K}$). Figure 119: Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde ($T=330\text{K}$).....	153
Figure 121: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,94 \mu\text{m}$).	155
Figure 122: Résistance shunt relative en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,94 \mu\text{m}$).	156
Figure 123: Maximum de la résistance shunt en fonction de la température Figure 124: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$). Figure 125: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde ($T = 330 \text{ K}$).	157 158
Figure 126: Résistance shunt en fonction de la température pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f=9.10^9 \text{ cm/s}$). Figure 127: Résistance shunt en fonction de la température pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f= 9.10^9 \text{ cm/s}$).	159
Figure 128: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en circuit ouvert.....	160
Figure 129: Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,94 \mu\text{m}$).	161
Figure 130: Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la Longueurs d'onde ($T= 330 \text{ K}$). Figure 131: Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la Longueurs d'onde ($T= 330 \text{ K}$).....	162
Figure 132: Résistance série en fonction de la température pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f = 10 \text{ cm/s}$).....	163
Figure 133: Résistance série en fonction de la température pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f= 10 \text{ cm/s}$).....	163
Figure 134: Profil de la résistance shunt expérimentale en fonction de la température.	166
Figure 135: Profil de la résistance série expérimentale en fonction de la température.	167
Figure 136: Structure d'une photopile de type n^+-p-p^+	173
Figure 137: Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température.....	176
Figure 138: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en court-circuit.....	177

Liste des figures

Figure 139: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.....	178
Figure 140: Résistance shunt en fonction de la température.	179
Figure 141: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en circuit ouvert.....	180
Figure 142: Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes (T= 330 K).....	181
Figure 143: Résistance série en fonction de la température.	182
Figure 144: Résistance shunt expérimentale en fonction de la température.	184
Figure 145: Résistance série expérimentale en fonction de la température.....	185

Liste des tableaux

Tableau 1: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert $X_{co\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.	66
Tableau 2: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.	69
Tableau 3: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert $X_{co\lambda}(T)$ avec leurs longueurs d'onde respectives.	71
Tableau 4: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert $X_{co\lambda}(T)$ avec leurs longueurs d'onde correspondantes.	74
Tableau 5: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc\lambda}(T)$ avec leurs faibles longueurs d'onde respectives.	76
Tableau 6: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc\lambda}(T)$ avec leurs grandes longueurs d'onde correspondantes.	78
Tableau 7: valeurs de σ et θ de pour les grandes longueurs d'onde avec la vitesse de recombinaison à la face arrière.	84
Tableau 8: Valeurs de S_{fcc} , S_{fco} , J_{phcc} et V_{phco} expérimentales avec leurs températures respectives	89
Tableau 9: Valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.	92
Tableau 10: Valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.	94
Tableau 11: Valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.	97
Tableau 12: Valeurs de $C_0(T)$ avec leurs températures respectives.	100
Tableau 13: Valeurs de \mathcal{X}_λ et de \mathcal{Y}_λ en fonction de la température pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde de la photopile en court-circuit.	104
Tableau 14: Valeurs de \mathcal{X}_λ et de \mathcal{Y}_λ en fonction de la température pour différentes valeurs de la longueur d'onde de la photopile en court-circuit.	104
Tableau 15: Valeurs de \mathcal{X}_λ et de \mathcal{Y}_λ en fonction de la température pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde de la photopile en circuit ouvert.	106
Tableau 16: : Valeurs de \mathcal{X}_λ et de \mathcal{Y}_λ en fonction de la température pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde de la photopile en circuit ouvert.	107
Tableau 17: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc}(T)$ avec leurs températures respectives.	122
Tableau 18: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc}(T)$ avec leurs températures respectives.	125
Tableau 19: Valeurs de S_{fcc} , S_{fco} , J_{phcc} et V_{phco} expérimentales avec leurs températures	132
Tableau 20: Valeurs de $C_{co}(T)$ et $C_{cc}(T)$ avec leurs températures respectives.	136
Tableau 21: Valeurs de $C_0(T)$ avec leurs températures respectives.	140
Tableau 22: Valeurs de χ et de γ en fonction de la température de la photopile en circuit ouvert. ...	143
Tableau 23: Valeurs de χ et de γ en fonction de la température de la photopile en court-circuit.	144
Tableau 24: Valeurs du maximum de la résistance shunt avec leurs températures respectives	156
Tableau 25: Valeurs de β et de ξ pour les faibles longueurs d'onde	164

Liste des tableaux

Tableau 26: Valeurs de β et de ξ pour les grandes longueurs d'onde	164
Tableau 27: Valeurs de S_{fcc} , S_{fco} , R_{sh} et R_s expérimentales avec leurs températures respectives.	165
Tableau 28: Valeurs de S_{fcc} , S_{fco} , R_{sh} et R_s expérimentales avec leurs températures respectives.	184

Nomenclature

C	Capacité	($\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$)
Q	Charge élémentaire de l'électron	(C)
D	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base	(cm^2/s)
k_b	Constante de Boltzmann	(J/K)
$\alpha(\lambda)$	Coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ	(cm^{-1})
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion à la longueur d'onde λ	
λ	Longueur d'onde	(μm)
$\delta(x)$	Densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base	(cm^{-3})
J_{ph}	Densité de photocourant	($\text{A}\cdot\text{cm}^{-3}$)
τ	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires de charge	
$n_i(T)$	Concentration intrinsèque des porteurs	(cm^{-3})
X	Épaisseur dans la base de la photopile	(cm)
L	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge	(cm)
R_s	Résistance série	($\Omega\cdot\text{cm}^2$)
R_{sh}	Résistance shunt	($\Omega\cdot\text{cm}^2$)
V_{ph}	Phototension	(V)
V_T	Tension thermique	(V)
N_b	Taux de dopage des impuretés dans la base	(cm^{-3})
$g(x)$	Taux de génération en fonction de l'épaisseur x	(cm^{-3}/s)
Sf	Vitesse de recombinaison à la jonction	(cm/s)
Sb	Vitesse de recombinaison à la face arrière	(cm/s)

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des ressources d'énergie alternatives à haut rendement et à faible émission est devenu une grande importance à l'augmentation des préoccupations au sujet du déficit des combustibles fossiles, les prix élevés du pétrole, le réchauffement climatique, et les dommages à l'environnement et de l'écosystème [1]. Dans ce souci, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, renouvelable, de l'énergie avec une longue durée de vie et une grande fiabilité [2]. Un système photovoltaïque convertit la lumière en électricité, où l'appareil de base d'un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. C'est ainsi qu'en 1955, des chercheurs comme Bell, dans les laboratoires, ont mis au point des cellules solaires dont le rendement de conversion atteint les 6% [3]. . Après, la croissance des techniques de fabrication [4] des semi-conducteurs (redresseurs, transistors, et thyristors etc...), a permis de perfectionner la qualité des matériaux utilisés et la structure des photopiles. Des premières monofaciales (monocristallin, polycristallin, multicristallin et nanocristallin) où le rendement énergétique est faible, on assiste à la mise au point de nouvelles photopiles bifaciales [5,6] (monochromatique, polycristallin, et multicristallin) dont le rendement de conversion (le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie rayonnée incidence) est supérieur ou égal à 20% [7]. Dans la réalisation de ces photopiles, la technologie de confection et la carence des paramètres de réseau produits, entraînent une existence des centres de recombinaisons des porteurs de charges photogénérées. Au sein de ces recombinaisons des porteurs de charges qui sont pour la plus les causes majeures des faibles rendements constatées des photopiles, on peut mentionner : les recombinaisons en volume de Shockley-Real-Hall [3,8], les recombinaisons d'Auger, radiatives et surfacique [8,9]. Ces derniers, influent sur les paramètres fondamentaux des photopiles comme les vitesses de recombinaison aux interfaces et à la face arrière. Les cellules sont groupées pour former des panneaux ou modules [10]. La modélisation et la simulation des systèmes photovoltaïques (PV) ont fait une grande transition et forment une partie importante de la production d'électricité dans le siècle présent. De nombreux chercheurs ont utilisé l'approche à base de circuit pour caractériser le module PV, dont le modèle le plus simple est la source de courant en parallèle à une diode [11,12]. Afin d'examiner les principaux paramètres, divers manières de caractérisation des cellules solaires en régime statique ou dynamique, avec des mesures des effets optiques [13] ou électrique [14] mis en place, pour mieux les rentabiliser.

Dans ce document, le travail portera sur l'influence de la température sur les paramètres électriques à savoir la capacité, les résistances shunt et série d'une photopile au silicium sous l'éclairement monochromatique ou polychromatique en régime statique.

Ce travail sera essentielle constitué de cinq parties ou chapitres :

Le **premier chapitre** qui portera sur l'étude bibliographique. Cette étude bibliographique se fera sous trois régimes : statique, dynamique fréquentiel et transitoire.

Le **second chapitre** sera consacré à l'étude théorique de l'influence de la température sur la capacité d'une photopile au silicium respectivement sous éclairage monochromatique en régime statique.

Le **troisième chapitre** sera destiné à l'étude théorique de l'influence de la température sur la capacité d'une photopile au silicium respectivement sous éclairage polychromatique en régime statique.

Le **quatrième chapitre** fera l'objet d'une étude théorique de l'influence de la température sur les résistances shunt et série d'une photopile au silicium sous éclairage monochromatique en régime statique.

Dans le **cinquième et dernier chapitre**, mettrons l'accent sur l'étude théorique de l'influence de la température sur les résistances shunt et série d'une photopile au silicium polychromatique en régime statique.

Références

- [1] S. Samer, M. Ahmed, B. Mohieddine, A. Shehab, “A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox”, *Journal of Energy and Power Engineering*, 6, pp:1965-975, 2012.
- [2] W. A. El-basit, A. M. A. El-maksood and F. A. E. S. Soliman, «Mathematical Model for Photovoltaic Cells », *Issue 23*, pp:13-28, July-December 2013.
- [3] A. Ricaud, ‘Photopiles Solaires: De la physique de la Conversion Photovoltaïque aux Filières, Matériaux et Procédés’, *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, pp : 332, 1997.

- [4] R. Lago-Aurrekoetxea, C. Del Canizo, I. Pou, A. Luque, "Fabrication Process for Thin Silicon Solar Cells" Proc. 11th European PVSEC, 2, pp: 1519-1522, Munich 22-26 October 2001.
- [5] S. Bau, T. Kieliba, D. Oßwald, A. Hurre, "Chemical Vapour Deposition of Silicon on Ceramic Substrates for Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells", Proc. 11th European PVSEC, 2, pp: 1575-1577, Munich 22-26 October 2001.
- [6] A. Schneider, C. Gerhards, F. Huster, W. Neu, M. Spiegel, P. Fath, E. Bucher, R. J. S. Young, A. G. Prince, J. A. Raby, A. F. Carroll, "Al BSF for Thin Screenprinted Multicrystalline Si Solar Cells", Proc. 17th European PVSEC, 1, pp:1575 -1577 Munich 22-26 October 2001.
- [7] A.W. Blakers, J. Zhao, A. Wang, A.M. Milne, X. Dai and M.A. Green, '23% Efficient Silicon Solar Cell', Proceedings of the 9th European Communities Photovoltaic Solar Energy Conference, Freiburg, Germany, September, pp. 328 – 329, 1989.
- [8] H. J. Möller, "Semiconductors for solar cells", Artech house, 29, pp: 343, 1993.
- [9] B. EQUER, "Energie Solaire Photovoltaïque", Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, 1, pp : 238, Ellipses, Unesco, 1993
- [10] K. J. Surya, B. Ch. Sai, "Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment", Intr. Jour. of Electrical and Computer Eng. (IJECE) 2(1), pp: 26-34, 2012.
- [11] M. S. El-Negamy, M. B. Eteiba, G. M. El-Bayoumi, "Modeling and Simulation of Egyptsat-1 Satellite System Powered by Photovoltaic Module", Journal of American Science, 9(1), pp: 110-116, 2013.
- [12] M. Amita, K. Md. Ashfaq, S. Mukta, "Development and Simulation of Solar Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink", International Journal on Emerging Technologies, 4(1), pp: 62-65, 2013.
- [13] B. Mazhari and H. Morkoç, "Surface recombination in GaAs PN junction diode J. Appl. Phys.", 73(11), pp: 7509-7514, 1993.
- [14] H. El Ghitani and S. Martinuzzi, "Influence of dislocation on electrical properties of large grained polycrystalline silicon cells", J. Appl. Phys. 66(4), pp : 1717-1726, 1989.

Chapitre I : Etude bibliographique

Ce chapitre qui est une étude bibliographique des publications internationales (articles) considérées dans ce mémoire de thèse. Autrement dit nous allons faire l'état des lieux de ces articles. Cette étude bibliographique met l'accent sur les paramètres électriques tels que : la capacité et les résistances shunt et série. Cette étude bibliographique sera divisée en trois régimes à savoir : le régime statique suivi du régime dynamique transitoire puis le régime dynamique fréquentiel.

Commençons par le régime statique

REGIME STATIQUE

Capacitance voltage characterisation of poly si-sio2-si structures[1]

Dans cet article, les auteurs ont étudiés la caractéristique C-V en haute fréquence des condensateurs poly Si-SiO₂-Si. Une extension des caractéristiques C-V haute fréquence connus des condensateurs MIS (Métal-Isolant-Semiconducteur) aux structures S^PIS a été faite.

Ces auteurs ont démontré que la caractéristique C-V du condensateur poly SiO₂-Si est nettement différente de celle du métal SiO₂-Si à cause de la pénétration du champ dans la couche de Si poly.

Ils ont considéré une structure poly Si-SiO₂-Si (S^PIS), de substrat et poly Si tous deux de dopage p. D'après les remarques de neutralité, ils ont déduit qu'au cas où la charge induite par unité de surface à l'interface SiO₂-Si Q_s , est négative, alors Q_s^p , est positive et vice versa. De sorte que l'équation (I₁) demeure;

$$|Q_s| = |Q_s^p| \quad (I_1)$$

Par conséquent, quand la surface de poly Si est accumulée, la région de charge d'espace en Si est dépossédée et vice versa.

Ils ont aussi montré qu'en l'absence de toute différence de fonction de travail, la tension appliquée V_i apparaît en partie à travers l'isolant, en partie à travers le Si. ψ_s et en partie à travers le poly Si, ψ_s^p . Ainsi

$$V = V_i + \psi_s + \psi_s^p \quad (I_2)$$

Ils ont montré dans la même lancée que la capacité total C_T de la structure S^PIS peut être calculée à partir de la combinaison série de la capacité de charge d'espace C_D du Si [2], la capacité de charge d'espace C_D^p du poly Si (supposé avoir la même dépendance fonctionnelle C_D) et la capacité de l'isolant C_i . L'expression de C_T est présentée par l'équation I₃

$$C_T = \frac{C_i C_D C_D^p}{C_i C_D + C_D C_D^p + C_i C_D^p} \quad (I_3)$$

Les auteurs ont aussi montré que dans le cas limite $V_G \gg 0$ l'électrode du poly Si est fortement

accumulée et peut être considérée comme une électrode métallique. Ainsi C_T peut être calculée pour la structure MIS. Une nouvelle expression de C_T autre que celle de l'équation I3, est donnée par l'équation I4

$$C_T = \frac{\varepsilon_0 K_i}{X_i + \left(\frac{K_i}{K_j}\right) W_m} \quad (I4)$$

Où W_m est la largeur maximale de déplétion du Si et est donnée par;

$$W_m = \left(\frac{4K_i \varepsilon_0 kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}{q^2 N_A} \right)^{1/2} \quad (I5)$$

Graphic method of substrate doping determination from c-v characteristics of mis capacitors [3]

Dans ce présent article, les auteurs ont développé une méthode graphique simple qui détermine le potentiel (substrat de dopage) de Fermi de la haute fréquence C-V caractéristique du condensateur MIS. Cette méthode est d'application générale et peut être utilisé pour l'étude d'un système diélectrique à semi-conducteur à différentes températures ambiantes.

Ces auteurs ont développé une nouvelle méthode graphique de détermination de N_B basée sur les valeurs obtenues expérimentalement de C_{\min} et C_{\max} . Ils ont démontré qu'il ya la possibilité de développer un seul graphe d'une manière telle que N_B peut être déterminée pour pratiquement tout système isolant-semiconducteur dans la structure MIS. En outre, le procédé est valable pour une large gamme de températures ambiantes.

Ils ont établi une relation regroupant ; C_{\min} la capacité à haute fréquence en forte inversion, C_{\max} la capacité à forte accumulation, C_i la capacité de l'isolant, $X_{d\max}$ la largeur de la région d'appauvrissement de surface à la forte inversion, X_i l'épaisseur de l'isolant et ε_i la constante de l'isolant diélectrique. Cette relation est donnée par l'équation I6.

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{C_{\min}}{C_i} = \left(1 + \frac{\varepsilon_i X_{d\max}}{\varepsilon_s X_i} \right)^{-1} \quad (I6)$$

Où l'expression de $X_{d\max}$ est donnée par l'équation I7

$$X_{d\max} \square \sqrt{\left(\frac{4\varepsilon_s}{qN_B} |\phi_F| \right)} \quad (I7)$$

Ils ont défini les termes ε_s , N_B et $|\phi_F|$ respectivement par : la constante diélectrique semi-conducteur, la concentration d'impuretés ionisées dans le semi-conducteur et le potentiel de Fermi. Ils ont fourni l'expression du potentiel de Fermi. Expression donné par l'équation I8

$$|\phi_F| = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_B}{n_i}\right) \quad (I_8)$$

Avec k, q, n_i qui sont respectivement la constante de Boltzmann, la charge élémentaire et la concentration intrinsèque des porteurs.

Toujours dans la même continuité, ces auteurs ont donné une autre relation qui regroupe presque les mêmes termes que l'équation I₆. Cette relation est présentée par l'équation I₉

$$\begin{aligned} R &= \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\min}} = \frac{\varepsilon_i X_{d\max}}{\varepsilon_s X_i} \\ &= \frac{2\varepsilon_i}{X_i} \sqrt{\left(\frac{kT}{\varepsilon_i n_i q^2}\right)} \sqrt{\left(\frac{|u_F|}{e|u_F|}\right)} = \beta \sqrt{\left(\frac{|u_F|}{e|u_F|}\right)} \end{aligned} \quad (I_9)$$

Où β est un coefficient du matériau, T la température ambiante.

Avec,

$$u_F = \frac{q}{kT} \phi_F \quad (I_{10})$$

Ces auteurs ont proposé une autre expression de $X_{d\max}$ autre que celle de l'équation I₇. Cette expression est donnée par l'équation I₁₁

$$X_{d\max} = L_D \frac{2F_s - G_s}{\exp|u_F|} \quad (I_{12})$$

L'équation I₁₂ a été établie grâce aux fonctions de Kingston F_s et G_s [4].

Avec L_D la longueur de Debye dans le semiconducteur intrinsèque. Son expression est définie par l'équation I₁₃

$$L_D = \sqrt{\left(\frac{kT\varepsilon_s}{2q^2 n_i}\right)} \quad (I_{13})$$

Forward-voltage capacitance of heterojunction space-charge regions [5]

Un traitement analytique présenté pour la modélisation de la capacité de la zone de charges d'espace d'hétérojonction sous des tensions à terme a été présenté par les auteurs de cet article. Cherchant à améliorer le modèle d'appauvrissement, ils se sont concentrés sur les effets capacitifs de la région de charge d'espace. Ils ont présenté un modèle de capacité analytique pour hétérojonctions brusques sous tensions à terme. Ils ont examiné le modèle d'épuisement classique en premier lieu. L'insuffisance de l'utilisation d'un tel modèle à des tensions à terme a été soulevé. Avant le développement d'un modèle de capacité, les auteurs ont orienté ce travail sur l'étude des propriétés physiques de la zone de charge d'espace. Dans cette même continuité de revoir le modèle d'épuisement, et de développer un plus précis, mais encore compact ; modèle pour l'épaisseur et la barrière de potentiel de la zone de charges d'espace de l'hétérojonction. Cependant les auteurs ont montré que le modèle rencontre des difficultés à de très grandes tensions directes, et un traitement qualitatif y est employé. Ils ont montré que la comparaison du modèle de capacité présente des dépendances mesurées et ont inclu des modèles de capacité existant.

Les autres ont défini les expressions de la capacité de la zone de charge d'espace pour : une homojonction et une hétérojonction.

(i) L'expression de la capacité C de la zone de charge d'espace pour une homojonction est exprimée par l'équation I₁₄ [6-7].

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| = \frac{\varepsilon}{X_1 + X_2} + e \int_{-X_1}^{X_2} \left(\frac{\partial n(\text{or } \partial p)}{\partial V} \right) dx = C_D + C_F \quad (\text{I}_{14})$$

Où Q est la charge des porteurs libres et V est la séparation des potentiels quasi-fermis dans la zone de charge d'espace. Dans l'équation (I₁₄), C_D représente la capacité qui résulte de la variation des porteurs de charges libres au niveau des bords de la zone de charge d'espace et C_F représente la variation des porteurs de charges libres dans le volume de la zone de charge d'espace.

Les auteurs ont montré que dans les conditions de polarité en inverse, n et $p \approx 0$, l'équation I₁₄ se réduit à $C_D = \varepsilon / (X_1 + X_2)$, lequel est la convention du modèle de la capacité de déplétion.

(ii) L'expression de la capacité C de la zone de charge d'espace pour une hétérojonction est exprimée par l'équation I₁₅

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{X_1 + X_2} + e \int_{-X_1}^{X_2} \left(\frac{\partial n(\text{or } \partial p)}{\partial V} \right) dx = C_D + C_F \quad (\text{I}_{15})$$

Encore une fois les auteurs ont montré que dans des conditions de polarisation inverse, l'équation I₁₅ se réduit à $C_D = C(\text{depletion})$ $C = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / (\varepsilon_2 X_1 + \varepsilon_1 X_2)$ [8]

Using Gauss's law in determining the width emitter extension region of the solar cell operating in Open Circuit Condition [9]

Dans cet article, les auteurs ont utilisé la loi de Gauss pour déterminer la largeur d'extension de la zone de charge d'espace de l'émetteur de la photopile en circuit ouvert. Ils ont appliqué cette loi gaussienne au niveau de la jonction émetteur-base de la photopile qui est considérée comme un condensateur plan avec deux armatures planes identiques.

Les auteurs ont calculé la largeur d'extension de la zone de charge d'espace de l'émetteur (Z_E) lorsque la photopile est en état d'équilibre et en fonctionnement de circuit ouvert. Ce calcul a été fait en tenant compte de la largeur d'extension de la zone de charge d'espace de la base (Z_B). Les auteurs ont aussi étudié les effets : de la taille des grains (g), de la vitesse de recombinaison au joint de grain (S_{gb}) et de la densité de dopage sur Z_E .

Ils ont schématisé deux photopiles fonctionnant en circuit ouvert : l'une idéale (figure I₁) et l'autre non idéale (figure I₂).

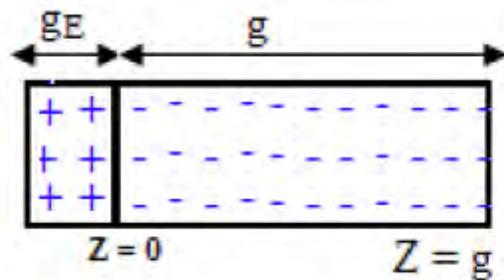


Figure I₁ : Photopile idéale fonctionnant en circuit ouvert.

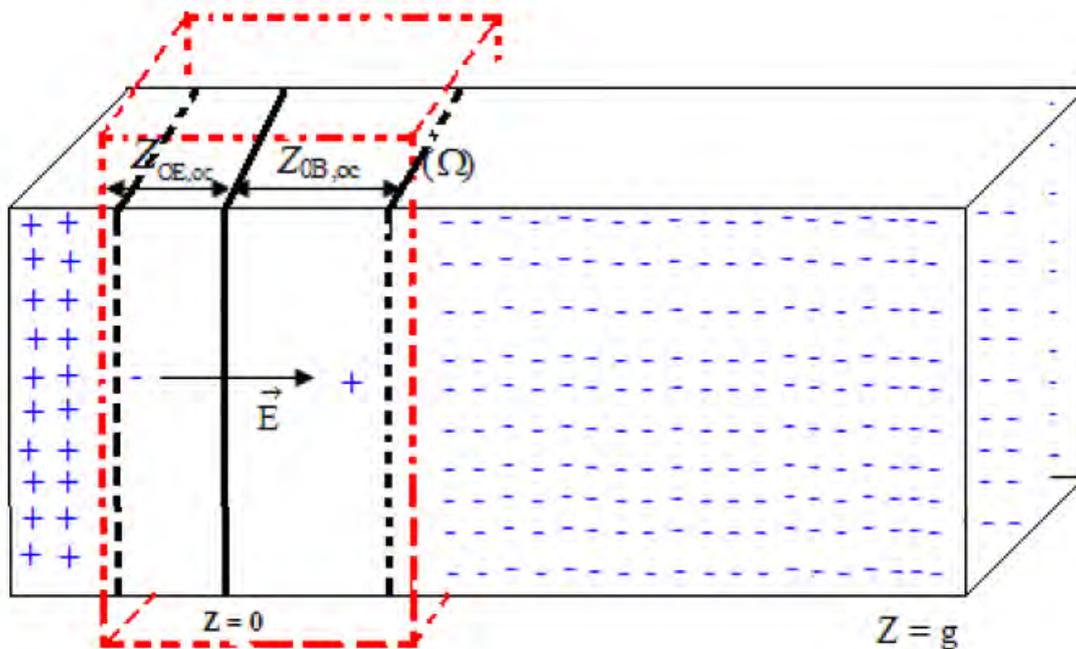


Figure I₂ : Photopile non idéal fonctionnant en circuit ouvert

Les charges positives et négatives indiquent la nature du dopage.

Ils ont dans ce travail exposé la loi de Gauss. Cette loi est donnée par l'équation I₁₆

$$\oint_{(\Omega)} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon} \quad (I_{16})$$

Les auteurs n'ont pas tenu compte du champ électrique \vec{E} dans l'émetteur et dans la base avec l'utilisation de l'hypothèse de Quai-neutralité de la base (QNB).

Ω est la surface de Gauss, Q est la charge globale contenue dans Ω et $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, ε_0 est la constante diélectrique du semi-conducteur.

Comme les auteurs n'ont pas tenu compte de \vec{E} dans l'émetteur et dans la base, ils ont réécrit l'équation (I₁₆) comme suit:

$$0 = \frac{(e \cdot N_{emitter} \cdot Z_E - e \cdot N_{Base} \cdot Z_B) \cdot S}{\varepsilon} \quad (I_{17})$$

est la surface des armatures planes identiques;

$N_{emitter}$ est la densité de dopage de l'émetteur. Ces valeurs sont de l'ordre de 10^{17} à 10^{19} cm^{-3} [10]; N_{base} est la densité de dopage de la base et le dopage est de l'ordre de 10^{15} à 10^{17} cm^{-3} [10];

Ces auteurs ont aussi considéré la capacité de diffusion comme des armatures planes dont la surface S a pour valeur 1 cm^2 .

Compte tenu de l'équation (I₁₇), ils ont conclu:

$$Z_E = \frac{N_{Base}}{N_{emitter}} Z_B \quad (I_{18})$$

A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition [11]

Les auteurs ont présenté dans cet article le comportement de la zone de charge d'espace d'une photopile de type $n^+ - p - p^+$ d'une photopile bifaciale sous illumination monochromatique. Dans cette étude à 3 D, les auteurs à l'aide des relations mathématiques ont permis la description et l'utilisation de la nouvelle approche qui associe à la fois la jonction et à l'arrière des vitesses de recombinaison de surface. Pour les différentes modes de fonctionnement de la photopile et pour divers paramètres comme ; la taille des grains g , la vitesse de recombinaison aux joints de grains S_{gb} , la longueur d'onde λ , les auteurs ont étudié la largeur de la zone de charges d'espace ($Z_{0,u}$). Cette étude est faite sur la base de la densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur dans la base.

Ils ont schématisé: la photopile à trois dimensions composée de grains (figure I₃), une photopile bifaciale à une dimension (figure I₄) et un échantillon de grain à trois dimension (figure I₅)

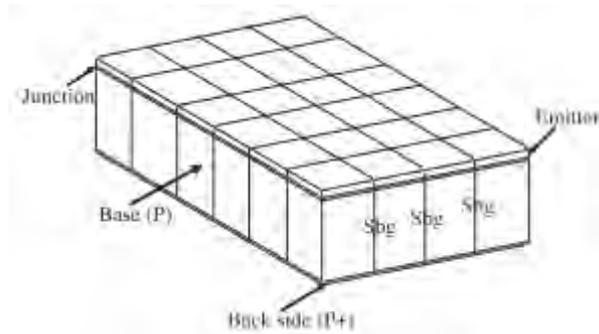


Figure I3 : Fibrously oriented columnar grain

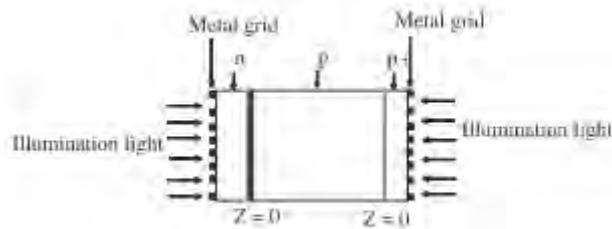


Figure I4 : Bifacial solar cell

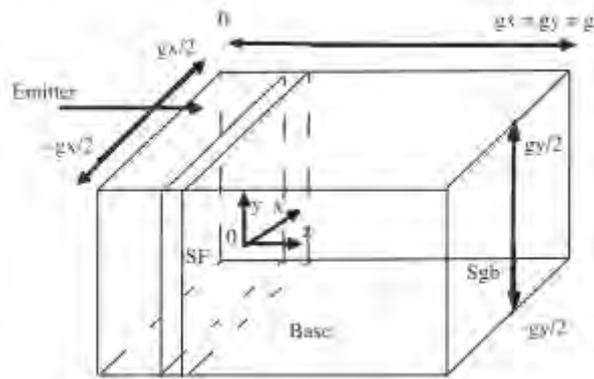


Figure I5 : Schematic of an isolated grain

Ils ont introduit la capacité de diffusion. La capacité de diffusion C_u [12, 13,14], qui provient du déplacement des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile. L'expression de la capacité de diffusion est donnée par l'équation I19.

$$C_u(z, g, S_{gb}, S_{Fu}, S_{bu}, \lambda) = \frac{q}{V_T} [\delta_u(z, g, S_{gb}, S_{Fu}, S_{bu}, \lambda) + m_0] \quad (I19)$$

Les auteurs à l'aide de la densité relative des porteurs de charge en excès dans la base en fonction de la profondeur dans la base pour une taille de grain, ont déterminé la tension constante $V_{u,co}(z_{0,u,co}, g, S_{gb}, S_{Fu}, S_{bu}, \lambda)$ à $z = z_{0,u,co}$ lorsque la photopile est en circuit ouvert.

Avec une telle tension fixe, ces auteurs ont résolu l'équation (I20) pour chaque : taille de grain, longueur d'onde et vitesse de recombinaison aux joints de grains "; puis la largeur d'extension correspondante $Z_{0,u}$ est obtenu lorsque les autres paramètres sont fixe:

$$V_u(z, g, S_{gb}, S_{Fu}, S_{bu}, \lambda) = V_{u,co}(Z_{0,u,co}, g, S_{gb}, S_{f0u}, S_{bu}, \lambda) \quad (I_{20})$$

La capacité de diffusion de la photopile en circuit ouvert est ensuite calculée en utilisant les valeurs de $Z_{0,u,co}$ par la relation [14]

$$C_{0,u} = \frac{\varepsilon S}{Z_{0,u}} \quad (I_{21})$$

Où $S = 1 \text{ cm}^2$ et la constant diélectrique $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r = 12 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$. En fait, $\varepsilon_r = 12$ est la constant relative diélectrique du Semiconducteur et $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$ est la permittivité du vide.

Artificial neural network approach for more accurate solar cell electrical circuit model [15]

Les auteurs ont indiqué que le but fondamental de cet article est d'étudier l'applicabilité du réseau neuronal basé sur le circuit équivalent du modèle PV pour améliorer la précision du modèle et de montrer la nécessité d'inclure la variation de tous les paramètres avec différentes conditions de fonctionnement. En d'autres termes pour améliorer la précision des paramètres électriques du circuit équivalent d'une cellule solaire, les auteurs ont mis en œuvre un réseau de neurones. Ils ont souligné que le rayonnement solaire et de la température influent fondamentalement sur ces paramètres électriques.

Ils ont élaboré plusieurs équations au cours de ce travail.

Les auteurs ont exposé le schéma d'une photopile conventionnelle à une diode. Cette photopile est présentée par la figure I₆.

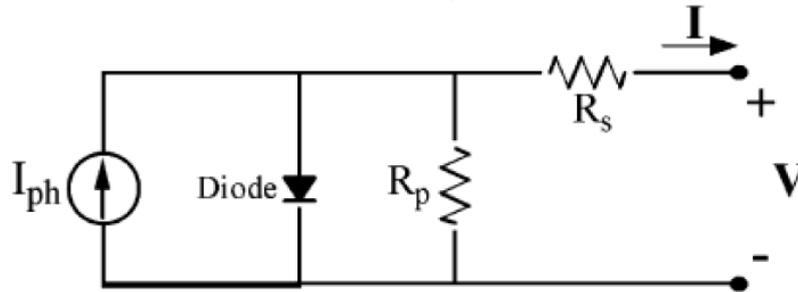


Figure I₆ : Modèle d'un circuit électrique conventionnel d'une photopile à une diode.

Avec ce modèle, les auteurs ont obtenu l'équation I₂₂ caractéristique courant-tension.

$$I = I_{PH} - I_s \left[\exp(q(V + IR_s) / kT_c A) - 1 \right] - (V + IR_s) / R_{SH} \quad (I_{22})$$

Où I_{PH} est un courant provenant de l'éclairement ou photocourant, I_s est le courant de saturation de la cellule sous obscurité, $q (= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})$ la charge électrique, $K (= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$ la constante de Boltzmann, T_c est la température de fonctionnement de la cellule, A est un facteur d'idéalité, R_s et R_{SH} sont respectivement les résistances série et shunt.

Ils ont montré que le photocourant dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule. Cela est exprimé par l'équation I23.

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_I(T_C - T_{REF})] \lambda \quad (I23)$$

Où I_{SC} est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1kW/m^2 , K_I est le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule, T_{REF} est la température de référence de la cellule, et λ est l'insolation en kW/m^2 .

Ils ont aussi indiqué que le courant de saturation de la cellule varie en fonction de la cellule température. Cela est indiqué au niveau de l'équation I24.

$$I_S = I_{RS} (T_C / T_{REF})^3 \exp[qE_G(1/T_{REF} - 1/T_C) / KA] \quad (I24)$$

Où I_{RS} est le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement, E_G est l'énergie de la bande de interdite du semi-conducteur utilisé dans la cellule.

Les auteurs ont indiqué que la résistance shunt R_{SH} est inversement proportionnelle au courant de fuite vers le sol. Et que cette résistance peut être très grande ; cela revient donc à minimiser ou annuler le courant de fuite vers la terre. D'autre part, les auteurs ont aussi souligné l'importance de la résistance série R_S . En d'autres termes l'augmentation de R_S entraîne une diminution considérable de la puissance de PV. Par la suite ils ont établi l'équation I25

$$I = I_{PH} - I_S [\exp(q(V + IR_S) / K T_C A) - 1] \quad (I25)$$

Ils en montrant que pour une cellule solaire photovoltaïque idéale, la résistance série est nulle ($R_S = 0$) et la résistance shunt est infini ils ont établi l'équation I26 [16,17].

$$I = I_{PH} - I_S [\exp(qV / K T_C A) - 1] \quad (I26)$$

Les auteurs ont encore indiqué qu'un générateur photovoltaïque est un groupe de plusieurs générateurs modules photovoltaïques. Sa configuration est telle que ces groupes sont disposé en série-parallèle sur un module pour obtenir suffisamment de puissance. Ils ont exposé l'équation I27 [18,19] exprimant le nombre de modules en séries N_S et le nombre de modules en série-parallèle N_P

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \left[\exp\left(\frac{q\left(\frac{V}{N_S} + \frac{IR_S}{N_P}\right)}{K T_C A}\right) - 1 \right] - \left(\frac{N_P V}{N_S} + IR_S\right) \quad (I27)$$

Ils ont dans la même logique donné un schéma explicatif de la disposition des modules en série et en parallèle. Ce schéma est donné par la figure I7

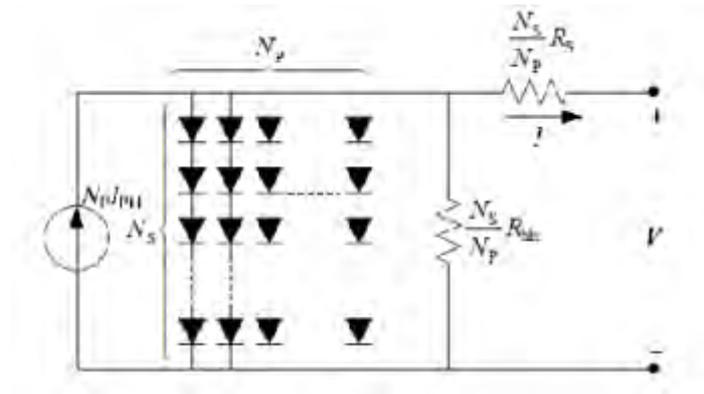


Figure I7 : Modules disposés en série-parallèle

Les auteurs en considérant que $N_S = N_P$ ont réécrit l'équation I27 et ont obtenu

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{N_S K T_C A}\right) - 1 \right] \quad (I28)$$

Ces auteurs pour vérifier la non-linéarité des caractéristiques I-V et P-V, ont utilisé Matlab / Simulink pour illustrer ces caractéristiques. Ils ont avec Matlab/Simulink obtenu quatre figures qui sont :

- (i) Caractéristique de sortie I-V pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

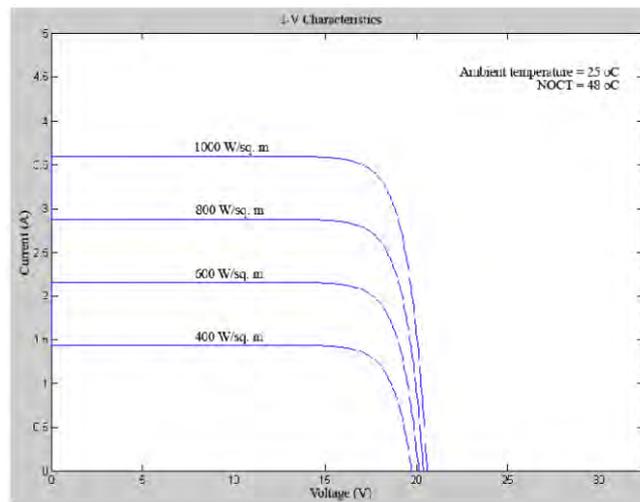


Figure I8 : Caractéristique I-V de sortie pour différentes longueurs d'onde λ

- (ii) Caractéristique de sortie I-V pour différentes valeurs de la température de fonctionnement de la cellule T_C .

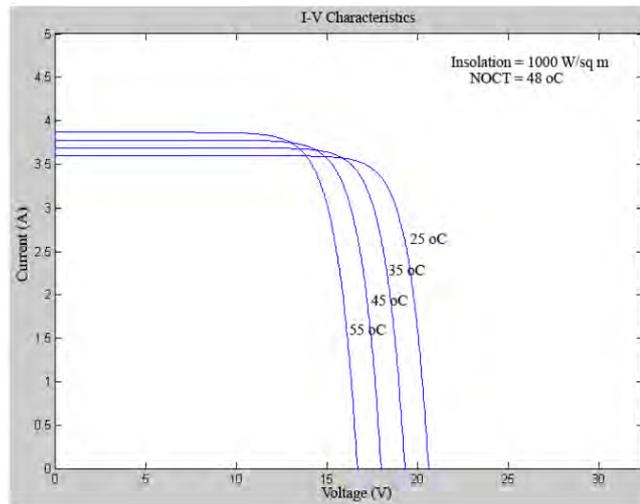


Figure I₉ : Caractéristique I-V de sortie pour différentes T_C

(iii) Caractéristique de sortie P-V pour différentes valeurs de la longueur d'onde λ .

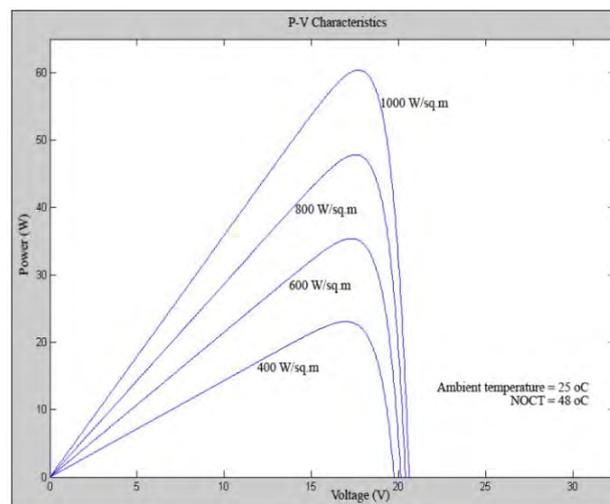


Figure I₁₀ : Caractéristique P-V de sortie pour différentes longueur d'onde λ

(iv) Caractéristique de sortie P-V pour différentes valeurs de la température de fonctionnement de la cellule T_C.

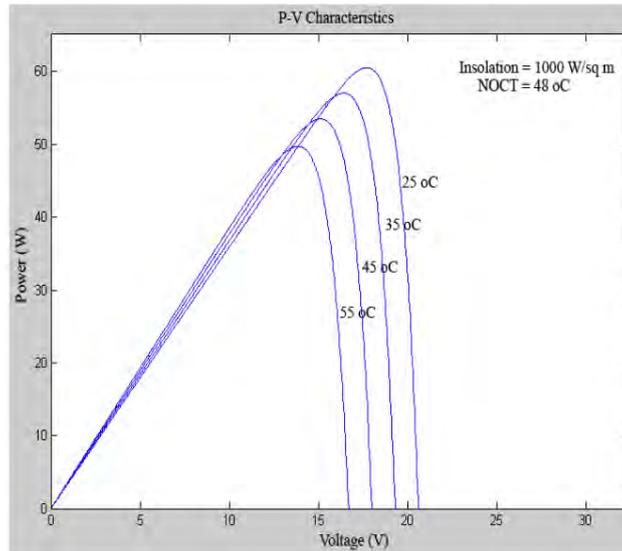


Figure I11 : Caractéristique P-V de sortie pour différentes T_c

Modeling of Solar Cell [20]

Dans cet article les auteurs ont présenté un modèle de cellule solaire en utilisant le logiciel MATLAB / Simulink. Les auteurs ont indiqué que ce modèle peut facilement être simulée à l'aide de ce logiciel MATLAB / Simulink. Ils ont montré que la puissance de la cellule solaire est simulée sur la base du rayonnement solaire et sur la température de fonctionnement de la cellule.

Un circuit électrique équivalent d'une cellule solaire composé d'une diode et des résistances shunt et série a été présenté par les auteurs. Ce circuit électrique est donné par la figure I12.

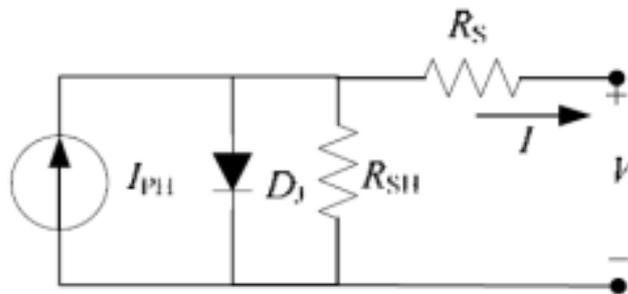


Figure I12 : Modèle électrique d'une cellule solaire

Ils ont à partir de ce modèle électrique tiré l'équation I29 qui est l'équation caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.

$$I = I_{PH} - I_{SA} \exp(q(V + IR_s) / kT_c A) - (V + IR_s) / R_{SH} \quad (I29)$$

Où I_{PH} est un courant provenant de l'éclairage ou photocourant, les résistances série et shunt respectivement R_s et R_{SH} , I_{SA} est le courant de saturation de la cellule sous obscurité, q ($= 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) la charge électrique, K ($= 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) la constante de Boltzmann, T_c la température de fonctionnement de la cellule, A est un facteur d'idéalité.

L'expression du photocourant I_{PH} et sa dépendance de la température de fonctionnement de la cellule T_C et de l'ensoleillement λ a été souligné par les auteurs. Cette dépendance est indiquée par l'équation I30 [21].

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_{SC}(T_C - T_{REF})] \lambda \quad (I30)$$

Où les auteurs ont rapporté que les termes suivants sont : I_{SC} le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1kW/m², K_{SC} le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule, T_{REF} la température de référence de la cellule, et λ l'insolation en kW/m² [21].

Les auteurs ont aussi donné l'expression du courant de saturation de la cellule sous obscurité I_{SA} . Cette expression est donnée par l'équation I31

$$I_{SA} = I_{RS} \left(\frac{I_C}{I_{REF}} \right)^3 \exp \left[qE_G \left(\frac{1}{T_{REF}} - \frac{1}{T_C} \right) \right] \quad (I32)$$

Ils ont montré que pour une cellule solaire idéale, la résistance série est nulle et la résistance shunt tend vers l'infini. En se basant sur ces dernières conventions les auteurs ont réécrit l'équation I29.

$$I = I_{PH} - I_{SA} \left[\exp \left(\frac{qV}{KT_C A} \right) - 1 \right] \quad (I33)$$

Les auteurs en indiquant que le photocourant I_{PH} est très supérieur au courant de saturation I_{SA} , ils ont donné l'égalité du photocourant et du photocourant de court-circuit. Cette égalité est donnée par l'équation I34

$$I_{SA} = I_{PH} \quad (I34)$$

En outre Ils ont défini la puissance maximum. L'expression de la puissance maximum est donnée par l'équation I35

$$P_{\max} = V_{\max} I_{\max} = \gamma W_{OC} I_{SC} \quad (I35)$$

Avec I_{\max} et V_{\max} respectivement le courant et la tension de sortie de la cellule au point de puissance maximale, γ est un facteur de suffisance lequel est un mesure de qualité de la cellule.

Mathematical Model for Photovoltaic Cells [22]

Les auteurs ont indiqué que l'objectif de cette étude est d'évaluer les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) en fonction des différentes conditions de fonctionnement. Pour cela, les auteurs ont mis en œuvre un modèle mathématique d'une simple diode en utilisant un script MATLAB. Les auteurs ont montré que le modèle peut être considéré

comme un outil facile, simple et rapide pour la caractérisation de différents types de cellules solaires. Ainsi ils ont déterminé les conditions environnementales sur le fonctionnement du système proposé. Ils ont mentionné que les caractéristiques de sortie de la cellule photovoltaïque dépendent des conditions environnementales. Ces auteurs ont signalé que pour chaque cellule solaire, les paramètres du modèle sont fonction de l'irradiance et des valeurs de la température de l'emplacement du panneau solaire. Ils ont aussi annoncé dans ce travail que, les valeurs numériques des paramètres du circuit équivalent sont générées par le programme.

Enfin, Ils ont montré que le but fondamentale du présent document est de voir clair sur les techniques de modélisation appliquées pour la caractérisation des cellules photovoltaïques et d'étudier les effets des paramètres physiques (résistance série et shunt), ainsi, ceux de l'environnement (température et irradiance) sur les cellules.

En considérant une cellule solaire idéale c'est-à-dire une cellule composée d'une diode simple en parallèle avec un générateur de courant I_{ph} ; les auteurs ont proposé le schéma donné par la figure I₁₃

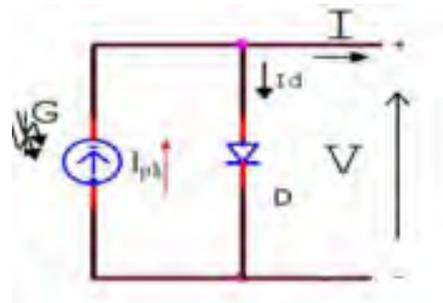


Figure I₁₃ : Schéma de circuit électrique équivalent d'une cellule idéale

Les auteurs ont à partir de la figure I₁₃, défini le courant de sortie qui est donné par l'équation I₃₆

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I_{36})$$

Avec I_s le courant de saturation de la cellule sous obscurité, $V_T = \frac{kT_C}{q}$ la tension thermique, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzmann, $n = 1,1$ le facteur d'idéalité, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C la charge élémentaire.

Maintenant en considérant une cellule photovoltaïque non idéale c'est-à-dire une cellule composée d'une diode simple en parallèle avec un générateur de courant I_{ph} en présence d'une résistance série R_s . Les auteurs ont proposé le schéma du circuit électrique équivalent donné par figure I₁₄

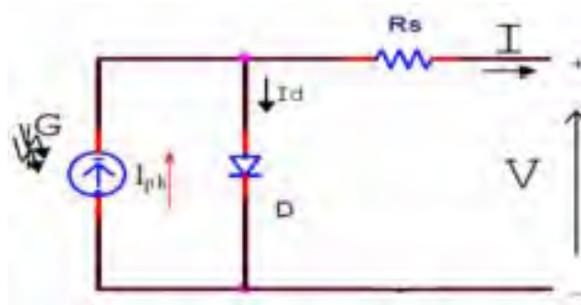


Figure I14 : Schéma de circuit électrique équivalent d'une cellule non idéale

L'équation I37 qui définit l'expression du courant de sortie a été déduite à partir de la figure I14 par les auteurs

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (I37)$$

Les auteurs en remarquant que l'équation I37 n'étant pas appropriée pour symboliser l'attitude de la cellule lorsqu'elle est soumise à des variations environnementales, en particulier à de faibles tensions ; ont importé la résistance shunt R_{sh} . Alors les auteurs avec la présence une d'une diode simple et des résistances shunt et série qui composent désormais la cellule photovoltaïque, Ils ont proposé la figure I15.

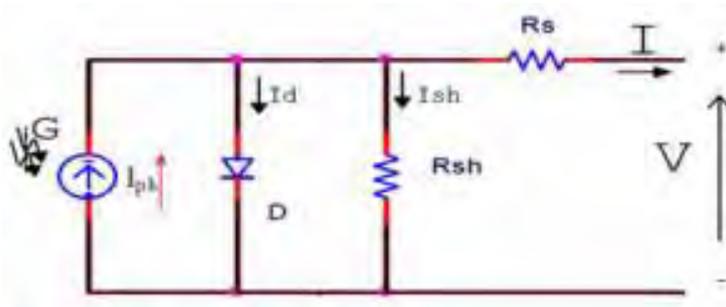


Figure I15 : Schéma de circuit électrique équivalent d'une cellule

Lorsque Ils ont appliqué la loi de Kirchhoff, ils ont établi l'équation I38 [23,24]

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I38)$$

En remplaçant le courant de diode I_d et le courant shunt I_{sh} par leurs expressions les auteurs ont obtenu l'équation I39

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right] \quad (I39)$$

En réalité une photopile n'est pas idéale donc subit des pertes et la résistance série R_s à elle seule ne pourrait pas représenter ces pertes. Cause pour laquelle la résistance shunt (R_{sh}) a été introduite. Ils ont importé les définitions de ces résistances comme suit : la résistance série

provient du contact ohmique entre le métal et la résistance interne du semiconducteur ; et cette résistance doit être faible pour une bonne qualité de la cellule. La résistance shunt représente la qualité de la surface le long de la périphérie et doit être élevée pour une bonne qualité de la cellule.

Ces auteurs ont dans la même continuité introduit l'expression du photocourant dépendant principalement de la température de fonctionnement de la cellule T_c et de l'ensoleillement G .

Cette expression est donnée par l'équation I40

$$I_{ph} = \left[I_{scr} + K_I (T_c - T_{ref}) \right] \frac{G}{G_{ref}} \quad (I40)$$

Où ces termes suivants sont défini par les auteurs: I_{scr} est le courant de court-circuit de la cellule solaire, G_{ref} est l'ensoleillement en W/m^2 , T_{ref} est la température de référence de la cellule,

K_I est le coefficient de température de la cellule solaire en court-circuit.

Ils ont aussi défini l'expression du courant de saturation de la cellule qui varie avec la température de la cellule. Cette expression est donnée par l'équation I41

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (I42)$$

Où les termes suivants sont définie par les auteurs: I_{RS} le courant de saturation inverse de la cellule à la température de référence et à l'ensoleillement, $E_g = 1,10$ eV l'énergie de la band de gap du silicium, n est dépendant de la technologie photovoltaïque.

Les auteurs ont introduit l'expression du courant de saturation inverse I_{RS} à la température de référence. L'expression est donnée par l'équation I43

$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{qV_{oc}}{nkT_c} \right) - 1} \quad (I43)$$

Le paramètre V_{oc} est obtenu en supposant que le courant de sortie est égal à zéro [25].

Le facteur de forme (FF) a été aussi introduit par les auteurs. Son expression est donnée par l'équation I44

$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{qV_{oc}}{nkT_c} \right) - 1} \quad (I44)$$

Ils en considérant cette dernière équation ont introduit la réduction du facteur de forme. Cette réduction est donnée par l'équation I45

$$\Delta FF = \frac{-I_{sc}}{V_{oc}} \cdot R_s \cdot FF_{ideal} \quad (I_{45})$$

Où FF_{ideal} est le facteur de forme idéal et est égal à 0,824

Les auteurs ont indiqué la dépendance : du courant de court-circuit I_{sc} , de la tension de court-circuit V_{oc} , de la puissance maximale P_{max} et du facteur de forme FF à la température.

Suite à laquelle ils ont tracé les courbes suivantes :

- (i) La caractéristique I-V à un ensoleillement de 1000 W/m^2 pour différentes valeurs de la température.

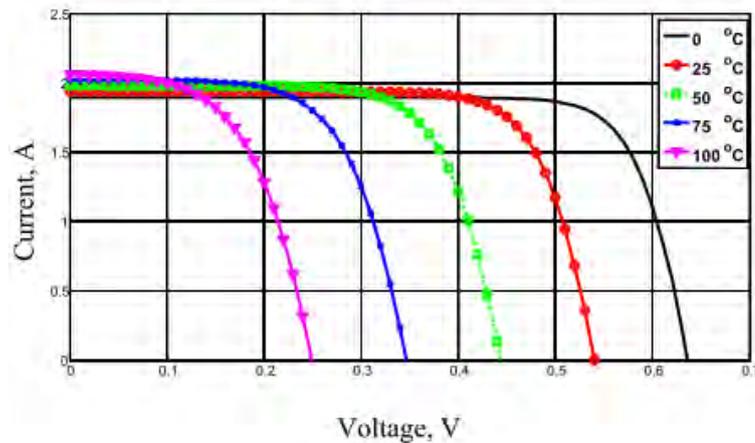


Figure I₁₆ : Caractéristique I-V pour différentes température à 1000 W/m^2

- (ii) La caractéristique P-V à un ensoleillement de 1000 W/m^2 pour différentes valeurs de la température.

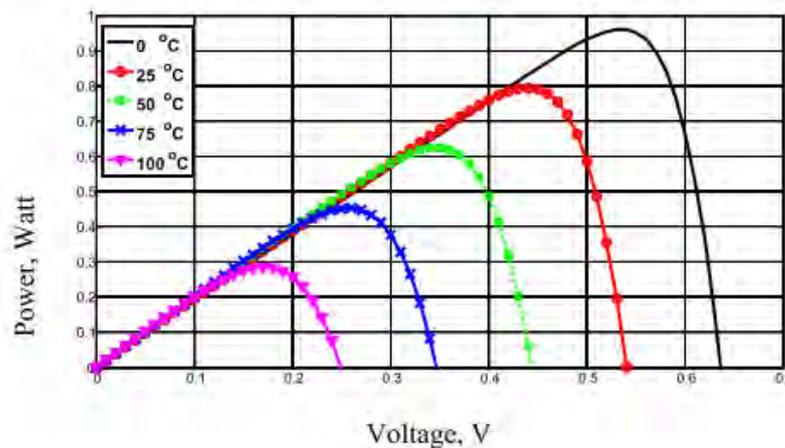


Figure I₁₇ : Caractéristique P-V pour différentes température à 1000 W/m^2

- (iii) Les profils des résistances série (a) et shunt (b) en fonction de la température

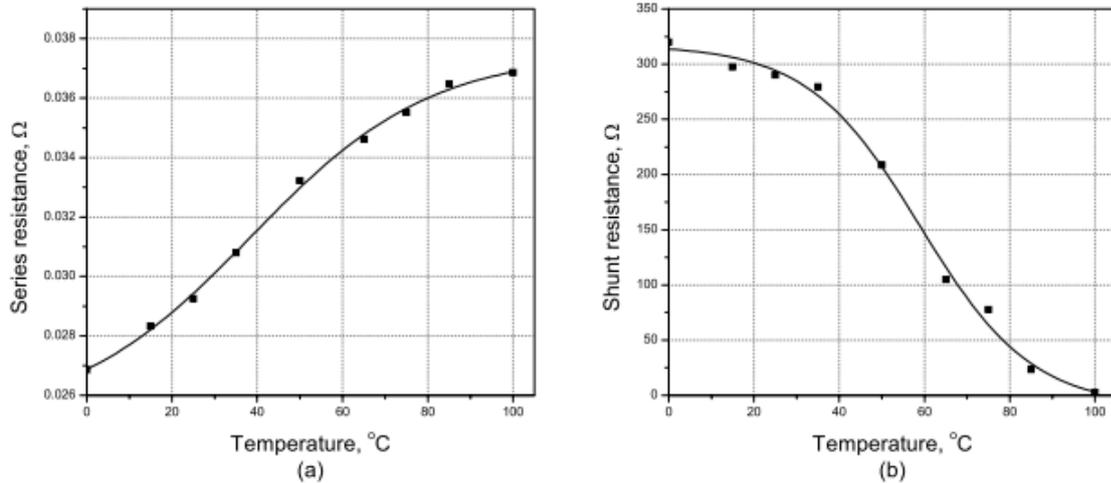


Figure I18 : résistances série (a) et shunt (b) en fonction de la température à 1000W/m²

Analysis Of Mathematical Model Of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment [26]

Dans cet article, les auteurs proposent un modèle à base de circuits. Cette analyse est mathématique et est faite sur une diode unique. Les auteurs ont fait cette analyse avec MATLAB/SIMULINK. Les auteurs s'étaient servie du modèle à une diode pour examiner les caractéristiques I-V et P-V de 46 W pour une irradiation constante (1000W/m²) et une température constante (25°C). Ces auteurs ont tenu en compte l'effet de la température et l'irradiation.

Les auteurs ont schématisé le modèle d'une cellule photovoltaïque le plus utilisé. Ce modèle est celui d'une diode unique avec les résistances série R_s et shunt. Ce modèle est donné par la figure I19

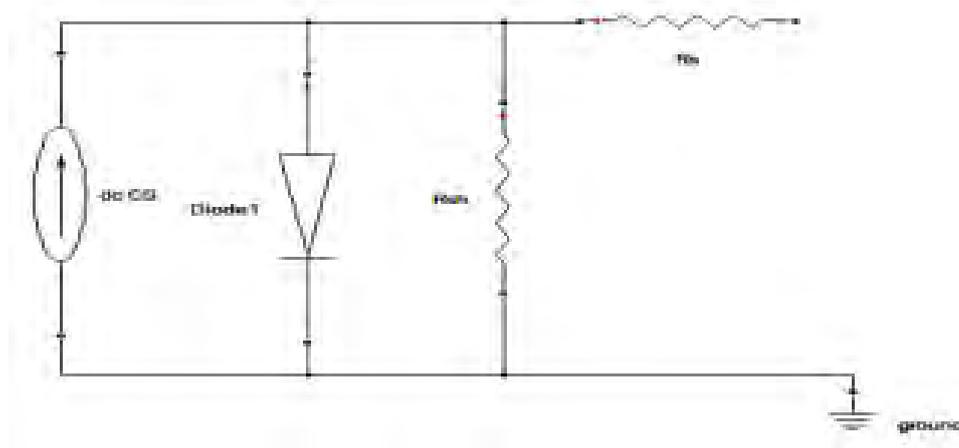


Figure I19 : Modèle d'une cellule photovoltaïque

Ils ont à partir de la figure I19 établi certaines équations telles que :

L'expression du module du photocourant I_{ph} qui est exprimée par l'équation I46

$$I_{ph} = \left[I_{scr} + K_i (T - 298) \right] \frac{\lambda}{1000} \quad (I46),$$

L'expression du module du courant de saturation inverse I_{rs} est exprimée par l'équation I47

$$I_{rs} = \frac{I_{scr}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s k A T}\right) - 1 \right]} \quad (I47),$$

L'expression du module du courant de saturation I_0 dépend de la température de la cellule.

Cette expression du module est donnée par l'équation I48.

$$I_0 = I_{rs} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp\left[\frac{qE_{go}}{Ek} \left\{ \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right\} \right] \quad (I48),$$

L'expression du module du courant de sortie I_{PV} de la cellule PV est exprimée par l'équation I49

$$I_{PV} = N_p I_{ph} = N_p I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{PV} + R_s)}{N_s A k T}\right) - 1 \right] \quad (I49),$$

L'expression de la température de conversion fonctionnant dans centigrade- Kelvin est donnée en utilisation les équations I50 et I51.

$$T_{Rk} = 273 + 259(\text{Ref. Temp}) \quad (I50)$$

Et

$$T_{ak} = 273 + T_{op}(\text{operating Temp}) \quad (I51)$$

Les auteurs en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK, ont tracé :

La caractéristique P-V pour une irradiation constante de 1000W/m² et pour une température constante de 25°C. Cette caractéristique P-V est donnée par la figure I20

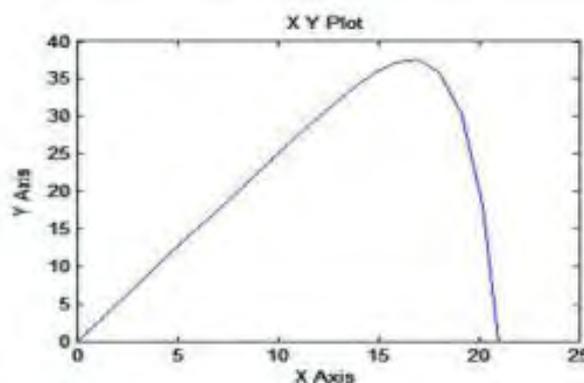


Figure I₂₀ : P-V caractéristique (Irradiation = 1000W/m², Temp = 25°C)

Et

La caractéristique I-V pour une irradiation constante de 1000W/m² et pour une température constante de 25°C est donnée. Cette caractéristique I-V est donnée par la figure I₂₁

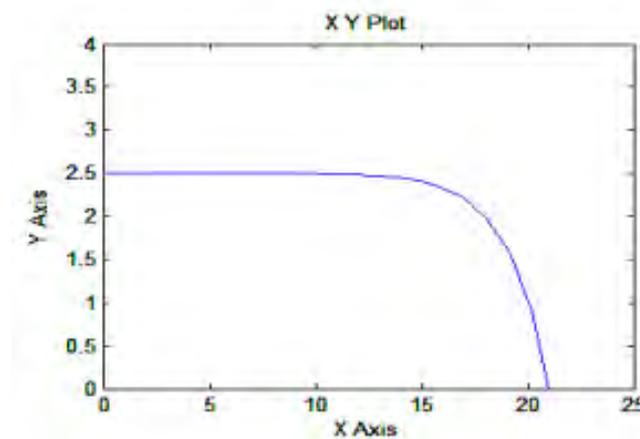


Figure I₂₁ : I-V caractéristique (Irradiation = 1000W/m², Temp = 25°C)

Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment [27]

Les auteurs ont montré que le but fondamental de ce travail est de trouver les paramètres de l'équation I-V non-linéaire en ajustant la courbe en trois points: circuit ouvert, puissance maximale, et de court-circuit. La meilleure méthode trouvée pour l'équation de I-V est le modèle à diode unique photovoltaïque (PV), y compris l'effet de la série et les résistances parallèles. Pour réaliser cela, les auteurs ont utilisé MATLAB-SIMULINK.

Les autres ont importé la phrase suivante : une cellule photovoltaïque est essentiellement une diode à semi-conducteur dont la jonction p-n est exposé à la lumière [28, 29]. Ils ont dit que les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin sont les seuls trouvés à l'échelle commerciale actuellement. Ils ont schématisé cette cellule photovoltaïque qui est présentée par la figure I₂₂.

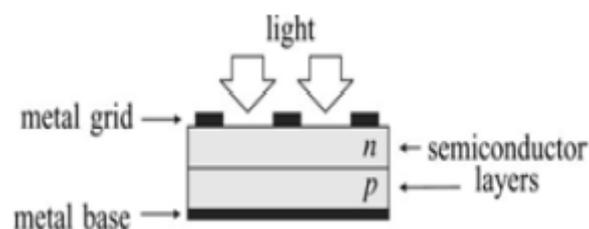


Figure I₂₂ : Structure d'une cellule photovoltaïque

Ces auteurs ont présenté un circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (figure I₂₂). Ce circuit électrique équivalent est donné par la figure I₂₃.

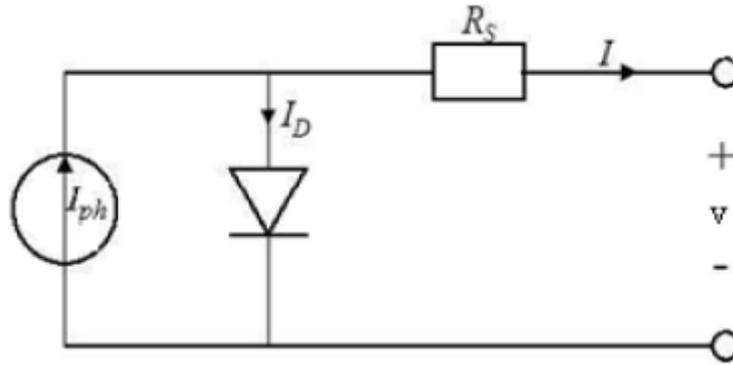


Figure I₂₃ : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Les auteurs ont tiré à partir de la figure I₂₃ l'équation I₅₂. L'équation I₅₂ est l'équation de base de la théorie des semi-conducteurs [28] qui décrit mathématiquement la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque idéale.

$$I = I_{pvcell} - I_d = I_{pvcell} - I_{ocell} \left[\exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (I_{52})$$

Où les auteurs ont défini les termes suivants :

I_{pv} est le courant de la cellule généré par la lumière incident (il est directement proportionnel au rayonnement solaire),

I_d est l'équation la de diode de Shockley,

I_{ocell} est le courant de saturation inverse de la cellule ou le courant de fuite de la diode,

q est la charge de l'électron ($1,60217646 \times 10^{-19}$ C),

k est la constant de Boltzmann ($1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K), T (en Kelvin) est la temperature de la junction p-n,

A est la constant d'idéalité de la diode.

Ils ont schématisé l'équation I₅₂. Les schémas sont donnés par la figure I₂₄

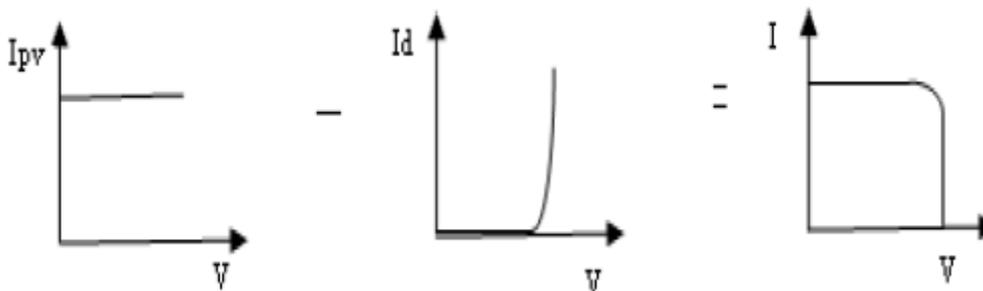


Figure I₂₄ : La courbe de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque

Les auteurs ont dans la même continuité présenté la courbe donnant : le point de court-circuit $(0, I_{sc})$, le point de puissance maximale MPPT (V_{max}, I_{max}) et le point de circuit ouvert $(V_{oc}, 0)$ de la cellule photovoltaïque. Cette courbe est donnée par la figure I25.

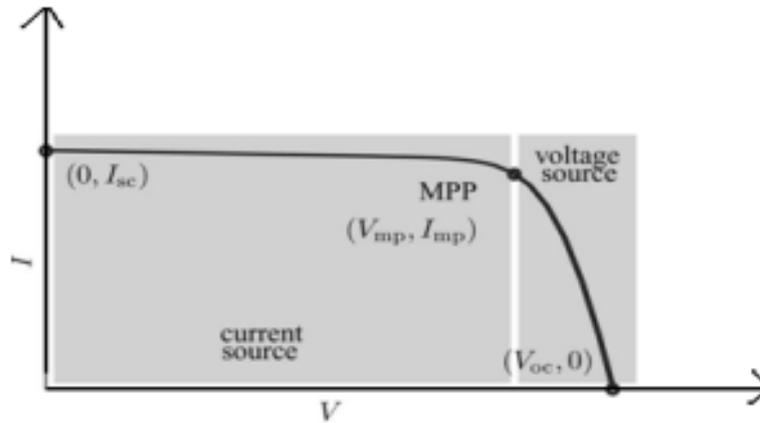


Figure I25 : Caractéristique I-V représentant trois points de fonctionnement de la cellule photovoltaïque : le court-circuit $(0, I_{sc})$, le MPPT (V_{max}, I_{max}) , le circuit ouvert $(V_{oc}, 0)$.

Les auteurs ont montré que la tension de sortie et le photocourant de la cellule dépendent de la température ambiante T_a qui est une variable. Les effets causés par T_a sont représentés dans le modèle par les coefficients de température C_{TV} et C_{TI} . Leurs expressions sont données par les équations I53 et I54.

$$C_{TV} = 1 + \beta_T(T_a - T_x) \quad (I53)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma}{S_c}(T_x - T_a) \quad (I54)$$

Où pour la cellule utilisée $\beta_T = 0,004$; $\gamma = 0,06$ et $T_a = 20^\circ\text{C}$ température ambiante lors du test de la cellule photovoltaïque.

Ils ont montré que la variation de la température de fonctionnement et le photocourant dû à une variation du niveau de rayonnement solaire peut être exprimé par deux constantes, C_{SV} et C_{SI} . Ces deux constantes sont des facteurs de correction pour les variations dans la tension de sortie de la cellule V_C et du photocourant I_{ph} . Les expressions de C_{SV} et C_{SI} sont données par les équations I55 et I56.

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \alpha_s(S_x - S_c) \quad (I55)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_c}(S_x - S_c) \quad (I56)$$

Où S_c est le niveau d'irradiation solaire de référence lors du test de la cellule afin d'obtenir le modèle de la cellule modifiée. S_x est le nouveau niveau de l'irradiation solaire.

Ils ont introduit la différence de température ΔT_c . Cette différence est due à la variation du niveau de rayonnement solaire. L'expression de ΔT_c est donnée par l'équation I57

$$\Delta T_c = 1 + \alpha_s (S_x - S_c) \quad (I57)$$

α_s est la pente au niveau de la variation de température due à une modification du niveau d'irradiation [28] et est égal à 0,2 pour la cellule utilisée.

Les auteurs pour avoir les nouvelles de la tension de sortie V_{cx} et du photocourant I_{phx} , ont donné à T_x et S_x de nouvelles valeurs. Alors ils auront d'autres valeurs des facteurs de corrections C_{TV} , C_{TI} , C_{SV} et C_{SI} . Les expressions de V_{cx} et de I_{phx} sont données par les équations I58 et I59.

$$V_{cx} = C_{TV} C_{SV} V_c \quad (I58)$$

$$I_{phx} = C_{TI} C_{SI} I_{ph} \quad (I59)$$

Ces auteurs ont défini V_c et I_{ph} comme les références respectives de la tension de sortie de la cellule et du photocourant.

Ils ont indiqué que les courbes I-V et P-V résultant de la variation de la température et l'irradiation sont montrés dans [30, 31, 32]. Ils ne vont pas être donnés à ce niveau.

Les autres ont introduit les expressions de P_c et I_c . Ces expressions sont données par les équations I59 et I60

$$P_c = V_c \left(I_{ph} - I_a \exp\left(\frac{q}{kT} V_c - I_o\right) \right) \quad (I59)$$

$$I_c = I_{ph} - I_o \exp\left(\frac{q}{kT} V_c - I_o\right) \quad (I60)$$

Ils ont tracé :

- (i) les caractéristiques I-V pour différentes températures sont données par les figures I25 et I26

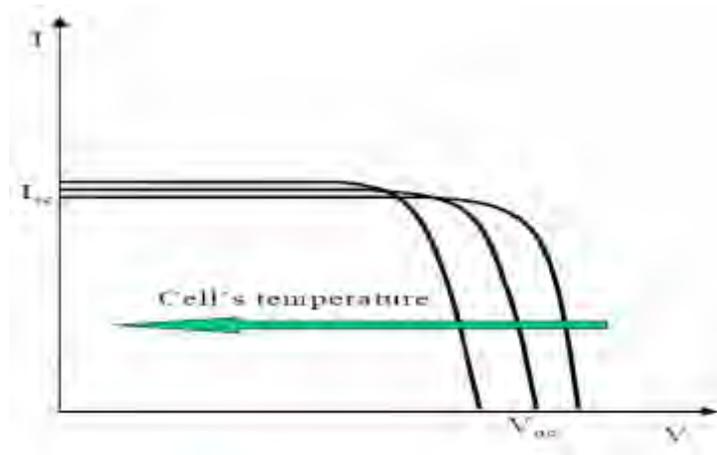


Figure I₂₅ : Influence de la température sur caractéristique I-V

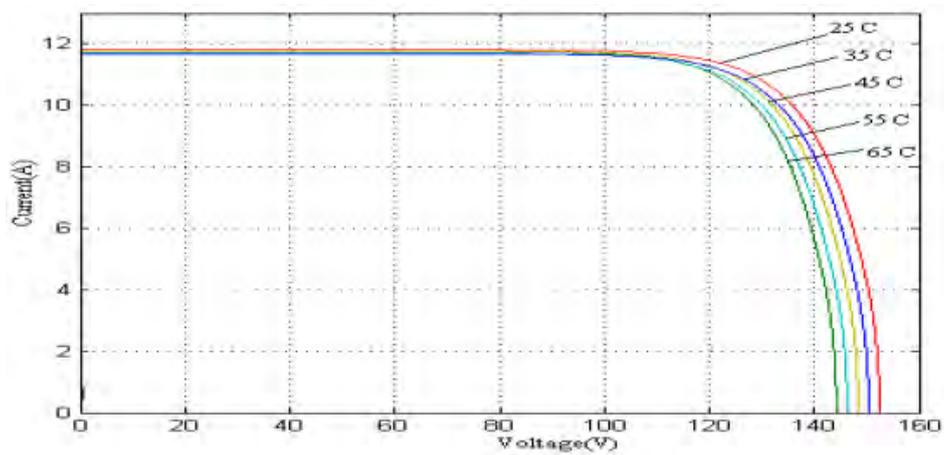


Figure I₂₆ : Influence de la température sur caractéristique I-V à une irradiation donnée.

- (ii) les caractéristiques I-V de deux cellules identiques ; connectées en série (figure I₂₇) et connectées en parallèle (figure I₂₈)

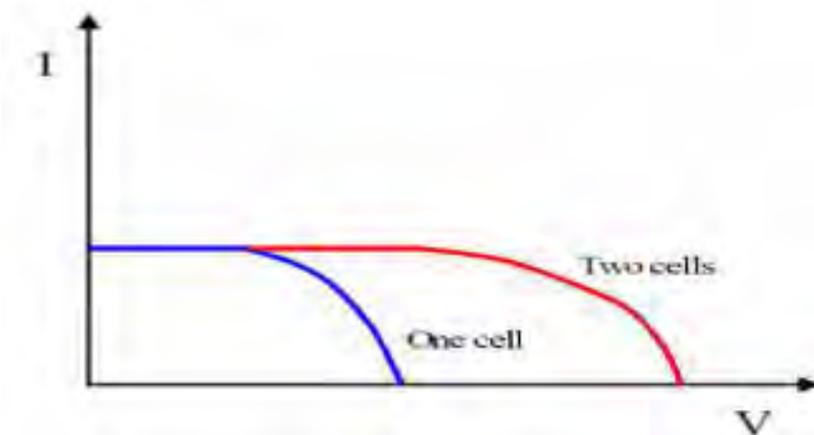


Figure I₂₇ : Caractéristique I-V de deux cellules identiques connectées en série

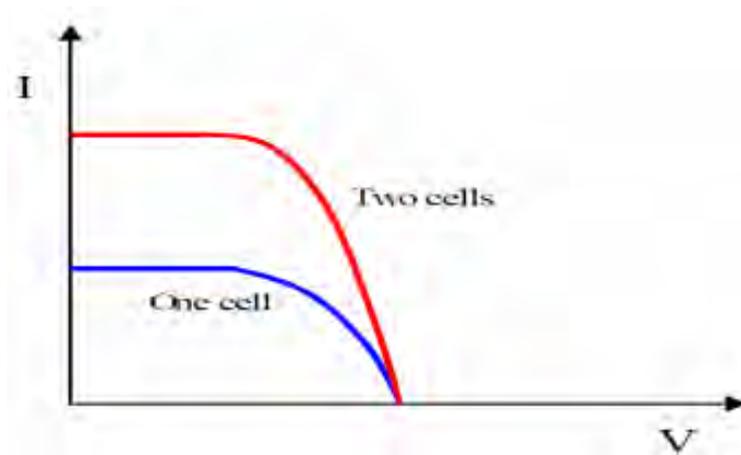


Figure I₂₈ : Caractéristique I-V de deux cellules identiques connectées en parallèle

(iii) la caractéristique P-V pour différentes températures qui est donnée par la figure I₂₉

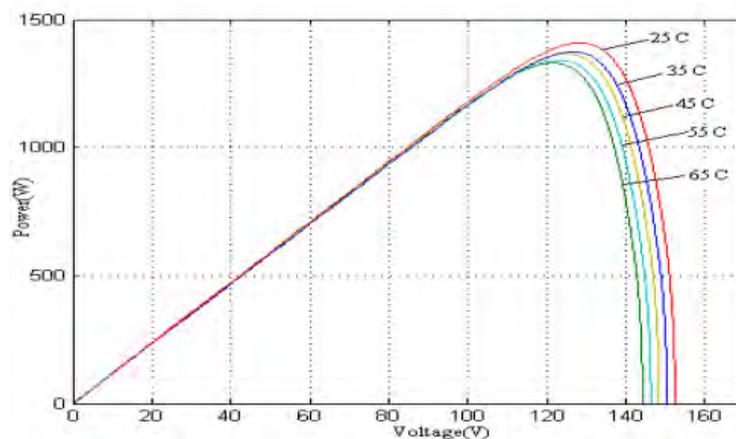


Figure I₂₉ : Influence de la température sur caractéristique P-V à une irradiation donnée.

A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox [33]

Les auteurs ont pour but la présentation d'un modèle de réseau photovoltaïque pouvant être utilisé comme un bloc de sous-système dans la simulation du système d'alimentation. Ils ont présenté un modèle de réseau photovoltaïque utilisant Matlab / Simulink avec l'aide de la boîte à outils SimPowerSystems. Ces auteurs ont développé un modèle Simulink pour étudier l'effet des motifs d'ombrage partiel sur le réseau de PV avec différentes configurations en série et en parallèle. Ils ont utilisé ce modèle de réseau photovoltaïque basé sur Matlab / Simulink avec l'appui de la boîte à outils SimPowerSystems pour, les cellules, les modules et les tableaux et l'ont vérifié avec un réseau photovoltaïque commercial. Ils ont étudié le modèle de PV sous l'effet de l'ensoleillement et de la température. Ces auteurs pour observer le comportement du réseau photovoltaïque vis-à-vis de l'ensoleillement et de la température ont tracé les caractéristiques I-V et P-V.

Reconstitution de la caractéristique I – V et détermination de la puissance d’un système photovoltaïque [34]

Dans cette étude, Les auteurs se sont intéressé à l’estimation de la puissance fournie par un générateur photovoltaïque constitué de panneaux solaires au silicium monocristallin. Dans ce travail, un modèle de la cellule solaire à une exponentielle a été étudié [35, 36]. Autrement dit dans cet article, les auteurs ont utilisé le modèle de la cellule solaire à une exponentielle pour permettre la reconstitution de la caractéristique I -V et l’estimation de la puissance fournie par un générateur photovoltaïque constitué de cellules solaires au silicium monocristallin. Ils ont utilisé la méthode des trois points (courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, puissance maximale). Ces trois points sont fournis par le constructeur pour la détermination de la caractéristique courant - tension. Les auteurs en négligeant la résistance parallèle et en considérant le facteur d’idéalité d’une diode idéale ont instauré une estimation des paramètres (courant de saturation, résistance série, courant photonique). Ils ont, en négligeant la résistance parallèle établi les expressions de la puissance en fonction du courant et en fonction de la tension. Les auteurs pour déterminer l’expression de la puissance en fonction de la tension ont introduit la fonction W de Lambert. Les auteurs dans les conditions de fonctionnement du générateur photovoltaïque ont exposé et représenté graphiquement les courbes des caractéristiques I –V et de puissance en fonction du courant et de la tension.

Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment [37]

Les auteurs ont montré que l’objectif premier de cet article est de présenter une brève introduction au comportement et au fonctionnement d’un appareil photovoltaïque ; et d’écrire ses équations de base sans avoir l’intention de fournir une analyse approfondie du phénomène photovoltaïque et de la physique des semi - conducteurs. Ils ont montré que le but essentiel est de trouver les paramètres de la non linéarité de la courbe I-V. Les auteurs pour trouver cela ont ajusté la caractéristique I-V en ces trois points qui sont le circuit ouvert, la puissance maximale et le court-circuit. Ils ont indiqué que la meilleur méthode trouvée est l’équation I-V pour le modèle photovoltaïque à une diode (ou simple diode) inclut les résistances shunt et série. Ces auteurs ont indiqué que l’introduction sur les dispositifs photovoltaïques est suivie par la modélisation et la simulation des réseaux photovoltaïques. Les auteurs se sont focalisés sur la modélisation de modules photovoltaïques ou panneaux composés de plusieurs cellules de base. Ils ont proposé un modèle mathématique d’une cellule photovoltaïque (PV). Ils ont appliqué cette modèle mathématique sur matlab-simulink environnement. Les auteurs ont utilisé ce modèle mathématique pour montrer les effets de la température et de l’irradiation, pour établir les équations de circuit de base des cellules solaires.

Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions [38]

Dans ce travail les auteurs ont étudié les quatre paramètres tels que : les résistances shunt et série, le facteur d’idéalité de la diode et la densité de courant de saturation inverse. Ces auteurs

à partir de la courbe densité de courant – tension (J-V) sur la base d'un modèle exponentiel de cellules solaires au silicium sous des conditions de haut éclairage, ont utilisé une méthode d'analyse pour extraire ces quatre paramètres. Pour déterminer la résistance shunt les auteurs ont utilisé la pente de la courbe J-V (dV/dJ) lorsque la cellule solaire est en court-circuit d'une part. Ces auteurs dans les conditions de la densité de courant de court-circuit, de la tension de circuit ouvert, de la densité de courant et de la tension au point de puissance maximale de la cellule solaire, ont utilisé la pente J-V pour la détermination des valeurs : de la résistance série, du facteur d'idéalité de la diode et de la densité de courant de saturation inverse (Figure I₃₀).

Autrement dit les auteurs dans des conditions d'éclairage élevés ont mis au point une nouvelle méthode d'analyse pour extraire les paramètres de diodes de cellules solaires au silicium concentrateur. Cette méthode est basée sur des modèles exponentiels simples qui utilisent la pente (dV/dJ) dans les conditions de : court-circuit correspondant à la densité J_{sc} et de circuit ouvert correspondant à la V_{oc} . Les densité de courant au point de puissance maximum (J_m) et tension au point de puissance maximum (V_m) sont aussi déterminées à partir de (dV/dJ).

Ils ont aussi montré que cette méthode est capable d'extraire les valeurs exactes des paramètres de diodes opérant à des températures différentes et dans différentes conditions d'éclairage. Ils ont montré également que cette méthode peut être applicable au concentrateur de cellules solaires, autres que les cellules au silicium dans des conditions d'éclairage élevés et à des températures de fonctionnement différentes.

Le profil de la courbe permettant de déterminer les quatre paramètres cités précédemment est représenté par la figure I₃₀.

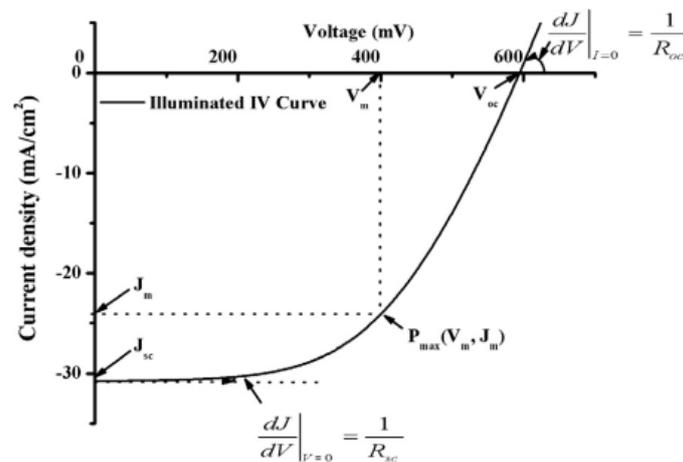


Figure I₃₀ : Illuminated J–V curves to define the values of slopes, current density, and voltage at short circuit and open circuit conditions.

Le profil de la caractéristique J-V permettant l'éclairage sous concentration de 10 et 15 soleils du rayonnement solaire global AM1.5 de la cellule solaire à différentes températures est donné par la figure I₃₁.

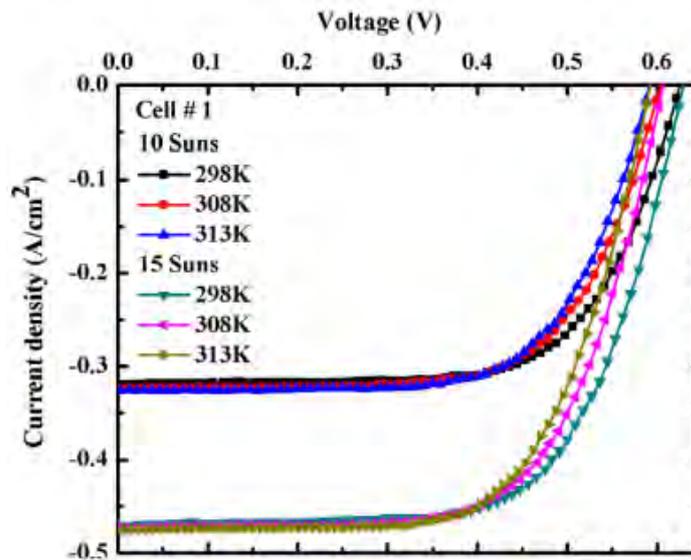


Figure I₃₁: Illuminated J–V curves measured at temperatures of 298, 308, and 313 K under 10 and 15 suns illumination conditions of simulated AM1.5 global solar radiation.

Cette figure montre que pour un éclairage de 10 ou 15 soleils, l’augmentation de la température entraîne simultanément une diminution de la densité de courant et de la tension.

Silicon Solar Cell Space Charge Region Width Determination by a Study in Modeling [39]

Les auteurs en utilisant une photopile de type n^+p-p^+ sous éclairage multispectral constant, ont étudié la capacité de diffusion associée à la région de collecte en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f ou la phototension de jonction. Dans cette continuité les auteurs ont étudié l’élargissement de la zone de charge d’espace qui dépend de S_f . Ce S_f qui définit le point de fonctionnement de la photopile [40].

Comme la base de la photopile a une énorme participation à la photoconversion, les auteurs ont focalisé exclusivement leur étude sur cette zone. Ils ont établi l’équation qui régit les phénomènes qui se déroule lorsque cette photopile est soumise à un éclairage. Cette équation dite de continuité ou de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base $\delta n(x)$ est donnée par l’équation I₆₁.

$$\frac{\partial^2 \delta n(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta n(x)}{L^2} = -\frac{G(x)}{D} \quad (I_{61})$$

Où D et L sont respectivement le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base et leurs longueurs de diffusion.

Ces auteurs à partir de l'équation de continuité ont déterminé l'expression de la capacité de diffusion. Cette expression est donnée par l'équation.

$$C = \frac{q\delta n(0)}{V_T \text{Log}(\delta n(0) \cdot n_0^{-1} + 1)} \quad (I_{62})$$

Avec q , $\delta n(0)$, V_T , et n_0 qui sont respectivement la charge de l'électron, la densité des porteurs minoritaires à la jonction, la tension thermique et la densité des porteurs intrinsèques.

Cette équation I_{62} a permis de tracer la figure I_{32} . La figure I_{32} qui est le profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

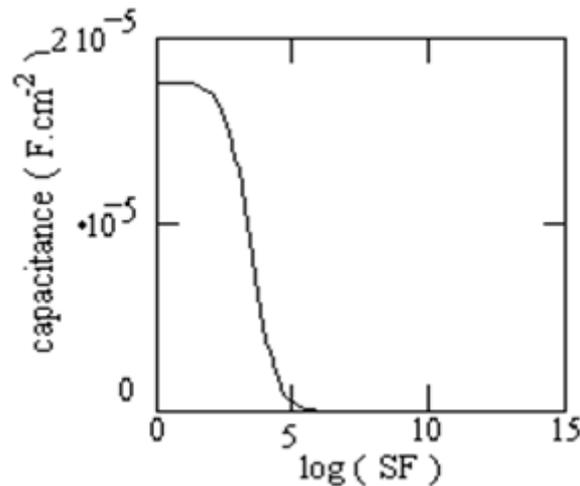


Figure I_{32} : Capacitance versus Log (Sf)

Ces auteurs ont observé une diminution de la capacité lorsque Sf augmente. Ils ont soulevé aussi que cette capacité est maximale lorsque Sf tend vers 0 (circuit ouvert).

Les auteurs, après avoir observé que la capacité ainsi que la phototension dépendent de la vitesse de recombinaison ; ont tracé la figure I_{33} . La figure I_{33} qui représente le logarithme de la capacité en fonction de la phototension.

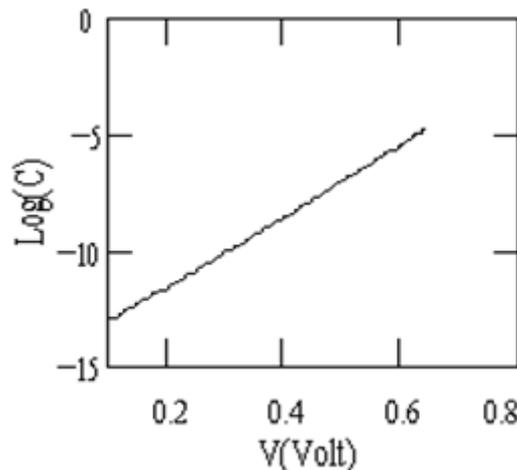


Figure I₃₃ : Characteristic Log (C) – V

Ils ont observé que l'augmentation de Log (C) est proportionnelle à la phototension.

Les auteurs ont considéré la zone de charge d'espace comme étant un condensateur plan.

Alors ils ont établi l'équation l'expression de la capacité correspondant à un condensateur plan. Cette expression est donnée par l'équation I₆₃.

$$C = \frac{\varepsilon A}{X_0} \quad (3)$$

Ils ont défini les constants ε et A respectivement comme la constante diélectrique du matériau et la surface de la photopile.

Ces auteurs ont utilisé l'équation I₆₃ pour tracer la figure I₃₄. La figure I₃₄ est l'inverse de la capacité en fonction de la largeur de la zone de charge d'espace X_0 .

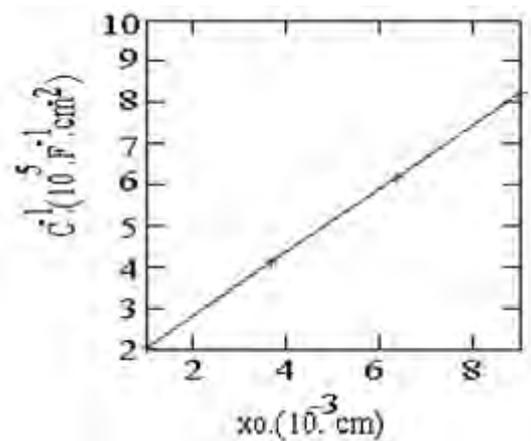


Figure I₃₄: $C^{-1}(Sf)$ versus X_0

Ils ont montré qu'à partir de la figure I₃₄, que pour une valeur fixe de X_0 donnée, correspond à une valeur de la capacité.

REGIME DYNAMIQUE TRANSITOIRE

A quick method for the determination of bulk generation lifetime in semiconductors from pulsed mos capacitance measurements [41]

Dans ce présent article, les auteurs ont examiné la capacité de transition à haute fréquence quand un condensateurs MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur) est pulsé de l'accumulation à l'état d'épuisement profond est habituellement analysé graphiquement pour définir les valeurs des taux de production en masse ou durée de vie des porteurs minoritaires dans le semi-conducteur

concerné. Les auteurs ont utilisé le tracé C – t pour déterminer la génération de la durée de vie. Cependant, ils ont dit que ce processus d'analyse est longue et laborieuse car implique l'analyse graphique [42, 43]. Cause pour laquelle ces auteurs ont proposé une méthode plus rapide pour définir la durée de vie des porteurs minoritaires.

Ils ont évoqué la largeur de déplétion W et ont donné son expression. Expression qui est donnée par l'équation I₆₄.

$$W = \frac{\varepsilon_s}{C_{ox}} \left(\frac{1}{C_n} - 1 \right) \quad (I_{64})$$

Où ε_s est permittivité du semiconducteur, C_{ox} est la capacité de l'oxyde par unité de surface et C_n est la capacité totale par unité de surface relative à C_{ox} c'est-à-dire $C_n = \frac{C}{C_{ox}}$

Les auteurs en se basant sur l'équation I₆₄, ont établi l'équation I₆₅

$$\left(\frac{1}{C_n} - 1 \right) = \left(\frac{1}{C_{no}} - 1 \right) e^{-t/T_R} \quad (I_{65})$$

Ces auteurs pour $t < t_s$ ont défini l'expression de la capacité total par unité de surface C_n donnée par l'équation I₆₆

$$C_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{C_{no}} - 1 \right) e^{-t/T_R}} \quad (I_{66})$$

Où C_{no} est la capacité relative initiale c'est à dire à $t = 0$

Cette équation I₆₆ est celle requise décrivant la capacité de transition.

Minority-Carrier Lifetime Analysis of Silicon Epitaxy and Bulk Crystals with Nonuniformly Distributed Defects [44]

Dans cet article, les auteurs ont présenté une analyse des données de C-t de MOS qui permet de tracer la génération de la durée de vie des porteurs minoritaires en fonction de la largeur de déplétion ou de la zone de charge d'espace. Ces auteurs ont d'abord discuté de la théorie et de la profondeur liée à la durée de vie mesurée par la technique de C-t de MOS. Ces auteurs ont ensuite présenté une procédure modifiée par lequel la dépendance de la largeur de la zone de charge d'espace à la durée de vie peut être examinée. Les auteurs ont exposé une procédure basée sur Zerst pour l'analyse de la rapidité de la durée de vie des porteurs minoritaires des matériaux présentant des défauts distribués de manière non uniforme.

Ils ont établi l'expression exprimant l'analyse de la durée de vie des porteurs minoritaires. Expression qui est donnée par l'équation I₆₇

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{n_i}{2\tau} (W - W_F) + n_i S \quad (I_{67})$$

Où ces auteurs ont présenté les termes suivants comme :

N_s la densité des porteurs minoritaires dans la couche inverse ($= Q_n / q$),

n_i la concentration intrinsèque des porteurs,

τ la durée de vie des porteurs minoritaires,

W la largeur de la zone de charge d'espace,

W_F la largeur de la zone de charge d'espace à l'équilibre,

et

S la vitesse de recombinaison à la surface.

Ils ont défini l'expression de la courbe $C - t$ correspondant à la partie linéaire de la courbe de Zerbst. Expression qui est exprimée par l'équation I₆₈

$$\frac{d(C_{ox}/C)^2}{dt} = A \left[\frac{C_F}{C} - 1 \right] + B \quad (I_{68})$$

Ils ont toutefois montré que l'équation I₆₈ peut être aussi comme l'équation I₆₉

$$\frac{-2C_{ox}^2}{C^3 [A(C_F/C - 1) + B]} dC = dt \quad (I_{69})$$

Les auteurs après intégration de l'équation I₆₉, nous ont proposé l'équation I₇₀

$$-2C_{ox}^2 \left\{ -\frac{1}{AC_F C} + \frac{(B-A)}{A^2 C_F^2} \log \left[\frac{AC_F}{C} + (B-A) \right] \right\} = t + k \quad (I_{70})$$

Où k est une constante d'intégration. Les auteurs ont montré que l'équation I₇₀ définit la relation entre capacité et temps lequel résulte dans une courbe linéaire de Zerbst.

Ils ont indiqué que si :

$$\frac{1}{AC_F C} \square \frac{(B-A)}{A^2 C_F^2} \log \left[\frac{AC_F}{C} + (B-A) \right] \quad (I_{71}),$$

L'équation I₇₀ est réécrite par l'équation I₇₂

$$2C_{ox}^2 \left[-\frac{1}{AC_F C} \right] = t + k \quad (I_{72})$$

Les auteurs après réarrangement de l'équation I₇₂, ont proposé l'équation I₇₃.

$$\frac{C_{ox}}{C} = \frac{AC_F}{2C_{ox}^2} t + k \frac{AC_F}{2C_{ox}^2} \quad (I_{73})$$

Ces auteurs pour faciliter les segments caractéristiques avec le taux de génération, ont utilisé les données de $C - t$ comme C_{ox} / C en fonction du time ; et établir l'équation I₇₄.

$$\frac{C_{ox}}{C} = Mt + N \quad (I_{74})$$

Determination of Lifetime and Surface Recombination Velocity of p-n Junction Solar Cells and Diodes by Observing Transients [45]

Dans ce présent travail, les auteurs ont montré une méthode permettant de déterminer la durée de vie τ et la vitesse de recombinaison S à la face arrière pour une cellule solaire au silicium et des diodes. Cette méthode est la vue unifiée de la méthode transitoire. Ces auteurs ont essayé de définir les limites des méthodes qui existent et de faire évoluer les progrès.

Theory of photo induced open circuit voltage decay in a solar cell [46]

Dans ce travail les auteurs ont donné une théorie de la décroissance de la tension photo induit mesurée par Mahan et al. [47]. Autrement dit ces auteurs ont indiqué que la théorie de la décroissance de la tension photo vient de Mahan et al. Les auteurs ont dérivé les expressions théoriques concernant la décroissance de la tension. Ils ont utilisé cette dérivée pour interpréter les résultats expérimentaux. Ils ont toutefois montré l'inaccessibilité des expressions théoriques pour la décroissance de la tension de photo induit. Ils ont mentionné les expressions développés [48,49] au début, pour la méthode FCDV et également pour expliquer les résultats du PVD.

Studies of surface voltage and current transients in solar cells for accurate evaluation of minority carrier lifetime [50]

L'objectif de ce travail évoqué par les auteurs était de présenter une nouvelle technique comme la tension de surface et courant transitoire de désintégration surfacique permettant de déterminer la durée de vie des porteurs. Ces auteurs ont effectué une analyse de ces transitoires pour le cas du courant induit dans des conditions d'injection de niveau faible. Les auteurs pour avoir des transitoires après la réalisation de l'état d'équilibre ont fait cette étude sur la coupure de courant immédiat. Ils ont développé un modèle mathématique concernant la tension de surface et les transitoires de désintégration actuels. Ces auteurs pour le courant et la tension de surface avec des approximations pratiquement appropriées ont aussi résolu analytiquement les équations différentielles dépendant du temps de ligne de transmission. Ils ont développé des expressions analytiques pour la tension de surface et courant le long de la tension de circuit ouvert influencé par la tension de surface. Ils ont également comparés les résultats obtenus avec les travaux rapportés précédemment [51]

Determination of minority carrier lifetime and surface generation velocity by hysteresis pulsed C-V method [52]

Dans la présente note, les auteurs ont proposé d'utiliser des mesures d'hystérésis des caractéristiques C-V pulsés obtenues en réponse aux impulsions de polarisation avec un taux de balayage à haute tension à la place des mesures de C-t. Ces auteurs pour la détermination des paramètres de génération de la structure MIS (Métal-Isolant-Semiconducteur) ont utilisé la méthode C-t développé par Zerbst [53]. Ils ont indiqué que cette méthode est basée sur l'examen des courants de génération de porteurs minoritaires dans des structures MIS.

Recombination Lifetime Using the Pulsed MOS Capacitor [54]

Dans cet article, les auteurs ont déterminé les durées de vie de génération τ_g et de recombinaison τ_r . Ces auteurs pour la détermination de ces deux durées de vie ont utilisé un condensateur MOS à impulsion. Ils ont indiqué que le condensateur MOS pulsé est couramment utilisé pour mesurer la durée de vie de génération. Ils ont exposé une technique en utilisant le même

condensateur MOS pour évaluer la durée de vie de recombinaison. Cette méthode repose sur le fait que, qu'à des températures variant de 70 à 100°C le courant de masse quasi-neutre domine sur la zone de charge d'espace actuelle. Les auteurs ont donc déduit que ce courant détermine la capacité. Ces auteurs ont montré que le condensateur MOS pulsé est une structure de test simple qui est disponible dans la plupart des modèles de test de contrôle de procédé et ne nécessite pas de diffusion.

Ils ont estimé qu'une combinaison des deux techniques est très puissante, car il donne à la fois τ_g et τ_r et caractérise le matériau près de la surface, sur la largeur de la longueur de diffusion par conséquent. Ils ont affirmé que ces deux éléments sont importants pour le temps de stockage des mémoires dynamiques à accès aléatoire, par exemple.

Minority carrier transport in carbon doped gallium arsenide [55]

Les auteurs ont présenté dans ce travail les premiers résultats du zéro temps sur le terrain de vol noté (ZFTOF), à la mesure de la mobilité des électrons qui sont les porteurs minoritaires et des longueurs de diffusion de GaAs dopée en carbone. Ces auteurs ont indiqué que le carbone est un atome accepteur (de type p) à la température variant entre 77 et 300K. Les auteurs ont indiqué que ZFTOF est une technique [56,57] qui consiste à mesurer la tension photoélectrique transitoire, qui se produit lorsque des électrons sont générés optiquement près de la surface de la diode p⁺-n et sont diffusés vers le bord de la zone de charge d'espace et sont collectés. Ils ont montré que la technique ZFTOF a déjà été utilisée pour étudier les structures Be-dopées à la température ambiante, à des densités de dopage beaucoup plus bas que considéré dans le présent document par Ahrenkiel et al.,[58] et par Lovejoy et al.,[57] à des niveaux de dopage comparables.

Measurement of solar cell ac parameters using the domain technique [59]

Dans cette étude, les auteurs ont développé l'instrument de mesure des paramètres des cellules solaires à courant alternatif [capacité de la cellule (C_p) et la résistance de la cellule (R_p)] en utilisant la technique du domaine de temps. Ces auteurs ont exposé la technique du domaine temporel actuel pour mesurer la tension à courant alternatif dépendant des paramètres de tous les dispositifs non linéaires comme la cellule solaire. Ils ont calculé la capacité de la cellule (C_p) et la résistance série (r) en utilisant la technique de décroissance de la tension de circuit ouverte (OCVD). Ils ont indiqué que la technique (OCVD) est calibrée à l'aide d'un réseau électrique avec des composants passifs semblables à courant alternatif équivalent d'une cellule solaire comprenant des résistances de précision et de condensateurs. Les auteurs ont comparé les données obtenues au niveau de la technique du domaine temporel à celles de la technique de spectroscopie d'impédance sur la même cellule solaire et ont constaté que l'écart de la capacité de la cellule et la résistance sont à $\pm 8\%$.

REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL

Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaN/AlN/GaN heterostructures [60]

Les auteurs ont montré que les caractéristiques capacité-tension (C-V) et conductance-tension des hétérostructures de (G/ ω -V) (Ni/Au)/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN/GaN) dépendant de la température ont été étudiées en prenant en compte de l'effet de la résistance série (R_s) dans la gamme de températures compris entre 80 et 390 K. Ils ont indiqué l'origine de la capacité négative dans

les caractéristiques C-V des hétérostructures de (Ni/Au)/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN/GaN à polarisation directe dans une large gamme de température (80-390 K) et à la tension de polarisation (± 6 V) à 1 MHz.

Admittance and Impedance Spectroscopy on Cu (In, Ga) Se₂ Solar Cells [61]

Les auteurs ont dans cet article présenté des résultats expérimentaux sur les propriétés électriques de haute efficacité ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ cellules solaires à hétérojonction. Ces auteurs ont utilisé la spectroscopie Admittance pour caractériser des niveaux en volume et d'interface dans la couche absorbeur Cu(In, Ga)Se₂. Ils ont étudié la structure de défaut et le circuit équivalent polycristallin des cellules solaires CIGS par admission et mesures d'impédance. Ces auteurs ont étudié les propriétés interfaciales de cellules solaires ZnO/Cds/Cu(In, Ga) Se₂ par admission et la spectroscopie d'impédance est effectuée dans la gamme de fréquence 100Hz - 1.8MHz.

Effects of Series Resistance and Inductance on Solar Cell Admittance Measurements [62]

Dans ce travail, les auteurs ont réalisé des mesures d'admittance sur une variété de mince film de cellules solaires polycristalline de 0,43 cm² de surface. Ces cellules solaires polycristalline sont composées: de cuivre, d'indium, de diséléniure de gallium (CIGS) pour des fréquences (f) allant de 1 kHz à 1 MHz et pour des tensions de polarisation (V) allant de -2,0 à 0,2 V. Autrement dit l'admittance de cellules solaires polycristalline de CIGS dépendant de la fréquence et en polarisation inverse a été mesuré par les auteurs et comparé avec les calculs pour un circuit simple.

Measurement of AC Parameters of Gallium Arsenide (GaAs/Ge) Solar Cell by Impedance Spectroscopy [63]

Dans ce travail, en utilisant la spectroscopie d'impédance les auteurs ont mesurées les paramètres de courant alternatif de cellules solaires d'arséniure de gallium (GaAs/Ge). Ils ont présenté les caractéristiques de courant alternatif d'une cellule solaire GaAs/Ge à différentes tensions et à la température ambiante. La capacité de la cellule, une résistance dynamique et la résistance série ont été mesurés.

Dans cet article aussi, les auteurs ont indiqué la domination de la capacité de transition (C_T) jusqu'à 0,9V et au-delà de 0,9V la capacité de diffusion devient plus importante. Ils ont comparé les valeurs expérimentales aux valeurs théoriques.

Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination [64]

Les auteurs en utilisant la technique de la spectroscopie d'impédance ont indiqué l'influence de la longueur d'onde sur les paramètres électriques d'une cellule solaire au silicium à jonction verticale parallèle. Ils ont indiqué les diagrammes de Bode de la capacité de diffusion pour différentes longueurs d'onde tandis que la cellule solaire fonctionne soit circuit ouvert soit en

court-circuit. Les auteurs en utilisant le diagramme de Nyquist de la capacité de diffusion pour différentes longueurs d'onde ont montré l'élargissement de la zone de charge d'espace.

Dans cet article aussi, ces auteurs ont présenté un modèle mathématique / physique qui leur a permis de simuler le comportement de la capacité d'une cellule solaire à jonction verticale parallèle dépendant de la fréquence. Ils ont utilisé les diagrammes de Bode et Nyquist [65,66] pour indiquer l'influence de la longueur d'onde et de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la capacité de diffusion d'une cellule solaire au silicium à jonction parallèle caractérisé par l'ensemble latérale.

A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy [67].

Dans ce présent travail les auteurs ont exposé une simple méthode de correction pour éliminer les effets de la résistance série et de l'inductance sur les spectres d'admittance. Ces auteurs ont proposé une méthode pour la correction des résistances shunt et série et pour l'inductance basée sur le modèle électrique de Scofield. La méthode est basée sur l'obtention de valeurs adéquates pour les résistances shunt et série, et pour l'inductance.

Ils ont défini un circuit équivalent électrique. Circuit équivalent qui est intitulé : Circuit simple décrivant les effets des résistances shunt et série, et l'inductance sur l'admittance mesurée d'une cellule solaire. Circuit qui est présenté par la figure I35.

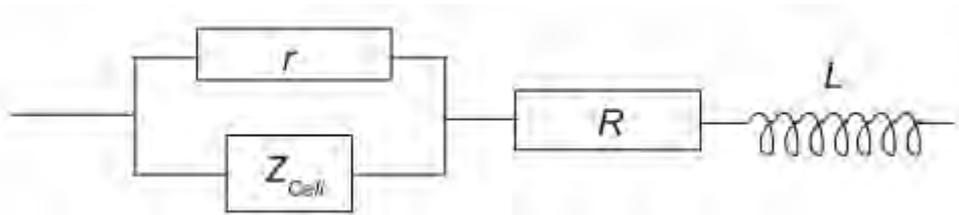


Figure I35: Simple circuit describing the effect of the series and shunt resistance and series inductance on the measured admittance of a solar cell.

Les auteurs à partir de la figure I35 ont défini l'expression de l'impédance complexe. Cette expression est donnée par l'équation I75

$$Z^{Meas}(\omega) = R + j\omega L + \frac{rZ_{Cell}(\omega)}{r + Z_{Cell}(\omega)} \quad (I75)$$

Basé sur le concept défaut d'admittance unique introduite par Karpov et al. [68]. Les auteurs ont introduit une fonction $Z_{Cell}^{Fit}(\omega)$, qui contient une contribution de quatre niveaux uniques. Cette fonction est définie par l'équation I76.

$$Y_{Cell}^{Fit}(\omega) = \frac{1}{Z_{Cell}^{Fit}(\omega)} = j\omega \left[C + \sum_{k=1}^4 \frac{C_k^0}{1 + j\omega\tau_k} \right] \quad (I76)$$

Ils ont défini les termes suivants comme suit :

C la capacité de la couche de déplétion dépendant de la fréquence, C_k^0 l'amplitude de la capacité du composant kth, τ_k le temps de relaxation du défaut.

Ils ont indiqué que l'équation I₇₆ peut aussi être interprétée comme une relation explicite entre la conductance et la capacité en fonction de la fréquence d'une couche de déplétion y compris les niveaux dans la bande interdite.

Toutefois, en supposant que l'équation (I₇₆) donne une bonne approximation de l'admittance des défauts, ils ont réalisé qu'ils peuvent obtenir des valeurs adéquates décrivant les effets des résistances parasites (série (R) et shunte (r)) et de l'inductance (L). Les auteurs en introduisant les valeurs dans l'équation (I₇₅), ont obtenu une fonction décrivant l'impédance de la cellule solaire. Cette fonction est donnée par l'équation I₇₇.

$$Y^{Cell}(\omega) = G^{Cell} + j\omega C^{Cell} = \frac{1}{Z^{Meas}(\omega) - R - j\omega L} - \frac{1}{r} \quad (I_{77})$$

Study of silicon solar cell at different intensities of illumination and wavelengths using impedance spectroscopy [69]

Dans ce travail les auteurs par : la spectroscopie d'impédance, la caractéristique densité de courant-tension (I-V) et la réponse spectrale, ont mesuré les particularités statique et dynamique d'une structure de cellule solaire au silicium cristallin simple. Ces auteurs ont fait les mesures de la spectroscopie d'impédance dans trois situations à savoir : sous obscurité, sous éclaircissement (0 à 100 mW/cm²) et sous différentes longueurs d'onde (400 à 1050 nm). Ces auteurs sous obscurité et à faibles intensités d'éclaircissement (< 50 mW /cm²) ont obtenu des demi-cercles presque parfaits mais à des intensités d'éclaircissement élevés avec de faibles fréquences. Ils ont obtenu des déformations des demi-cercles (figure I₃₆).

Cette figure I₃₆ présente le profil du spectre d'impédance complexe dans les conditions de sous obscurité et sous éclaircissement d'intensités différentes.

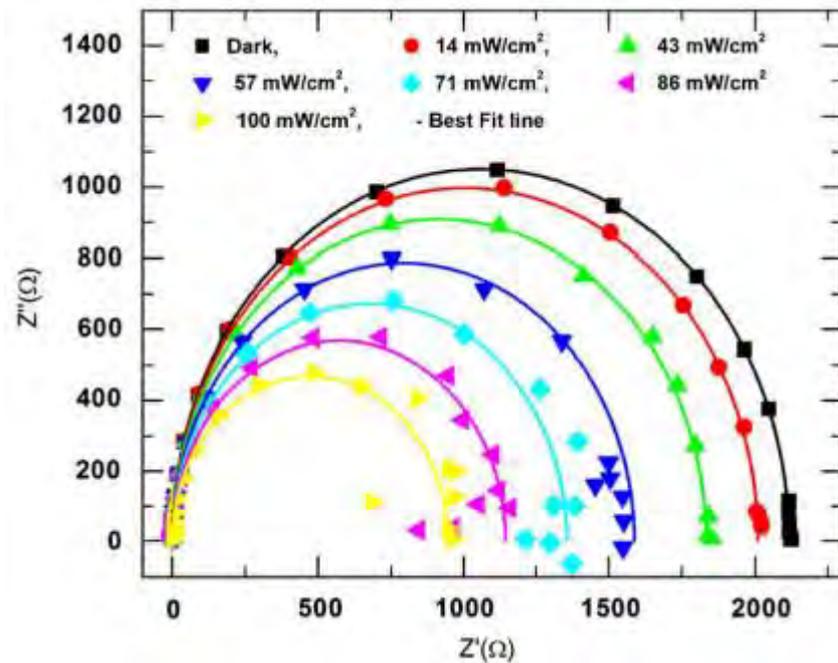


Figure I₃₆. Complex impedance spectra in dark and under different intensities (14, 43, 57, 71, 86, 100 mW/cm²) of illumination where symbols represent experimental points and the lines Z-plot best fit curves, respectively.

C'est dans cette lancée que les auteurs ont dit que l'observation de l'augmentation de la capacité sous éclairage peut être expliquée par le modèle de Moose [70,71]. Cette modèle déclare que dans les conditions de circuit ouvert la valeur de la capacité ne change pas mais, dans les conditions de court-circuit une capacité supplémentaire est ajoutée et la capacité efficace est définie comme [71] :

$$C_{eff} = C_d[1 + \delta] \quad (I_{78})$$

Où δ est proportionnel à la concentration de porteurs.

Conclusion étude bibliographique

Cette étude bibliographique a été classée en trois régimes tels que : le régime statique, le régime dynamique transitoire ainsi que le régime dynamique fréquentiel. Durant cette étude nous avons montré que les auteurs ont utilisé divers méthodes pour la détermination : de la capacité et des résistances shunt et série.

Notre étude sera canalisée sur le régime statique. Dans ce régime les paramètres électriques comme la capacité ainsi que les résistances shunt seront déterminés. La détermination de ces paramètres va s'appuyer le coefficient de diffusion $D(T)$ des porteurs minoritaires

de charge en excès dans la base de la photopile. Ce coefficient de diffusion va dépendre uniquement de la température. Dans l'expression $D(T)$ il ya un terme μ appelé coefficient de mobilité des porteurs. Il ya des travaux qui ont été publiés en utilisant la relation d'Einstein $D(T) = \frac{k_b \cdot T}{q} \mu$ sans tenir compte de la dépendance de la température

T du coefficient de mobilité des porteurs μ . Notre contribution est que nous nous appuyerons sur $D(T)$ pour accomplir notre travail en tenant compte de la dépendance de la température T au niveau de μ , donc $\mu(T)$. L'expression de $\mu(T)$ sera donnée aux chapitres suivants.

Références bibliographiques

- [1] G. Yaron and D. F.-Bentchkowsky, « capacitance voltage characterization of poly Si-SiO₂-Si structures », Solid-State Electronics, Vol. 23, pp : 433-439, 1980.
- [2] S. M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, Wiley, pp: 432, 1969 New York.

- [3] A. Jakubowski, « Graphic method of substrate doping determination from C-V characteristics of MIS capacitors », *Solid-State Electronics*, Vol. 24, No. 10, pp: 985-987, 1981.
- [4] R. H. Kingston and S. F. Neustadter, "Calculation of the space-charge, electric field and free carrier concentration at the surface of a semiconductor," *J. Appl. Phys.* Vol. 26, pp: 718, 1955
- [5] J. J. Liou, F. A. Lindholm, and D. C. Malocha, « forward-voltage capacitance of heterojunction space-charge region », *J. Appl. Phys.* 63 (10), pp: 5015-5022, 15 May 1988
- [6] F. A. Lindholm, "Capacitance; finite difference theory; majority carriers; p-n junctions; phenomenology; schottky diodes; Debye length; dielectrics; holes (electron deficiencies); numerical analysis", *J. Appl. Phys.* Vol. 53, pp: 7606-7608, 1982.
- [7] J. J. Liou and F. A. Lindholm, "Improved forward-voltage p/n junction space-charge region capacitance based on time-domain reasoning" *J. Appl. Phys.* Vol. 62, Issue 2, pp: 565-568, July 1987.
- [8] R. L. Anderson, "Experiments on Ge-GaAs heterojunctions " *Solid-State Electron*, Vol. 5, Issue 5, pp: 341-344, in21-in24, pp: 345-351, September-October 1962.
- [9] E. Sow, S. Mbodji, B. Zouma, M. Zoungrana, I. Zerbo, A. Sere & G. Sissoko, « using Gauss's law in determining the width emitter extension region of the solar cell operating in Open Circuit Condition », *Global journal of sciences frontier Research physics and space sciences*, Vol. 12, issue 6, version 1.0, 2012, 67-71.
- [10] S. Madougou, M. Kaka and G. Sissoko, "Silicon Solar Cells: Recombination and Electrical Parameters", *Solar Energy*, pp: 69-79, 2010. ISBN 978-953-307-052-0
- [11] S. Mbodji, B. Mbow, F. I. Barro, and G. Sissoko, « a 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition », *Turk J. Phys.*, 35, pp: 281-291, 2011.
- [12] S. Mbodji, M. Dieng, B. Mbow, F. I. Barro and G. Sissoko, "three dimensional simulated modeling of diffusion capacitance of polycrystalline bifacial silicon solar cell", *Journal of Applied Science and Technology (JAST)* Vol.15, pp: 109, 2010.
- [13] S. Mbodji, M. Dieng, B. Mbow, F. I. Barro, G. Sissoko, « Influence of grain size and grain boundary recombination velocity on the diffusion Capacitance of a polycrystalline bifacial silicon solar cell », *Journal des Sciences pour l'Ingénieur*, N°11, pp: 64-74, 2009.

- [14] G. Sissoko, B. Dieng, A. Correa, M. Adj, D. Azilino, "Silicon Solar cell space charge region width determination by a study in modelling", Proceedings of the 5th World Renewable Energy Congress., Vol. 3, pp: 1852-1855, 1998, Florence, Italy.
- [15] k. J. Singh, K L R. Kho, S. J. Singh, Y. C. Devi, N.B. Singh, and S.K. Sarkar, « Artificial neural network approach for more accurate solar cell electrical circuit model », International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA) Vol.4, No.3, pp: 101-116, June 2014.
- [16] O. Wasynczuk, "Modeling and dynamic performance of a linecommutated photovoltaic inverter system," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 4, no. 3, pp. 337-343, 1989
- [17] R. Messenger and J. Ventre, Photovoltaic Systems Engineering, CRC Press, pp.41-51, 2000.
- [18] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, "Voltage-based maximum power point tracking control of PV system," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 38, no. 1, pp. 262-270, 2002.
- [19] I. S. Kim, M. B. Kim and M. J. Youn, "New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1027-1035, 2006.
- [20] Ms. Geetam Richhariya, Ms. Aparna Pachori, « Modeling of Solar Cell », International Journal of wind and Renewable Energy Volume 1 Issue 1, pp, 31-34, ISSN: 2277-3975, 2011.
- [21] I. S. Kim, M. B. Kim and M. J. Youn, "New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1027-1035, 2006.
- [22] Wafaa ABD EL-BASIT, Ashraf Mosleh ABD El-MAKSOOD and Fouad Abd El-Moniem Saad SOLIMAN, «Mathematical Model for Photovoltaic Cells », Issue 23, p. 13-28, July-December 2013.
- [23] S. Rikesh, P. Moumi, "Analysis of Photovoltaic Cells With Closed Loop Boost Converter Intr. Jour", of Advances in Eng. & Technology, Vol. 6,issue 1, p.304-315, 2013.
- [24] K. Firoz, S.N. Singh, M. Husain, "Effect of Illumination Intensity on Cell Parameters of a Silicon Solar Cell", Solar Energy Materials & Solar Cells, Elsevier, Science-Direct, Vol. 94, p. 1473-1476, 2010.

- [25] T. Huan-Liang, T. Ci-Siang, S. Yi-Jie, “Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK”, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, pp: 22 – 24, October 2008 San Francisco, USA.
- [26] P.Sudeepika, G.Md. Gayaz Khan, « Analysis Of Mathematical Model Of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment », International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE), Vol. 3, Issue 3, March 2014.
- [27] J. Surya Kumari and Ch. Sai Babu, « Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment », International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 2, No. 1, pp. 26~34, February 2012.
- [28] S. Daher, J. Schmid and F. L.M. Antunes, “Multilevel Inverter Topologies for Stand-Alone PV Systems” IEEE Transactions on Industrial Electronics.Vol.55, No.7, pp: 2703-2712, July 2008.
- [29] M. M. Casarro, D. C. Martins “Grid connected PV System: Introduction to Behavior Matching” IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 17-22, 2008.
- [30] M. Calais, V. G. Agelidis “Multilevel Converters for Single – Phase Grid connected Photovoltaic Systems-An Overview” Center for renewable Energy systems Technology IEEE, Vol. 1, pp: 224-229, 1998.
- [31] Gui-Jia Su “Multilevel DC-Link Inverter” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41, No.3, pp: 848-854, May/June 2005.
- [32] H. Altas and A.M. Sharaf “A Photovoltaic Array Simulation Model For Matlab-Simulink GUI Environment” Proceedings of IEEE International conference on Clean Electrical power, Vol. 1, pp: 341-345, 2007.
- [33] Samer Said, Ahmed Massoud, Mohieddine Benammar and Shehab Ahmed, « A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox », Journal of Energy and Power Engineering 6, pp : 1965-1975, 2012.
- [34] A. Zaatri, S. Belhour, « Reconstitution de la caractéristique I – V et détermination de la puissance d’un système photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 pp : 563 – 574, 2009.
- [35] A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez and J. Muci, “New Method to Extract the Model Parameters of Solar Cells from the Explicit Analytic Solutions of Their Illuminated I–V Characteristics”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, N°3, pp: 352–361, 2006.
- [36] M. Wolf and H. Rauschenbach, “Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements”, Advanced Energy Conversion, Vol. 3, N°2, pp. 455 – 479, 1963.

- [37] J. Surya Kumari and Ch. Sai Babu, « Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment », International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 2, No. 1, pp. 26~34, February 2012.
- [38] F. Khan, S. H. Baek, Y. Park, J. H. Kim , « Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions », Energy Conversion and Management, pp : 421–429, 2013.
- [39] G. Sissoko, B. Dieng, A. Corrêa, M. Adj, and D. Azilinson, « Silicon Solar Cell Space Charge Region Width Determination by a Study in Modeling », Renewable Energy, Vol. 3, pp : 1852-1855, 2004.
- [40] G. Sissoko, C. Museruka, A. Corrêa, I. Gaye, Proc. World Renewable Energy Conference, Part II, pp. 1668 - 70, Denver (Colorado, U.S.A), 1996.
- [41] K. S. Rabbani and D. S. Lamb, « a quick method for the determination of bulk generation lifetime in semiconductors from pulsed MOS capacitance measurements », Solid-State Electronics, Vol. 24, pp: 661-664, 1981.
- [42] M. Zerst, Z. Agnew, “Relaxation effects at semiconductor-insulator interfaces”, Phys. Vol. 22, pp: 30, 1966.
- [43] K. S. Rabbani and D. R. Lamb, “On the analysis of pulsed MOS capacitance measurement”, Solid-State Electron., Vol. 21, pp. 1171–1173,. Sept. 1978.
- [44] Z. Radzinski, J. Honeycutt, and G. A. Rozgonyi, « minority-carrier lifetime analysis of silicon epitaxy and bulk crystals with nonuniformly distributed defects », IEEE Transactions on electron devices, Vol. ED-35, No. 1, pp : 80-84, January 1988.
- [45] F. A. Lindholm, J. J. Liou, A. Neugroschel, T. W. Jung, « determination of lifetime and surface recombination velocity of p-n junction solar cells and diodes by observing transients », IEEE Transactions on electron devices, Vol. ED-34, No. 2, pp : 277-285, February 1987.
- [46] S.C. Jain, « theory of photo induces open circuit voltage decay in a solar cell », Solid-State Electronics, Vol. 24, pp: 179-183, 1981.
- [47] J. E. Mahan, T. W. Ekstedt, R. I. Frank and R. Kaplow, “Measurement of Minority ... in Solar Cells from Photo-Induced Open Circuit Voltage Decay”, IEEE Trans. Electron Dev. Vol. ED-26, Issue 5, pp: 733, 1979.
- [48] B.R. Gossick, “On the Transient Behavior of Semiconductor Rectifiers,” J. Appl.Phys. Vol. 26, pp: 1356–1365, Nov. 1955.
- [49] S. R. Lederhandler and L. J. Giacoletto, “Measurement of Minority Carrier Lifetime and Surface Effects in Junction Devices”, Proc. IRE, Vol. 43, pp: 477-483, April 1955.

- [50] A. Vishnoi, R. Gopal, R. Dwivedi and S. K. Srivastava, « Studies of surface voltage and current transients in solar cells for accurate evaluation of minority carrier lifetime », *Solid-State Electronics*, Vol. 32, No. 1, pp: 661-664, 1981.
- [51] R. Gopal, R. Dwivedi and S. K. Srivastava, “Effect of Non uniform illumination on the photovoltaic decay characteristic of solar cells”. *IEEE Transactions on Electron Devices*", Vol. ED-33, Issue 6, pp: 802-809, 1986.
- [52] J. J. Liou, F. A. Lindholm, and D. C. Malocha, « determination of minority carrier lifetime and surface generation velocity by hysteresis pulsed C-V method », *Solid-State Electronics*, Vol. 23, pp: 513-514, 1980.
- [53] M. Zerst, Z. Agnew, “Relaxation effects at semiconductor-insulator interfaces”, *Phys.* Vol. 22, pp: 30, 1966.
- [54] D. K. Schroder, J. D. Whitfield, and C. J. Varker, « recombination lifetime using the pulsed MOS capacitor », *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. ED-31, No. 4, pp: 462-467, April 1984.
- [55] C. M. Colomb, S. A. Stockman, and G. E. Stillman, « minority carrier transport in carbon doped gallium arsenide », *Appl. Phys. Lett.* Vol 60, No. 1, pp: 65-67, 6 January 1992.
- [56] R. K. Ahrenkiel, D. J. Dunlavy, H. C. Hamaker, R. T. Green, C. R. Lewis, R. E. Hayes, and H. Fardi, “Time-of-Flight Studies of Minority-Carrier Diffusion in $Al_x Ga_{1-x}As$ Homojunctions”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 49, pp: 725, 1986.
- [57] M. L. Lovejoy, B. M. Keyes, M. E. Klausmeier-Brown, M. R. Melloch, R. K. Ahrenkiel, and M. S. Lundstrom, “Zero-Field Time-of-Flight Measurements of Electron Diffusion in P^+ -GaAs”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 30, Issue 2A, L135-L137, 1991.
- [58] R. K. Ahrenkiel, D. J. Dunlavy, D. Greenberg, J. Schlupmann, H. C. Hamaker, and H. F. MacMillan, “Electron Mobility in p-GaAs by Time of Flight”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 51, pp: 776, 1987.

- [59] M. P. Deshmukh, R. A. Kumar, and J. Nagaraju, « measurement of solar cell ac parameters using the time domain technique », *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 8, pp : 2732-2735, August 2004.
- [60] Engin Arslan, Yasemin Safak, Semsettin Altındal, Özgür Kelekçi, Ekmel Özbay, « Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGa_N/AlN/GaN heterostructures », *Journal of Non-Crystalline Solids* 356, pp : 1006–1011, 2010.
- [61] H. Bayhan, A. S. Kavasglu, « admittance and impedance spectroscopy on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells », *Turk. J. Phys.*, 27, pp: 529-535, 2003.
- [62] J. H. Scofield, « effets of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37 (2), pp: 217-233, May 1995.
- [63] R. A. Kumar, M. S. Suresh, and J. Nagaraju, « measurement of AC parameters of Gallium Arsenide (GaAs /Ge) solar cell by impedance spectroscopy », *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. 48, No. 9, pp: 2177-2179, September 2001.
- [64] Gokhan Sahin, Moustapha Dieng, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Moussa Ibra Ngom, Amary Thiam, Grégoire Sissoko, « Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination », *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, pp :1536-1543, 2015.
- [65] A. Diao, N. Thiam, M. Zoungrana, M. Ndiaye, G. Sahin and G. Sissoko, “Diffusion Coefficient in Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent Circuits”, *World Journal of Condensed Matter Physics*, Vol. 4, pp: 84-92, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013>
- [66] A. Dieng, I. Zerbo, M. Wade, A.S. Maiga and G. Sissoko, “Three-Dimensional Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell: The Influence of the Applied Magnetic Field on the Electrical Parameters”, *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 26, 2011. 095023.
- [67] J. Lauwaert, K. Decock, S. Khelifi, M. Burgelman, “A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol.94, pp: 966–970, 2010.
- [68] V.G. Karpov, D. Shvydka, U. Jayamaha, A.D. Compaan, Admittance spectroscopy revisited: single defect admittance and displacement current, *J. Appl. Phys.* Vol.94, Issue 9 5809–5813, pp: 2003.
- [69] S. Kumar, P.K. Singh, G.S. Chilana, “Study of silicon solar cell at different intensities of illumination and wavelengths using impedance spectroscopy”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, pp: 1881–1884, 2009.

[70] A.R. Moore, "Solar cell capacitance", RCA Review, vol. 36, pp: 551–565, 1975

[71] A.R. Moore, "Short-circuit capacitance of illuminated solar cells", Applied Physics Letters, vol. 27, Issue 1, pp: 26–29, 1975.

Chapitre II : Influence de la température sur la capacité de la photopile sous éclairage monochromatique

II.1. Introduction

La zone de charge d'espace d'une cellule solaire peut être assimilée à un condensateur plan appelé capacité de transition due à l'ionisation des charges fixes [1]. Lorsque la photopile est éclairée, la diffusion des porteurs minoritaires de charge crée une capacité de diffusion [2] dont l'épaisseur dépend de la vitesse de recombinaison à la jonction qui fixe le point de fonctionnement, du circuit ouvert au court-circuit [3, 4]. La photopile peut être étudiée en régimes statique [5, 6], ou en régime transitoire [7, 8] ou en régime dynamique fréquentiel [9, 10].

La capacité de diffusion a fait l'objet de plusieurs études en régime statique [11, 12] dans le but de déterminer le taux de dopage [13]. En régime transitoire l'extension de la zone de charge d'espace est obtenue [14]. En régime dynamique fréquentiel les paramètres de recombinaison en volume et en surface sont recherchés [15,16,17]. Il en est ainsi des paramètres électriques tels que les résistances série et shunt [18,19], la capacité [20,21] et la self inductance associés à chaque région de la photopile. Alors des modèles électriques équivalents [22] à la photopile sont établis pour différents domaines de fréquences d'excitation de la photopile.

Dans les conditions de fonctionnement de la photopile sous obscurité ou sous éclairage, la température influence les paramètres électriques et par conséquent le rendement de la photopile [23].

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet de la température ainsi que la longueur d'onde sur la capacité d'une photopile au silicium en régime statique sous éclairage monochromatique. La capacité $C_0(T)$ de la photopile fonctionnant en court-circuit et deux expressions du rendement de la capacité seront déterminées. En amont, à partir de l'équation de continuité, les expressions de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base et de la phototension seront déterminées. L'expression de la vitesse de recombinaison à la face arrière sera déterminée à partir de l'expression de la densité de photocourant. Nous allons étudier l'influence de la température et de la longueur sur : la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, la densité de photocourant, la vitesse de recombinaison à la face arrière et la phototension.

ETUDE THEORIQUE

La photopile considérée est de type $n^+ - p - p^+$ et sa structure est présentée à la figure 1.

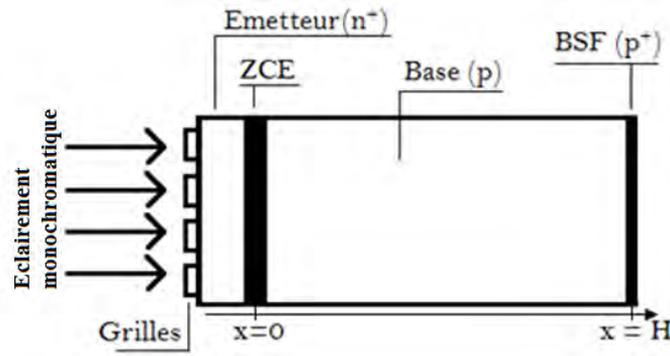


Figure 1: Structure d'une photopile de type n+-p-p+

Quand la photopile est éclairée, il y a création de paires électron-trou dans la base. La densité de porteurs minoritaires en excès dans la base est modélisée par l'équation de continuité suivante:

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{g(x)}{D} \quad (1)$$

Avec

$\delta(x)$ est la densité des électrons générés dans la base à la position x ,

$$g(x) = \phi(\lambda) \alpha(\lambda) (1 - R(\lambda)) e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2)$$

est le taux de génération des porteurs,

$\phi(\lambda)$ est le flux incident monochromatique de la lumière,

$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ ,

$R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ ,

$$(L(T))^2 = \tau D(T) \quad (3)$$

L est la longueur de diffusion des électrons dans la base, elle dépend de la température,

τ est la durée de vie des électrons dans la base. $D(T)$ est le coefficient de diffusion des électrons dans la base donnée par la relation d'Einstein comme suit

$$D(T) = \mu(T) \frac{k_b T}{q} \quad (4)$$

$$\mu(T) = 1,43 \cdot 10^9 T^{-2,42} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

$\mu(T)$ est le coefficient de mobilité des électrons [24],

k_b est la constante de Boltzmann,

q est la charge élémentaire de l'électron

L'équation (1) a pour solution générale

$$\delta(x, \lambda, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) - \frac{\phi(\lambda)\alpha(\lambda)(L(T))^2(1-R(\lambda))e^{(-\alpha(\lambda)x)}}{D(T)[(L(T))^2(\alpha(\lambda))^2 - 1]} \quad (6)$$

Les expressions de A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes:

i) A la jonction ($x = 0$)

$$\frac{\partial \delta(x, \lambda, T)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{S_f}{D(T)} \delta(x, \lambda, T) \Big|_{x=0} \quad (7)$$

ii) A la face arrière ($x = H$)

$$\frac{\partial \delta(x, \lambda, T)}{\partial x} \Big|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(T)} \delta(x, \lambda, T) \Big|_{x=H} \quad (8)$$

S_f est la vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires en excès, et aussi détermine le point de fonctionnement de la photopile [3,4].

S_b est la vitesse de recombinaison à la face arrière des porteurs minoritaires en excès [4].

Commençons notre étude par la représentation du taux de génération en fonction de la profondeur dans la base

Taux de génération en fonction de la profondeur

Les figures 2 et 3 sont le profil du taux de génération des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base.

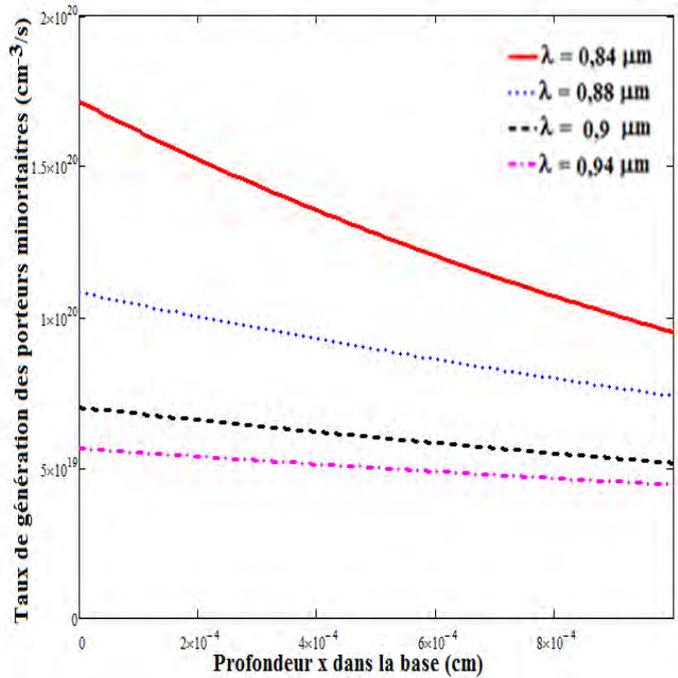
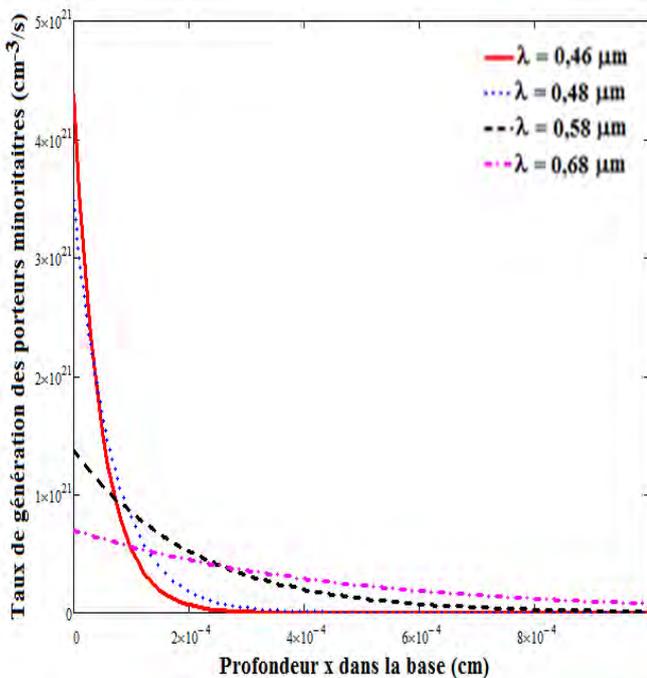


Figure 2: Taux de génération des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour de faibles longueurs d'onde.

Figure 3: Taux de génération des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour de grandes longueurs d'onde.

Nous constatons que (figures 2 et 3) la génération des porteurs minoritaires de charge diminue en profondeur. Une diminution très rapide et brusque (près de la jonction) du taux de génération des porteurs dans la base pour les faibles longueurs d'onde est constatée. Donc la génération des porteurs (figure 2) se fait à la surface. Cette diminution de la génération est très faible pour les grandes longueurs d'onde. Alors la génération des porteurs se fait à l'intérieur (dans la base) (figure 3).

Nous allons étudier à présent le comportement : de la longueur de diffusion, du coefficient de diffusion, de la mobilité des porteurs vis-à-vis de la température.

II.1a Effet de la température sur la longueur de diffusion, le coefficient de diffusion, sur la mobilité des porteurs et sur le coefficient de mobilité.

Le profil de la longueur de diffusion en fonction de la température est présenté par figure 4

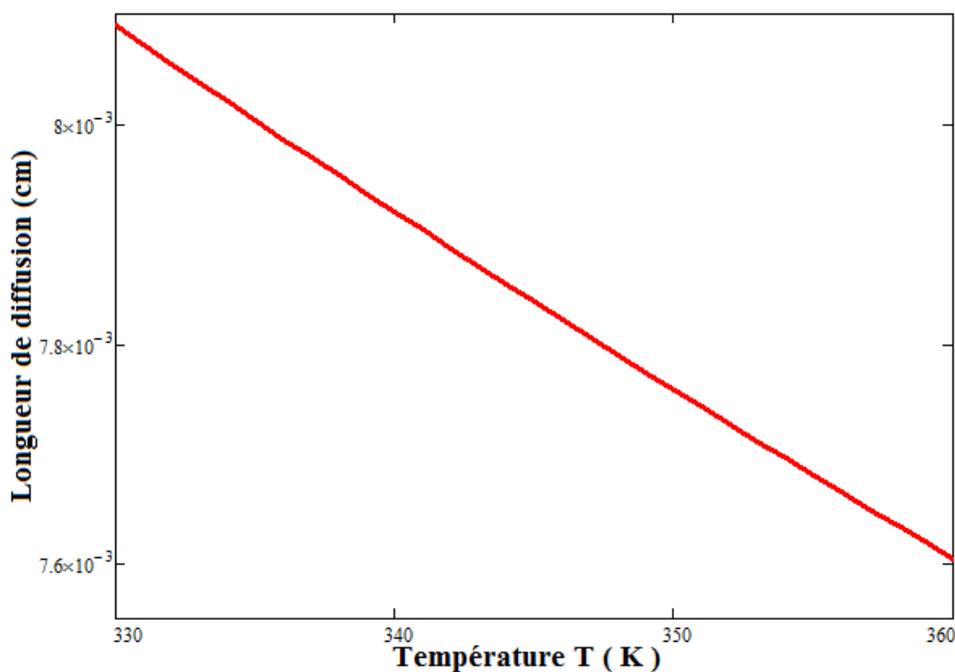


Figure 4: Coefficient de mobilité en fonction de la température.

Nous remarquons que lorsque la température augmente, la longueur de diffusion diminue. La longueur de diffusion est la distance parcourue par les porteurs minoritaires de charge en excès de la génération à la recombinaison, et l'augmentation de la température entraîne une agitation. L'agitation crée un mouvement de désordre au sein de la base alors les porteurs minoritaires de charge en excès générés auront du mal à se recombiner.

La figure 4 nous permet d'avoir une nouvelle forme d'équation de la longueur de diffusion. Cette forme d'équation est donnée par l'équation 9

$$L(T) = \xi T + \rho \quad (9)$$

Avec, $\xi = -1,30.10^{-5} \text{ cm.K}^{-1}$ la pente et $\rho = 0,012 \text{ cm}$ l'ordonnée à l'origine assimilable à une longueur de diffusion.

Etudions à présent le coefficient de mobilité en fonction de la température.

La figure 5 est le profil du coefficient de mobilité en fonction de la température.

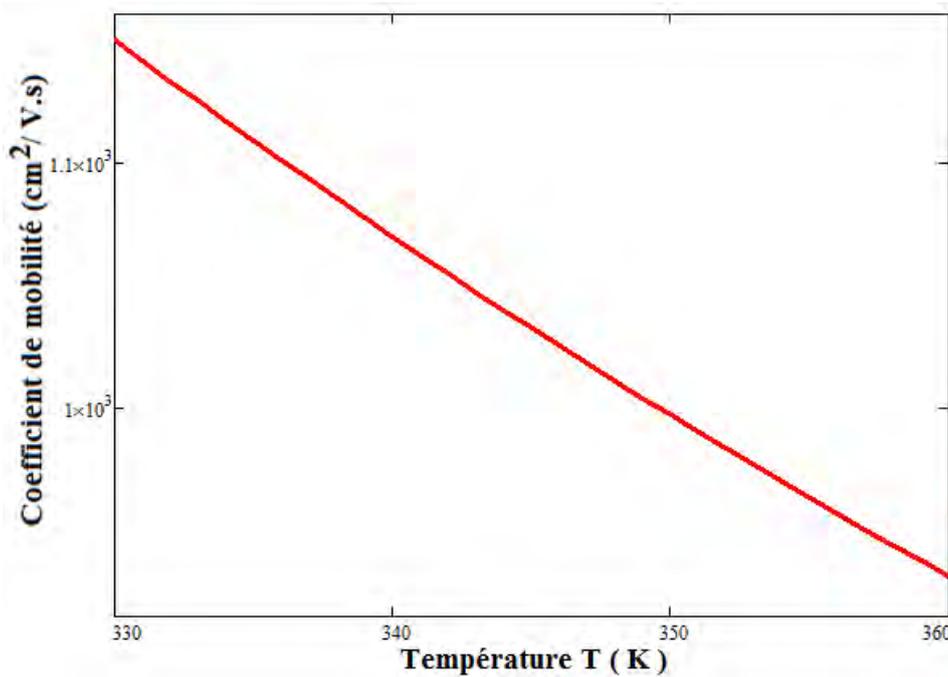


Figure 5: Coefficient de mobilité en fonction de la température.

Nous constatons que lorsque la température augmente, la mobilité des porteurs minoritaires de charges diminue.

En effet, la mobilité des porteurs traduit la facilité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le silicium et que l'augmentation de la température entraîne une agitation (mouvement général et désordonné) des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base.

La figure 5 permet de donner une nouvelle formule du coefficient de mobilité en fonction de la température. Cette formule est donnée par l'équation 10

$$\mu(T) = \Omega T + \hat{\lambda} \quad (10)$$

Avec, $\Omega = -7 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ la pente, $\hat{\lambda} = 3449,3 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ l'ordonnée à l'origine qui peut être considéré comme un coefficient de mobilité.

Maintenant nous allons étudier le coefficient de diffusion en fonction du coefficient de mobilité des porteurs minoritaires.

La figure 6 donne le profil du coefficient de diffusion en fonction du coefficient de mobilité des porteurs minoritaires.

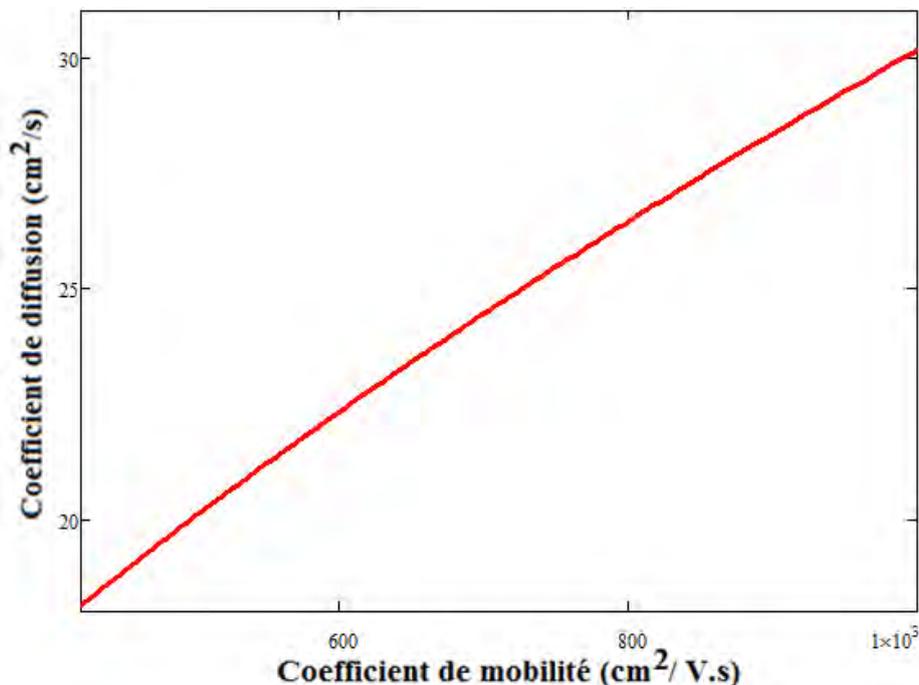


Figure 6: Coefficient de diffusion en fonction du coefficient de mobilité.

Nous apercevons l'augmentation du coefficient de diffusion lorsque le coefficient de mobilité augmente.

En effet comme le coefficient de mobilité traduit la facilité des porteurs minoritaires de charge a traversé la jonction émetteur-base pour être collecté par les grilles et participé à la production du courant. Donc le nombre de porteurs minoritaires qui traversent la jonction émetteur-base (coefficient de diffusion) est dépendant du coefficient de mobilité.

À partir de la figure 6 nous avons obtenu une nouvelle expression du coefficient de diffusion en fonction du coefficient de mobilité.

Cette nouvelle expression est donnée par l'équation 11

$$D(T) = \wp \mu(T) + \mathfrak{I} \quad (11)$$

Avec, $\wp = 0,02 \text{ V}^{-1}$ la pente et $\mathfrak{I} = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ l'ordonnée à l'origine qui est assimilable à un coefficient de diffusion.

Etudions maintenant l'influence de la température sur le coefficient de diffusion.

La figure 7 présente le profil du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charges en fonction de la température.

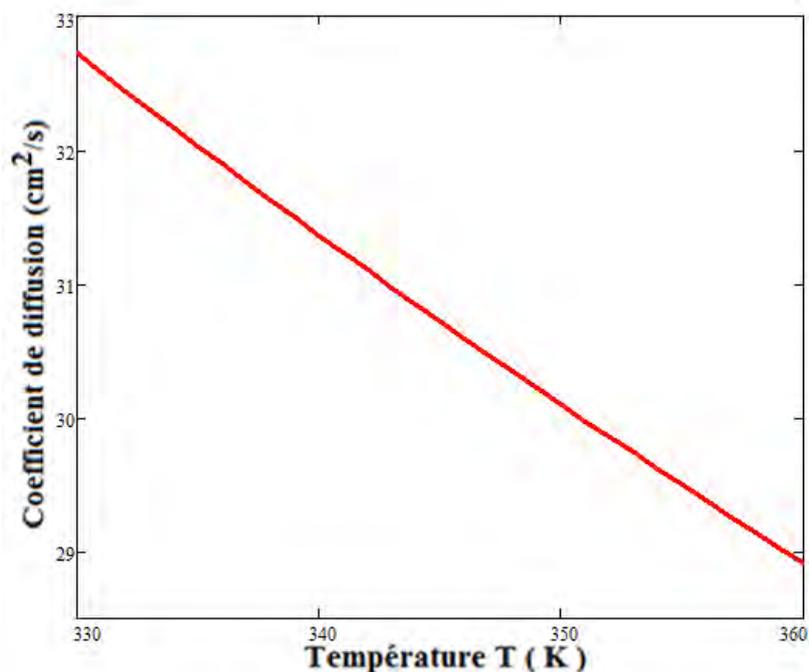


Figure 7: Coefficient de diffusion en fonction de la température.

Nous remarquons que la diminution de la température engendre l'augmentation du nombre de porteurs minoritaires diffusés.

Ceci peut s'expliquer par le fait que: comme le coefficient de mobilité est proportionnel au coefficient de diffusion et que le coefficient de mobilité est inversement proportionnel à la température ; alors le coefficient de diffusion l'est par rapport à la température.

Après avoir étudié le comportement : de la longueur de diffusion, du coefficient de diffusion, de la mobilité des porteurs vis-à-vis de la température. Nous allons voir le comportement : du coefficient d'absorption, de la profondeur de pénétration par rapport à la longueur d'onde.

Avec la figure 7 nous avons obtenu une autre expression du coefficient de diffusion en fonction de la température. Cette nouvelle forme d'expression est donnée par l'équation (12).

$$D(T) = kT + \Theta \tag{12}$$

Avec,

$$k = -0,12 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ la pente et } \Theta = 72,28 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ l'ordonnée à l'origine.}$$

II.1b Effet de la longueur d'onde sur le coefficient d'absorption et la profondeur de pénétration des porteurs

La figure 8 est le profil du logarithme coefficient d'absorption et du logarithme de la profondeur de pénétration en fonction de la longueur d'onde.

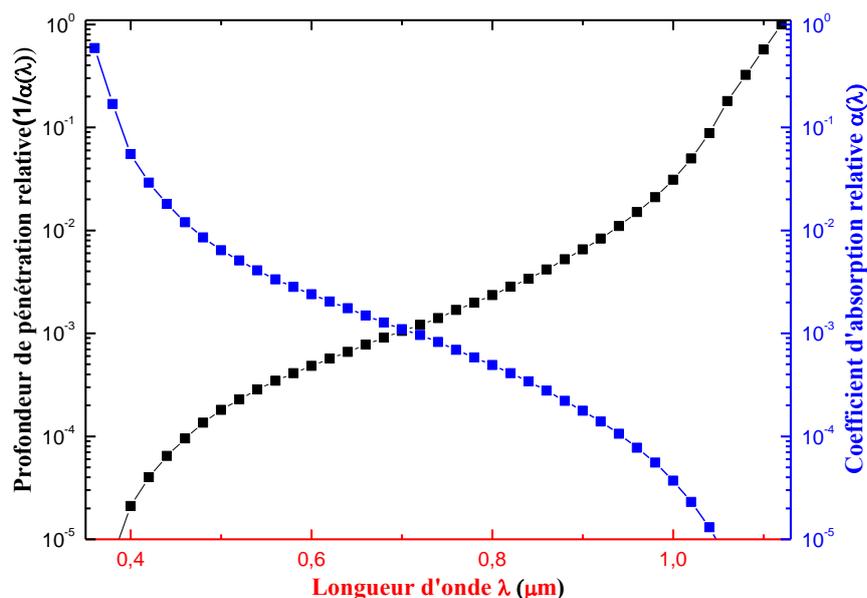


Figure 8: Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration en fonction de la longueur.

Nous constatons que lorsque la longueur d'onde augmente, la profondeur de pénétration $1/\alpha(\lambda)$ augmente en même temps le coefficient d'absorption diminue. Alors les porteurs seront générés plus en volume lorsque la longueur d'onde augmente.

Nous allons étudier par la suite l'influence de la température et de la longueur d'onde sur la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile en circuit ouvert ou en court-circuit.

II.2 Densité des porteurs minoritaires de charge

II.2.1 Effet de la température sur la densité des porteurs minoritaires de charge

Etudions d'abord la densité des porteurs minoritaire en fonction de la profondeur lorsque la photopile fonctionne en circuit ouvert.

Les profils de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès quand la photopile est en situation de circuit ouvert en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la température sont présentés par les figure 9 et 10.

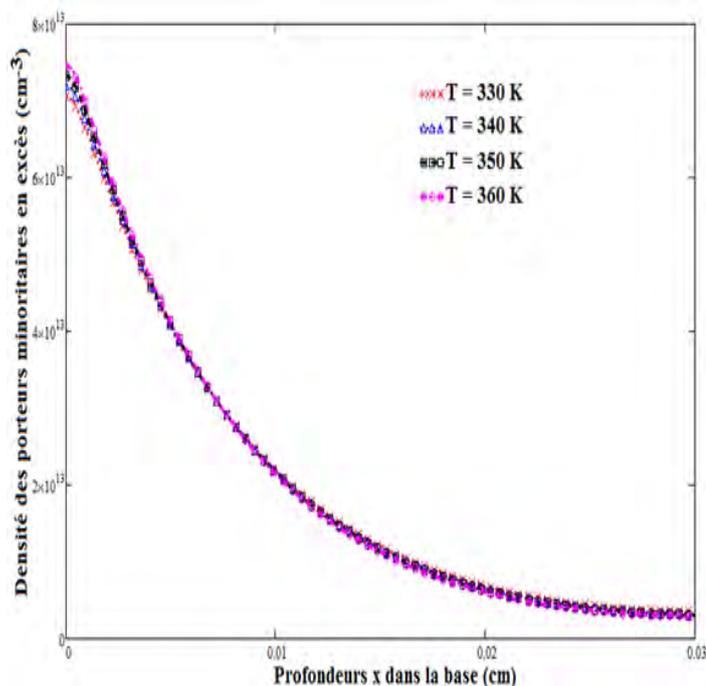


Figure 9: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=2.10^2$ cm/s, $\lambda = 0,68$ μm , photopile en circuit ouvert.

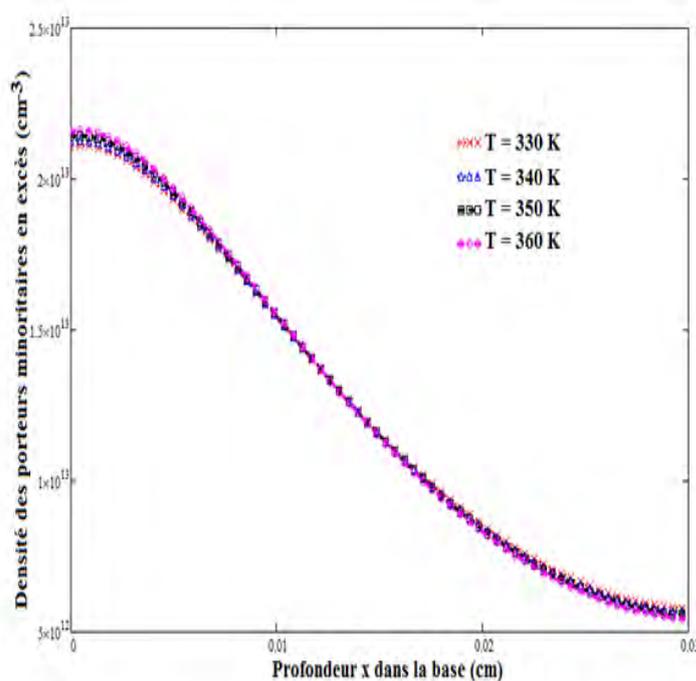


Figure 10: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=2.10^2$ cm/s, $\lambda = 0,98$ μm , photopile en circuit ouvert.

Les figures 9 et 10 présentent deux types de gradient :

- i) Un gradient nul, point de densité maximale qui est l'abscisse $X_{co}(T,\lambda)$. Ce gradient permet un regroupement des porteurs minoritaires de charge et indique en ce point la barrière de stockage des porteurs de charge.
- ii) Un gradient négatif qui empêche les porteurs minoritaires de charge de traverser la barrière. Ces porteurs vont se recombiner en volume dans la base en surface arrière.

Nous constatons aussi que près de la jonction, l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès. Cela s'explique par le fait l'augmentation de la température provoque une agitation (mouvement désordonné) des porteurs minoritaires. Or pour traverser la jonction émetteur-base, les porteurs minoritaires doivent avoir un mouvement dans un sens unique donc ordonné. Alors avec l'augmentation de la température ces porteurs n'auront pas ce mouvement ordonné. Par conséquent resteront dans la base.

Loin de la jonction c'est-à-dire à l'intérieur et près de la surface arrière, nous remarquons que lorsque la température augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans

la base diminue. Cela peut s'expliquer comme suit : à la surface arrière il existe un champ électrique de la jonction p-p⁺ (base-surface arrière). Ce champ électrique permet de renvoyer les porteurs générés près de la surface arrière vers la jonction émetteur-base et ce renvoi des porteurs doit être un mouvement ordonné. Cependant l'augmentation de la température crée un mouvement désordonné empêchant ainsi le renvoi des porteurs vers la jonction émetteur-base. Donc ces porteurs resteront en volume. Les recombinaisons en volume étant très intenses, l'emporteront sur l'agitation thermique. Ce qui est dû à la diminution de la densité des porteurs avec l'augmentation de la température.

Étudions maintenant la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur lorsque la photopile fonctionne en court-circuit.

Les figures 11 et 12 montrent la densité des porteurs minoritaires de charge lorsque la photopile est en situation de court-circuit en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la température.

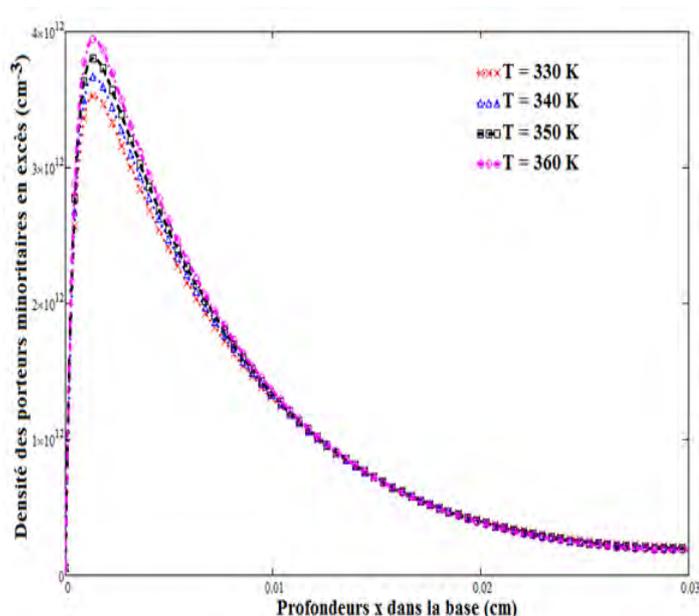


Figure 11: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=6.10^6$ cm/s, $\lambda=0,68$ μ m, photopile en court-circuit.

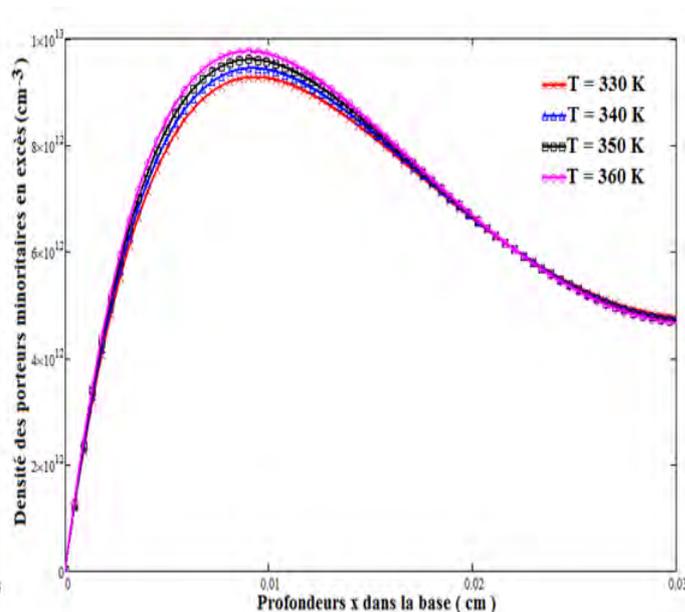


Figure 12: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température, $S_f=6.10^6$ cm/s, $\lambda=0,98$ μ m, photopile en court-circuit.

Les figures 11 et 12 présentent trois types de gradients :

i) le gradient positif permet la traversée des porteurs minoritaires générés dans cette zone. Le gradient positif de la figure 11 (longueur d'onde faible) est plus proche de la jonction que celui de la figure 12 (grande longueur d'onde).

ii) le gradient nul, point de densité maximale correspondant à l'abscisse $X_{cc}(T, \lambda)$, permet une accumulation des porteurs minoritaires de charge et définit en ce point la barrière de stockage des porteurs de charge.

iii) le gradient négatif empêche les porteurs minoritaires de charge de passer la barrière. Ils subiront des recombinaisons en volume dans la base en surface arrière.

La variation de température est plus sensible au point de densité maximale correspondant à l'abscisse $X_{cc}(T, \lambda)$. Le déplacement du maximum en profondeur lorsque la température augmente, entraîne un élargissement de la zone de charge d'espace.

Lorsque la température augmente, la densité de porteurs minoritaires de charge en excès diminue.

Après l'influence de la température sur la densité des porteurs minoritaires, étudions l'influence de la longueur d'onde sur cette densité.

II.2.2 Effet de la longueur d'onde sur la densité des porteurs minoritaires de charge

Les figures 13 et 14 sont respectivement les densités de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur dans la base pour faibles et grandes valeurs de la longueur d'onde lorsque la photopile est en circuit ouvert.

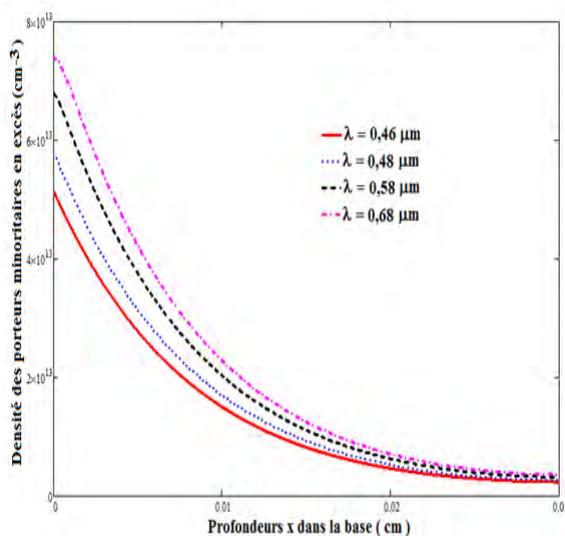


Figure 13: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f = 10 \text{ cm/s}$ (circuit ouvert) $T = 330 \text{ K}$.

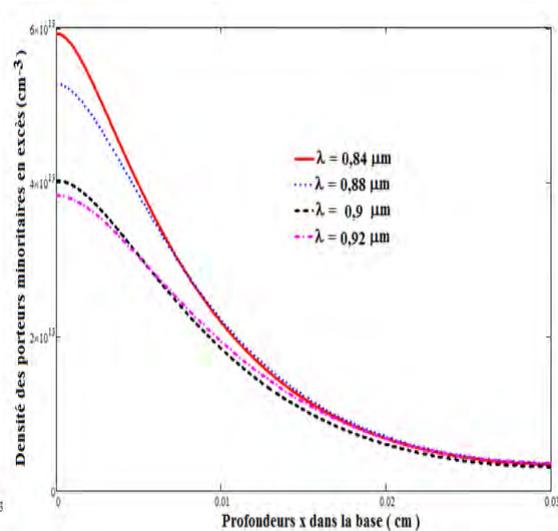


Figure 14: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f = 10 \text{ cm/s}$ (circuit ouvert) $T = 330 \text{ K}$.

Nous constatons deux parties sur les figures 13 et 14:

Une, où il ya accumulation de porteurs minoritaires de charge correspondant au gradient nul. Ce gradient nul constitue une barrière de stockage. Ce gradient nul correspond aussi à la densité maximale des porteurs minoritaires de charge d'abscisse $X_{co}(T)_\lambda$;

Une, décroissante qui empêche le passage des porteurs minoritaires de charge à la barrière. Ces porteurs subiront des recombinaisons en volume et en surface arrière. Cette partie décroissante correspond au gradient négatif.

Lorsque les faibles valeurs de la longueur d'onde augmentent, la densité des porteurs minoritaires de charge augmente. Ainsi les porteurs sont générés près de la jonction. Le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ du silicium est élevé. Cette grande $\alpha(\lambda)$ dû à la présence de dislocations, de défauts près de la jonction. Ces dislocations sont le siège de nombreuses recombinaisons de porteurs minoritaires de charge. Donc ces derniers ne pourront plus traverser la jonction pour être collecter et produire du courant (figure 3). D'autre part, l'augmentation des grandes valeurs de la longueur entraine une diminution de la densité des porteurs minoritaires. Ainsi les porteurs minoritaires de charge sont créés à l'interieur ou en volume dans la base. Le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ du silicium est faible. Alors les porteurs minoritaires auront la change de traverser la jonction pour être collecter.

Les figures 15 et 16 sont respectivement les densités de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur dans la base pour faibles et grandes valeurs de la longueur d'onde lorsque la photopile est en court-circuit.

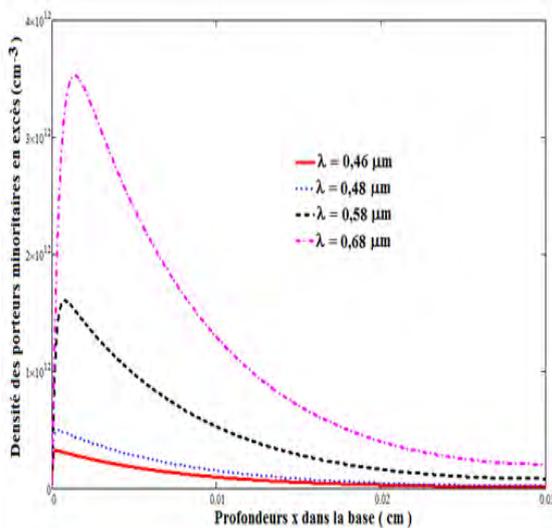


Figure 15: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f = 6.10^6$ cm/s (court-circuit) $T = 330$ K.

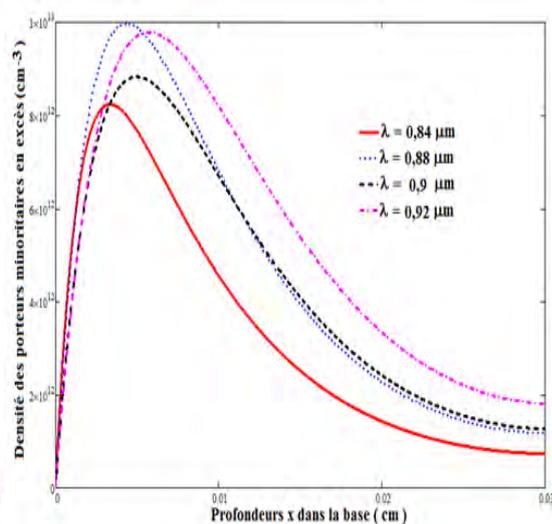


Figure 16: Densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde et pour $S_f = 6.10^6$ cm/s (court-circuit) $T = 330$ K.

Nous constatons que pour les faibles longueurs d'onde (figure 15) les gradients positif et nul sont près de la jonction. Pour les grandes longueurs d'onde les gradients positif et nul sont à l'intérieur de la base (figure 16).

II.2.3 Effet du point de fonctionnement sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge

Les figures 17 et 18 suivantes sont les densités relatives de porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différents point de fonctionnement de la photopile.

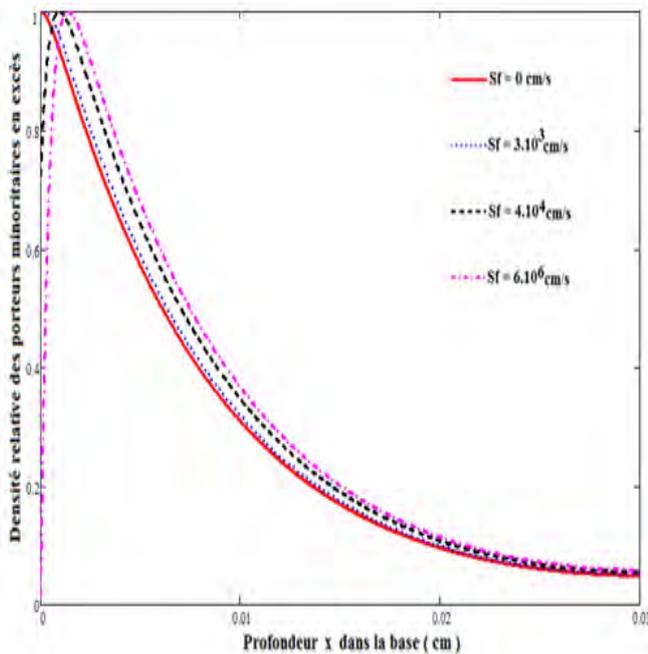


Figure 17: Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison et pour de faible valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,68 \mu\text{m}$) $T = 330 \text{ K}$.

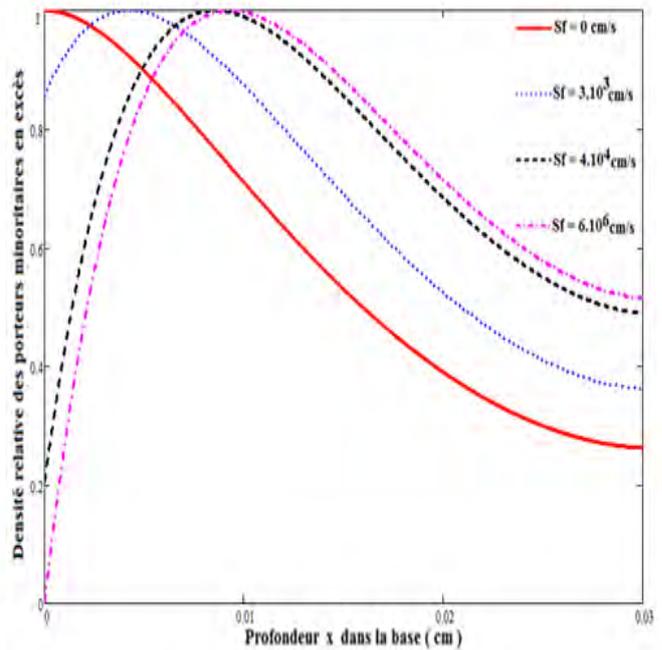


Figure 18: Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur x pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison et pour de grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T = 330 \text{ K}$.

Le tracé de la densité relative (figure 17 et 18) des porteurs minoritaires de charge en excès nous renseigne sur le comportement (rétrécissement ou extension) de la zone de charge d'espace (ZCE) qui est assimilée à un condensateur plan.

Nous observons pour une faible longueur d'onde (figure 17) comme pour une grande longueur d'onde (figure 18), les maximums de la densité des porteurs minoritaires de charge se déplacent en profondeur respectivement du circuit ouvert ($S_f = 0 \text{ cm/s}$) au court-circuit ($S_f = 6.10^6 \text{ cm/s}$). $S_f = 0 \text{ cm/s}$ correspond une réduction de la ZCE et $S_f = 6.10^6 \text{ cm/s}$ à une extension de la ZCE. Pour une faible longueur d'onde les maximums sont observés près de la jonction émetteur-base alors que pour une grande longueur d'onde ces maximums sont plus en profondeur.

Le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base est présenté à la figure 19 lorsque la photopile fonctionne en court-circuit et en circuit ouvert.

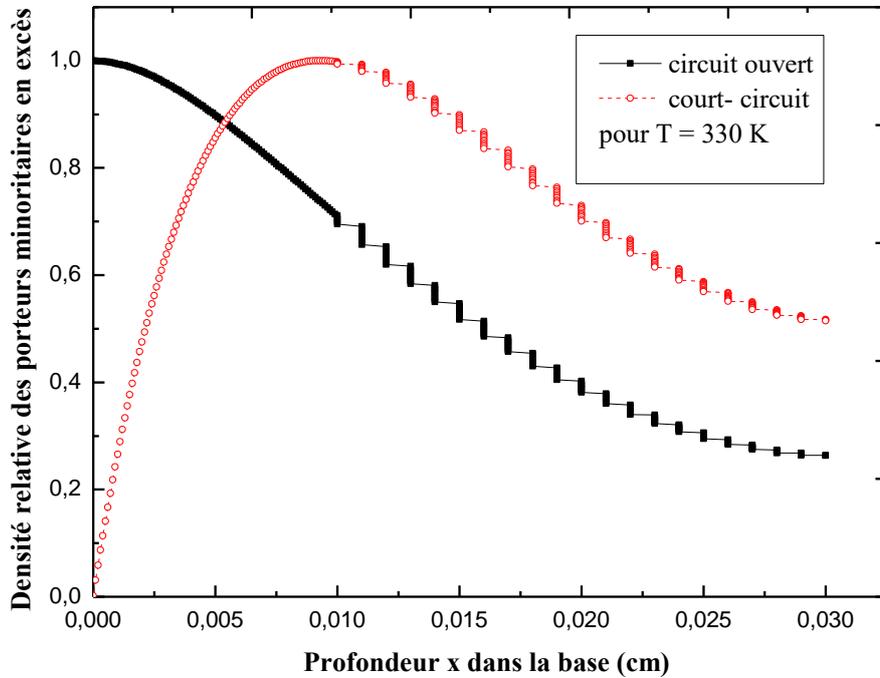


Figure 19: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert et en court-circuit en fonction de la profondeur ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T = 330\text{K}$

$X_{co}(T)_\lambda$ est l'abscisse du maximum de la densité relative des porteurs de charges minoritaires en excès lorsque la photopile fonctionne en circuit ouvert.

$X_{cc}(T)_\lambda$ est l'abscisse du maximum de la densité relative des porteurs de charges minoritaires en excès quand la photopile fonctionne en court-circuit.

Les abscisses $X_{co, \lambda}(T)$ et $X_{cc, \lambda}(T)$, nous permettent de déterminer le rendement $\eta_\lambda(T)$ de la capacité de la photopile sous la forme [12].

$$\eta_\lambda(T) = 1 - \frac{X_{co\lambda}(T)}{X_{cc\lambda}(T)} \quad (13)$$

Il peut être étudié en comparant deux abscisses du maximum de la densité relative à partir du modèle de la capacité d'un condensateur plan $C = \frac{\epsilon S}{X}$

Comme la valeur de $X_{co\lambda}(T)$ est faible devant celle de $X_{cc, \lambda}(T)$, l'étude du rendement de la capacité se résume à celle de l'abscisse $X_{cc\lambda}(T)$.

II.2.4 Effet de la température sur le point de fonctionnement de la photopile

a. Circuit ouvert

Les figures 20, 21, 22 et 23 indiquent le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base pour différentes températures de la photopile en circuit ouvert

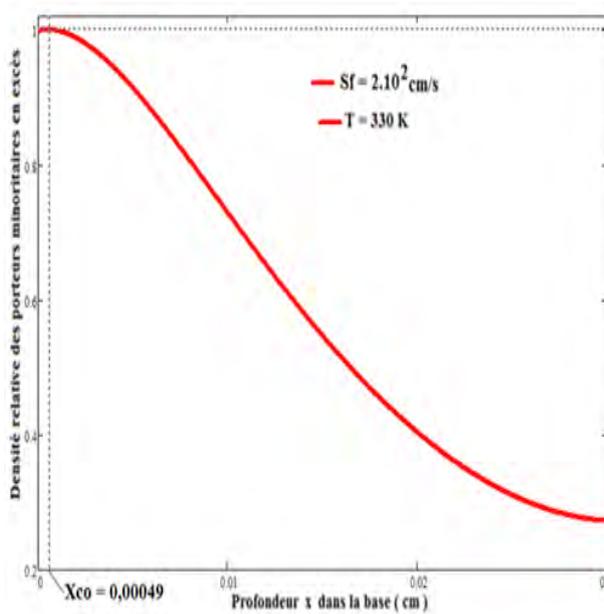


Figure 20: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T = 330 \text{ K}$.

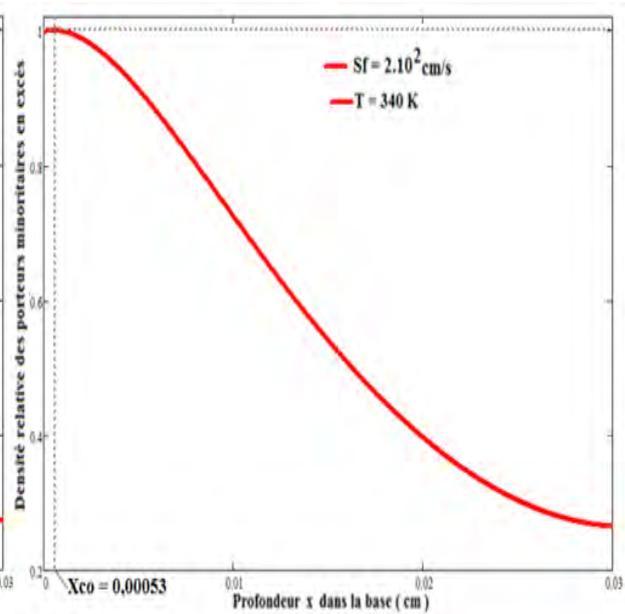


Figure 21: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T = 340 \text{ K}$.

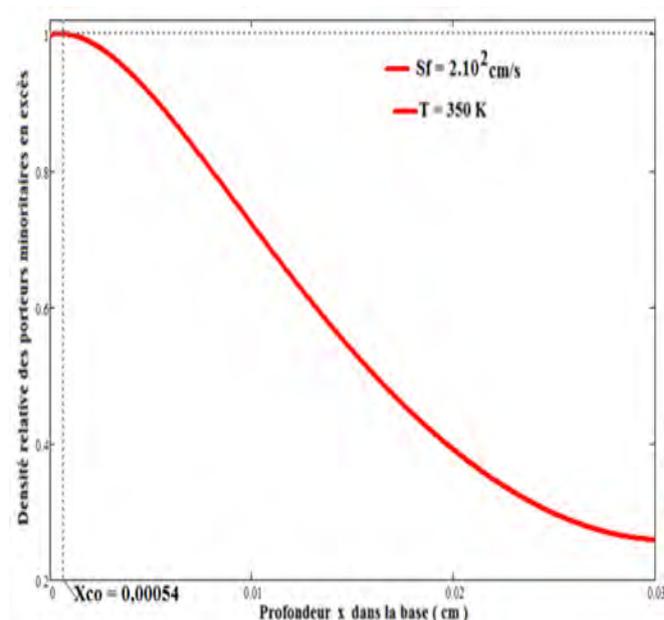


Figure 22: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T = 350 \text{ K}$.

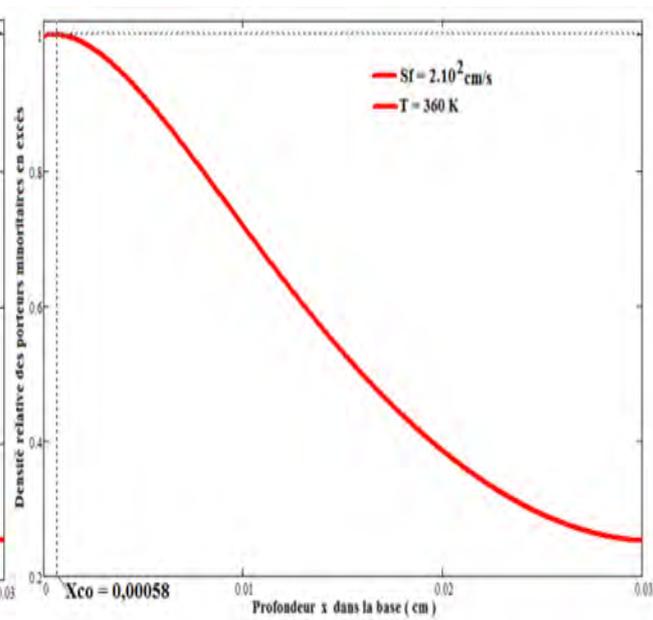


Figure 23: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T = 360 \text{ K}$.

Les 20, 21, 22, 23 ont permis d'établir le tableau 1.

Le tableau 1 représente les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace $X_{co\lambda}$ avec leurs températures correspondant pour une grande longueur d'onde.

Tableau 1: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert $X_{co\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$X_{co\lambda}(T)$ (cm)	$\lambda(\mu\text{m})$
330	0,00049	0,98
340	0,00053	0,98
350	0,00054	0,98
360	0,00058	0,98

Nous obtenons la figure 24 de $X_{co\lambda}(T)$ en fonction de T en utilisant le tableau 1

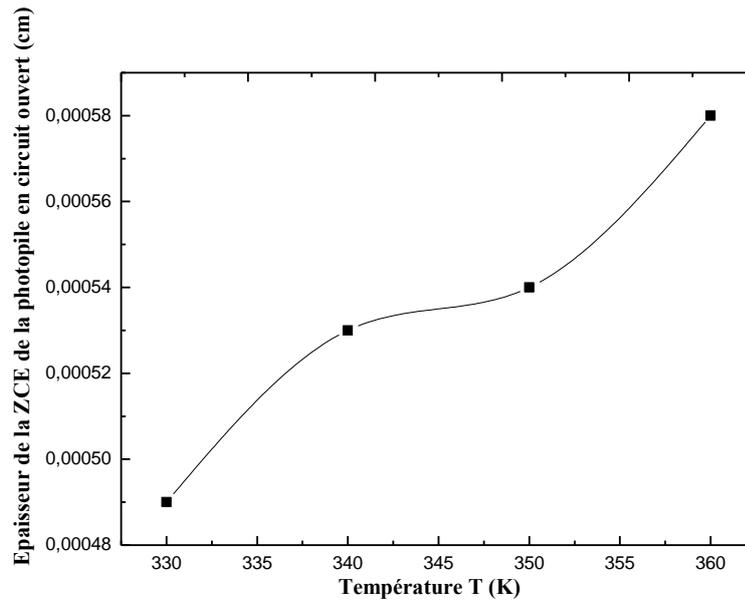


Figure 24: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en circuit ouvert en fonction de la température $\lambda= 0,98 \mu\text{m}$.

Nous constatons que lorsque la température augmente l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert augmente.

Après avoir étudié l'influence de la température sur le point de fonctionnement de la photopile en circuit ouvert, nous allons faire le même travail pour la photopile en court-circuit.

a. Court-circuit

Les figures 25, 26, 27 et 28 représentent le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base de la photopile en court-circuit pour différentes températures

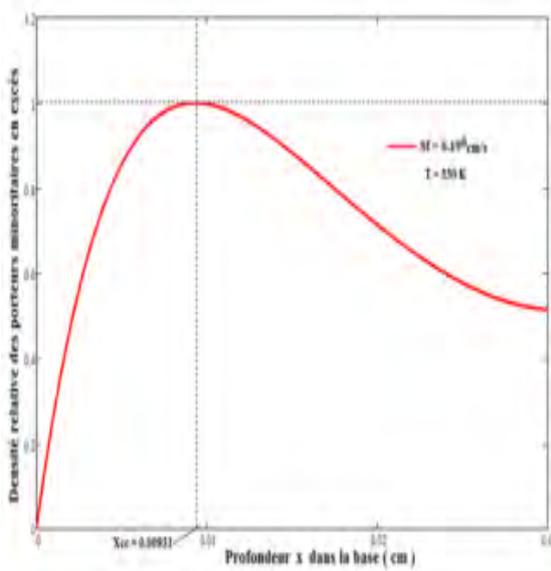


Figure 25: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$), $T=330\text{K}$.

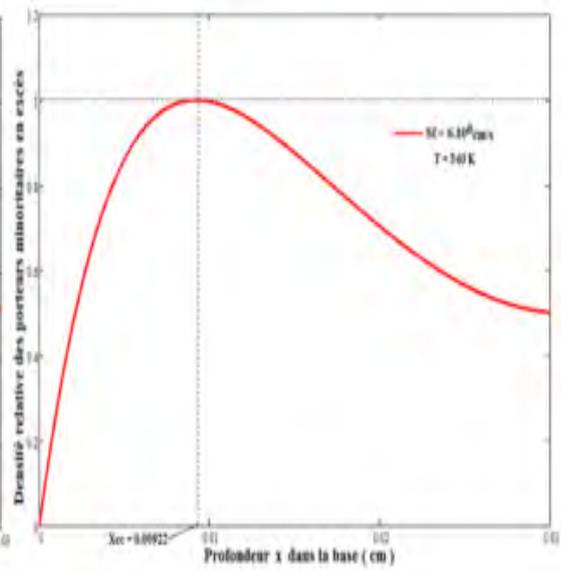


Figure 26 : Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$). $T=340\text{K}$.

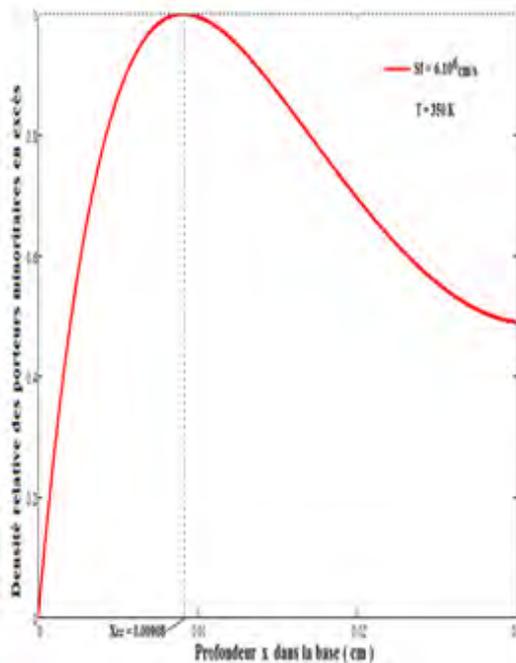


Figure 27: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$). $T=350\text{K}$.

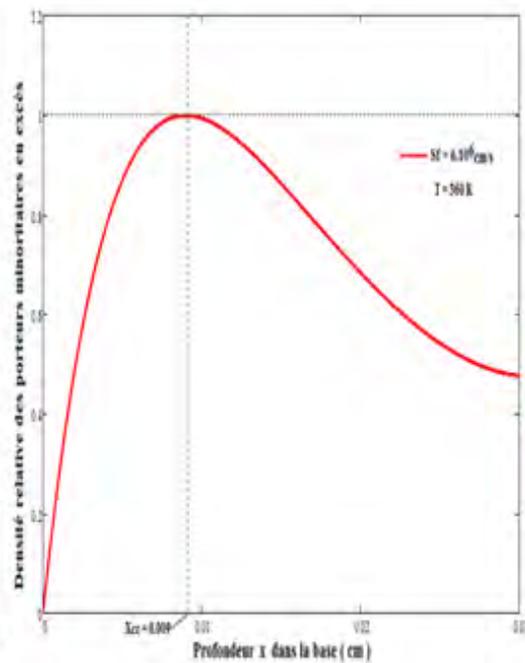


Figure 28: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une grande valeur de la longueur d'onde ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$). $T=360\text{K}$.

A partir des figures 25, 26, 27, 28, nous obtenons le tableau 2

Le tableau 2 donne les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace $X_{cc\lambda}$ tirées sur les courbes des figures 25, 26, 27, 28.

Tableau 2: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$X_{cc\lambda}(T)$ (cm)	$\lambda(\mu\text{m})$
330	0,00931	0,98
340	0,00922	0,98
350	0,00908	0,98
360	0,009	0,98

Nous obtenons la figure 29 de $X_{cc\lambda}(T)$ en fonction de T en utilisant le tableau 2

Le profil de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit en fonction de la température est donné par la figure 29.

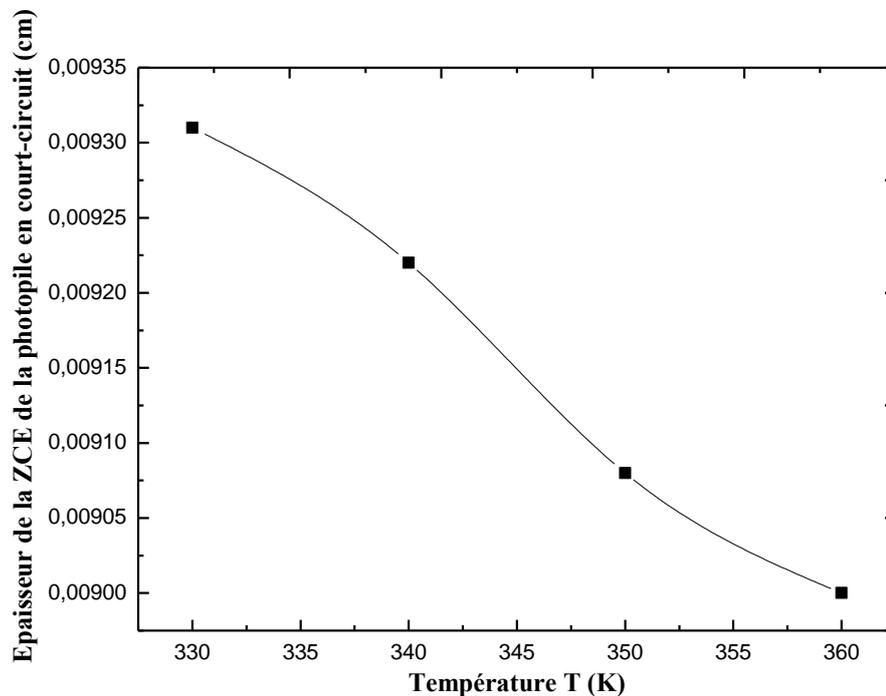


Figure 29: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en court-circuit en fonction de la température $\lambda= 0,98 \mu\text{m}$.

Nous constatons que l'augmentation de la température entraîne une diminution de l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile en court-circuit. Donc une réduction de la traversée des porteurs minoritaires de charge dans la base au niveau de la jonction vers l'émetteur pour être collectée par les grilles. Parce que l'agitation thermique provoque un mouvement désordonné des porteurs minoritaires de charge. Donc il n'y aura plus de déplacement ordonné des porteurs minoritaires de charge de la base vers l'émetteur, de l'émetteur vers les grilles. D'où l'augmentation des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base.

Après avoir étudié l'influence de la température sur le point de fonctionnement de la photopile, nous allons étudier l'influence de la longueur d'onde sur le point de fonctionnement de la photopile.

II.2.5 Effet de la longueur d'onde sur le point de fonctionnement de la photopile

a. Circuit ouvert

Les figures 30, 31, 32 et 33 indiquent le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base de la photopile en circuit ouvert pour les faibles valeurs de la longueur.

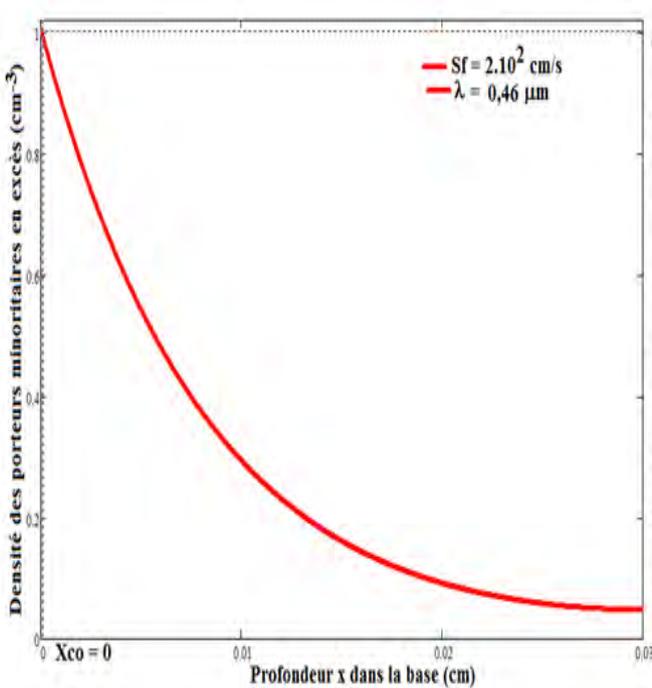


Figure 30 : Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330K$.

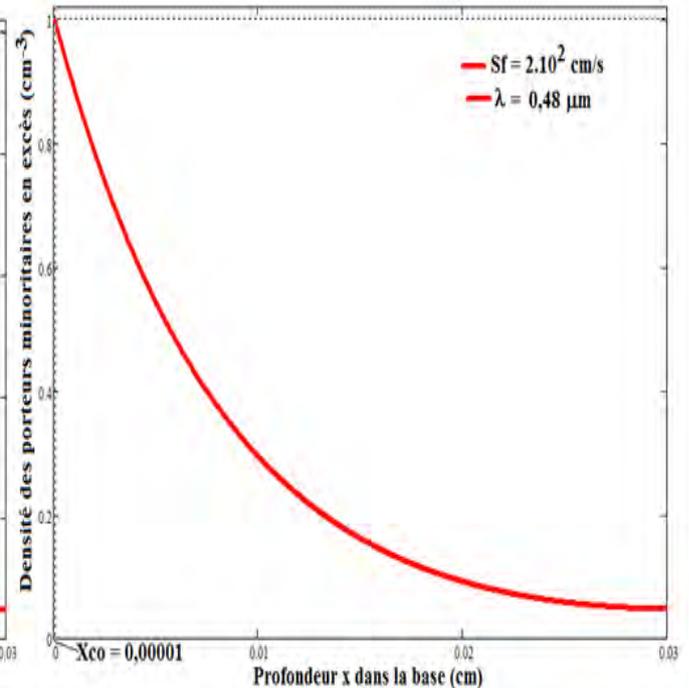


Figure 31: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température $T = 330K$.

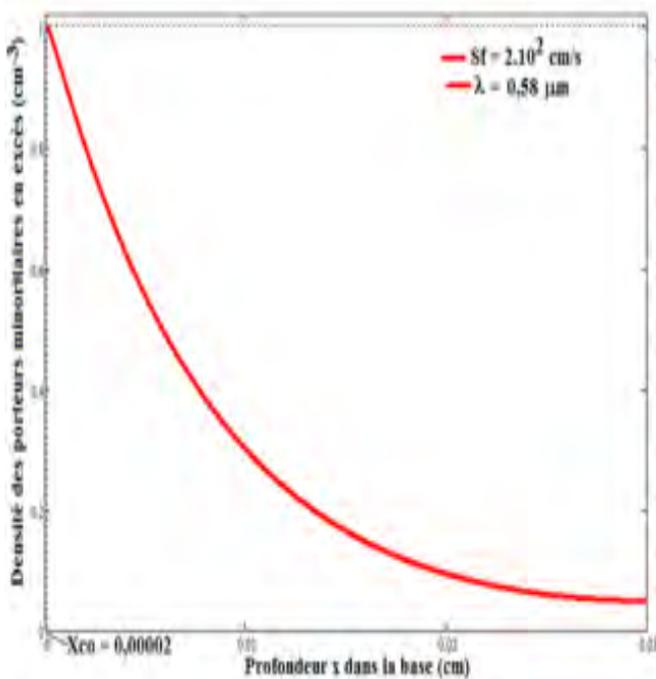


Figure 32: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330K

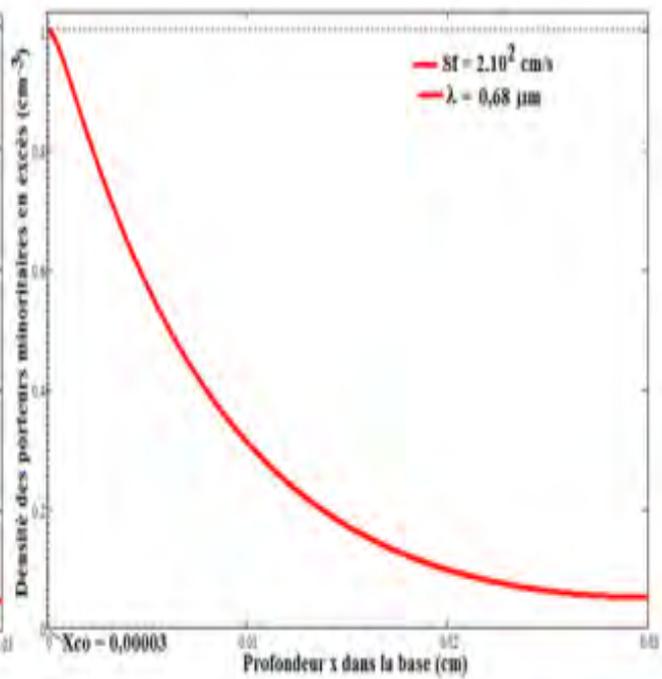


Figure 33: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330K

Les figures 30, 31, 32, 33 ont permis de déduire le tableau 3

Le tableau 3 donne les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace Xco.

Tableau 3: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert $X_{co\lambda}(T)$ avec leurs longueurs d'onde respectives.

T(K)	$X_{co\lambda}(T)$ (cm)	$\lambda(\mu\text{m})$
330	0	0,46
330	0,00001	0,48
330	0,00002	0,58
330	0,00003	0,68

Nous obtenons la figure 34 de $X_{co\lambda}(T)$ en fonction des faibles valeurs de la longueur d'onde en utilisant le tableau 3.

La figure 34 représente le profil de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert en fonction de la des faibles valeurs de la longueur d'onde.

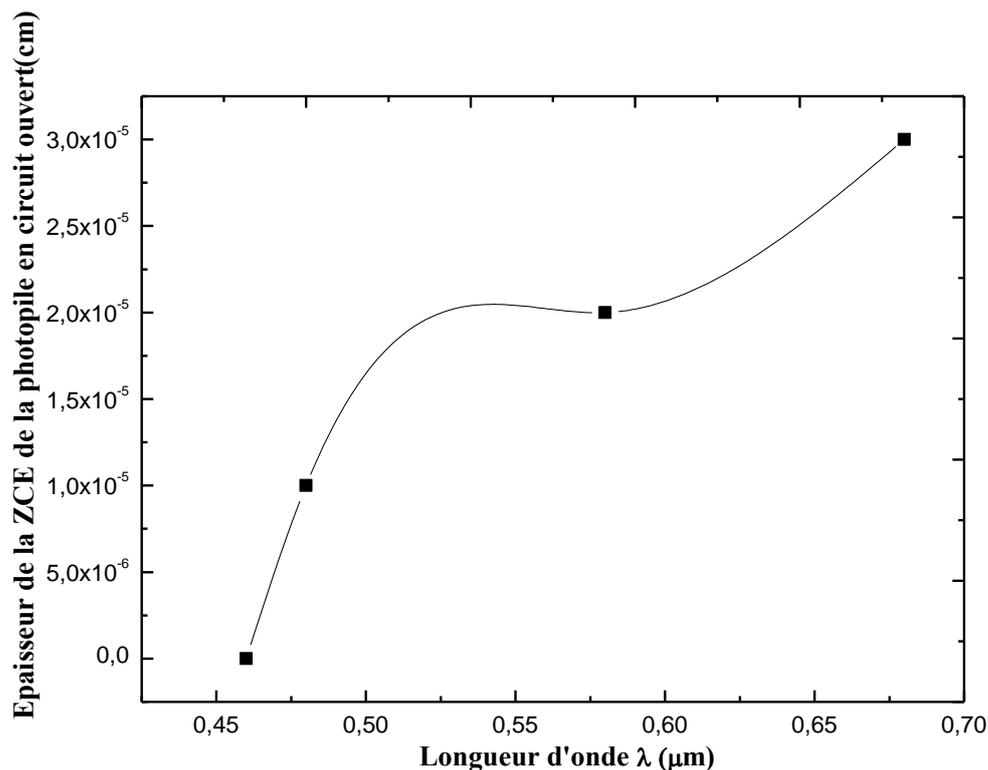


Figure 34: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en circuit ouvert en fonction des faibles valeurs de la longueur d'onde T = 330 K.

Nous observons une légère augmentation de la zone de charge d'espace lorsque la longueur d'onde augmente.

Après avoir vu l'influence des faibles longueurs d'onde sur le point de fonctionnement de la photopile en circuit ouvert, nous allons faire le même travail pour grandes longueurs d'onde.

Les figures 35, 36, 37 et 38 donnent le profil de la densité des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base de la photopile en circuit ouvert pour les grandes valeurs de la longueur.

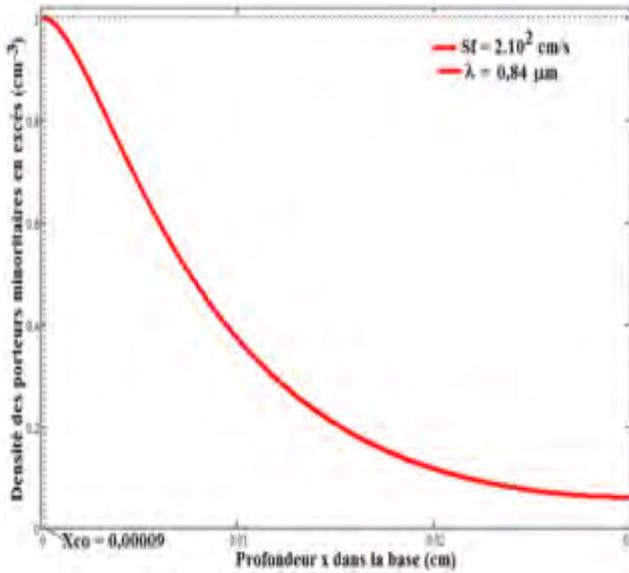


Figure 35: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

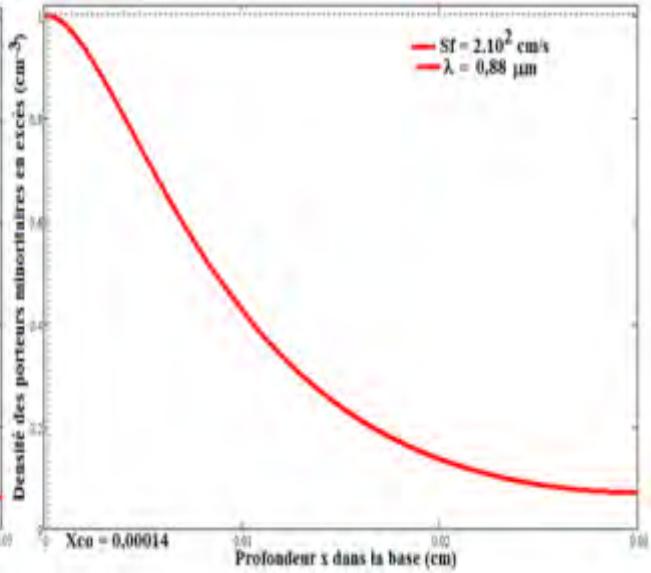


Figure 36: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

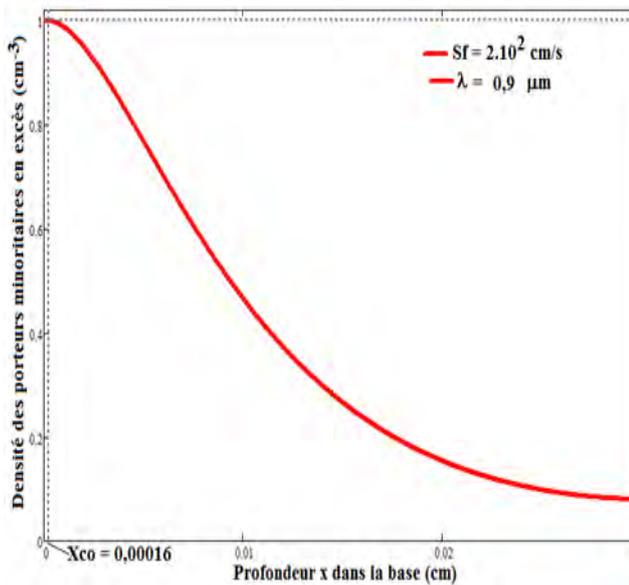


Figure 37: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

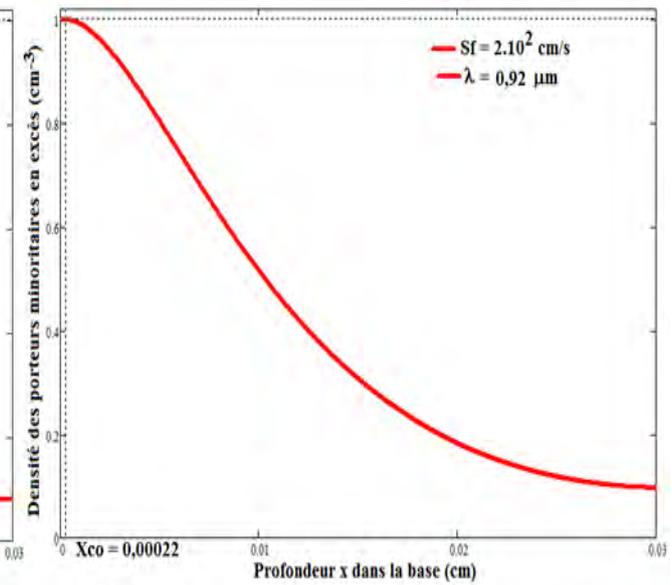


Figure 38: Densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

Les figures 35, 36, 37, 38 ont permis de déduire le tableau 4

Le tableau 4 donne les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace Xco.

Tableau 4: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert $X_{co\lambda}(T)$ avec leurs longueurs d'onde correspondantes.

T(K)	$X_{co\lambda}(T)$ (cm)	$\lambda(\mu\text{m})$
330	0,00009	0,84
330	0,00014	0,88
330	0,00016	0,9
330	0,00022	0,92

Nous obtenons la figure 39 de $X_{co\lambda}(T)$ en utilisant le tableau 4

La figure 39 donne le profil de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert en fonction des grandes valeurs de la longueur.

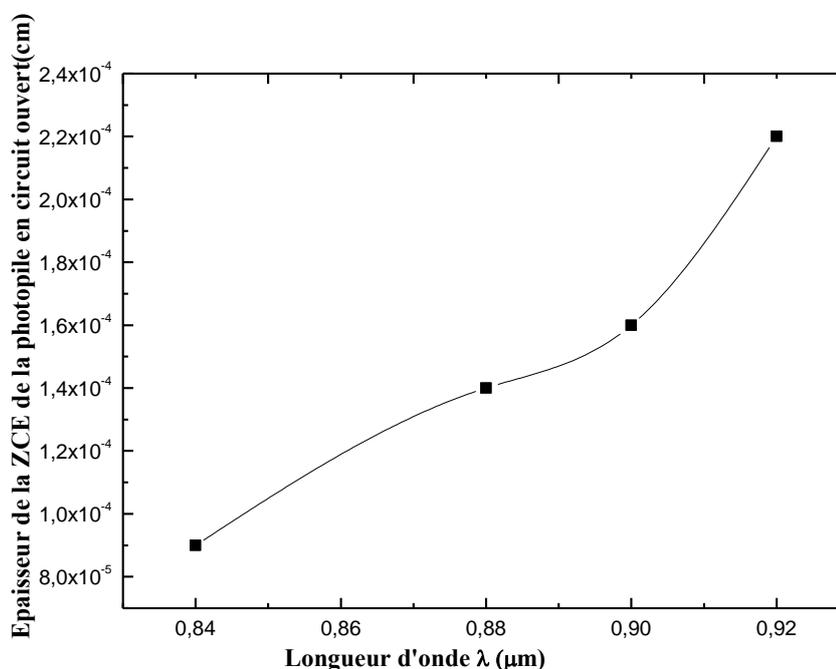


Figure 39: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en circuit ouvert en fonction des grandes valeurs de la longueur. T = 330 K.

Nous constatons une augmentation de l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile en circuit ouvert lorsque la longueur d'onde augmente.

Alors pour une photopile en situation de circuit ouvert nous avons certes une réduction de la zone de charge d'espace (ZCE). Cependant pour les faibles comme pour les grandes longueurs d'onde, lorsque cette dernière augmente nous observons une légère augmentation de la ZCE. Cette légère augmentation de la ZCE est plus importante pour les grandes longueurs d'onde.

b. Court-circuit

Les figures 40, 41, 42 et 43 donnent le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base de la photopile en court-circuit pour les faibles valeurs de la longueur.

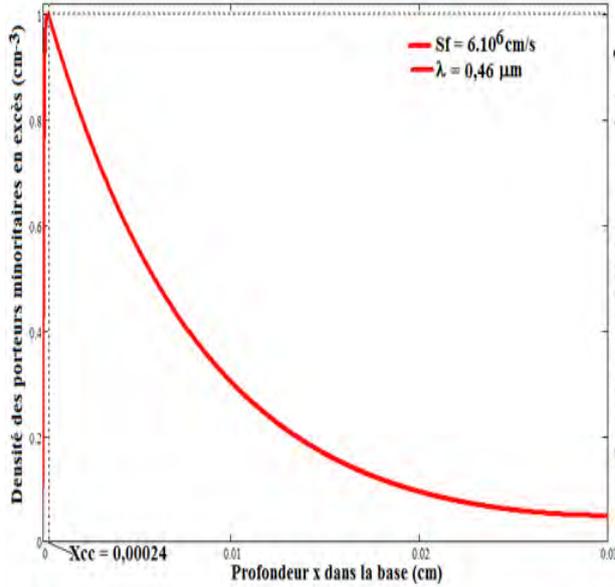


Figure 40: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

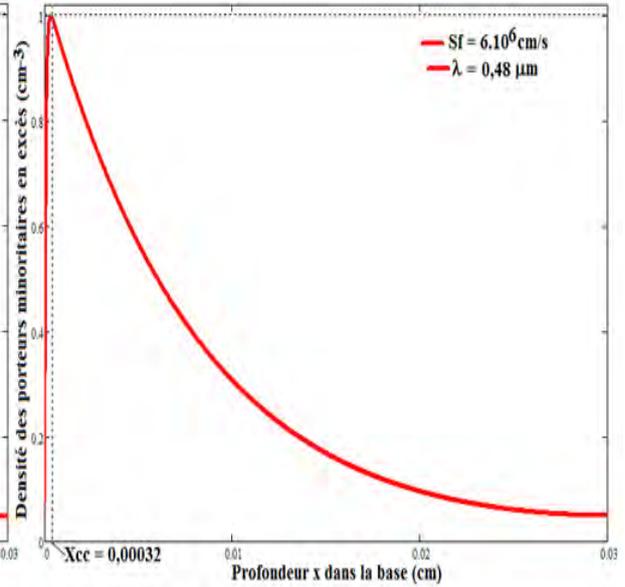


Figure 41: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

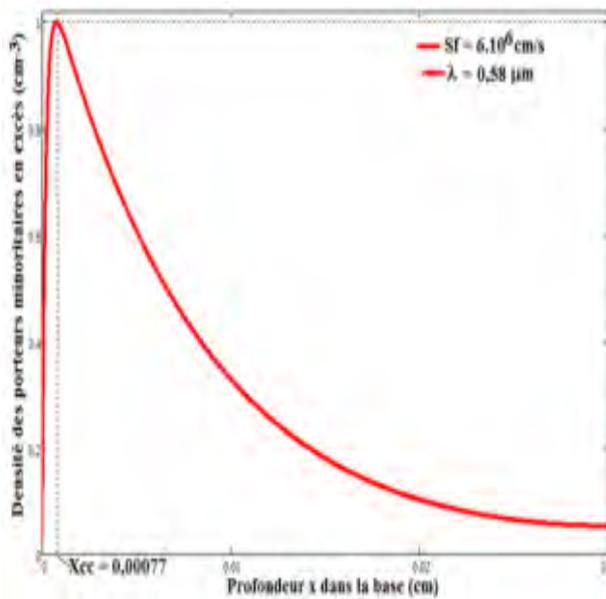


Figure 42: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

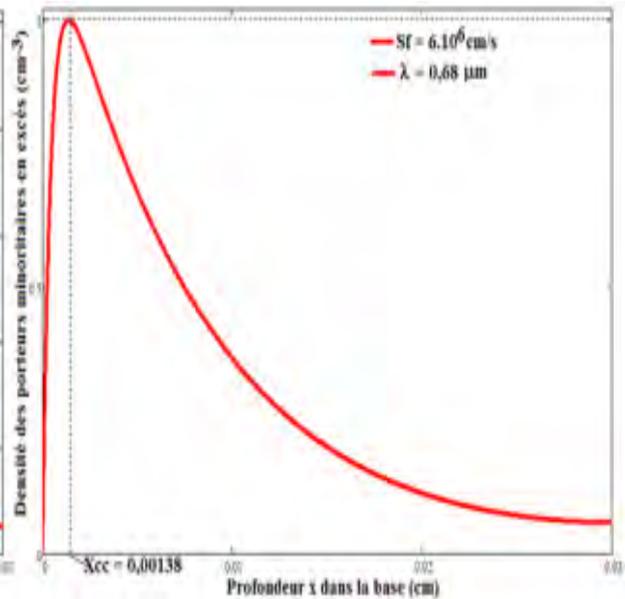


Figure 43: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

A partir des figures 40, 41, 42, 43, nous réalisons le tableau 5

Tableau 5: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc\lambda}(T)$ avec leurs faibles longueurs d'onde respectives

T(K)	$X_{cc\lambda}(T)$ (cm)	$\lambda(\mu\text{m})$
330	0,00024	0,46
330	0,00032	0,48
330	0,00077	0,58
330	0,00138	0,68

Nous obtenons la figure 44 de $X_{cc\lambda}(T)$ en fonction des faibles longueurs de la photopile en court-circuit en utilisant le tableau 5

La figure 44 donne le profil de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit en fonction des faibles longueurs.

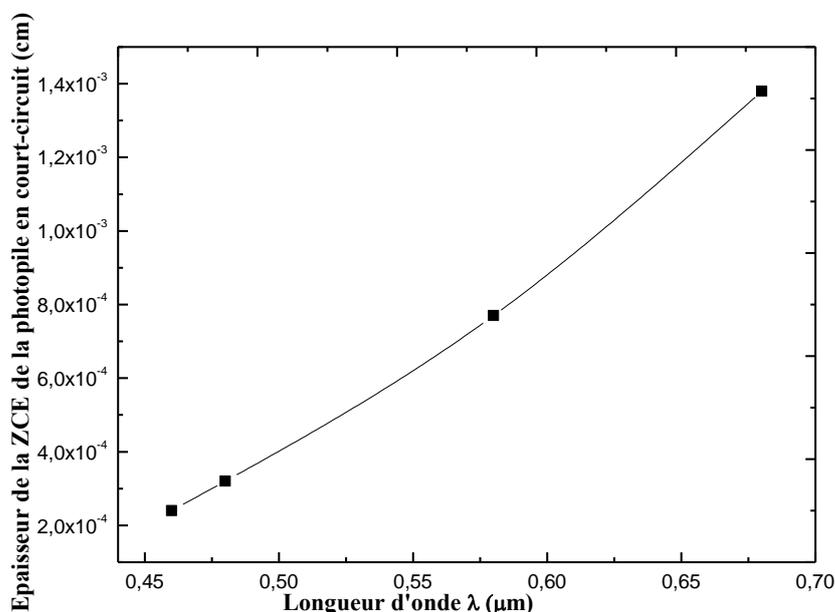


Figure 44: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en court-circuit en fonction des faibles longueurs d'onde. T = 330 K.

Nous observons que lorsque la longueur d'onde augmente, l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile en court-circuit augmente.

Après l'étude du comportement des faibles longueurs d'onde sur le point de fonctionnement de la photopile en court-circuit, nous allons faire le même travail pour grandes longueurs d'onde.

Les figures 45, 46, 47 et 48 présentent le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base de la photopile en court-circuit pour les grandes longueurs.

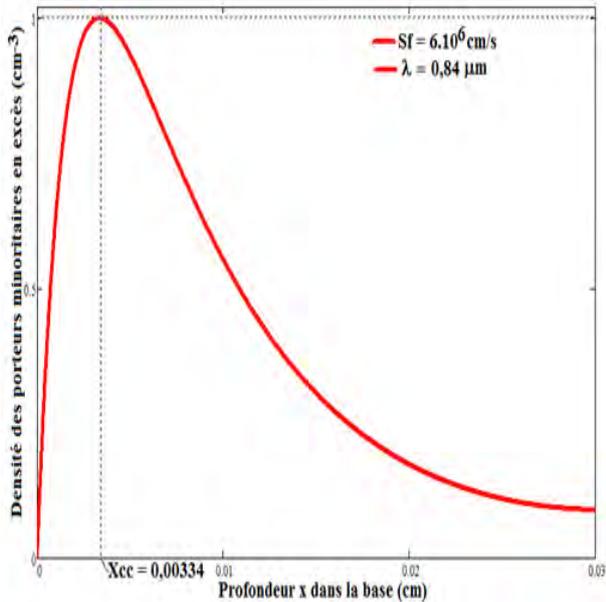


Figure 45: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330K

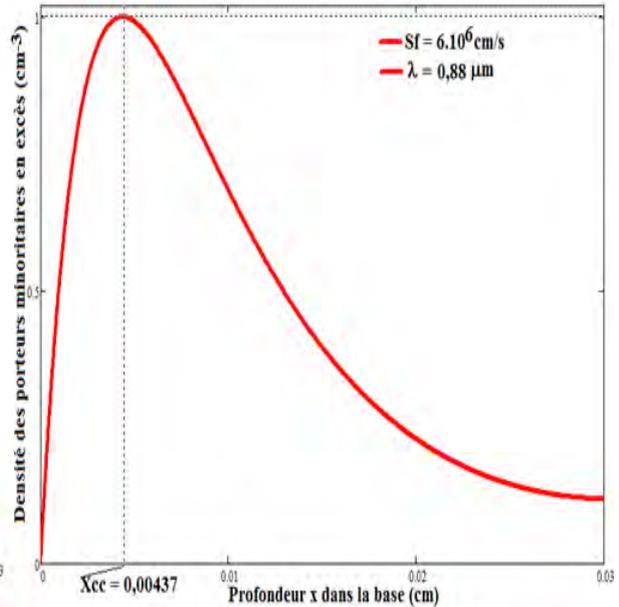


Figure 46: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K.

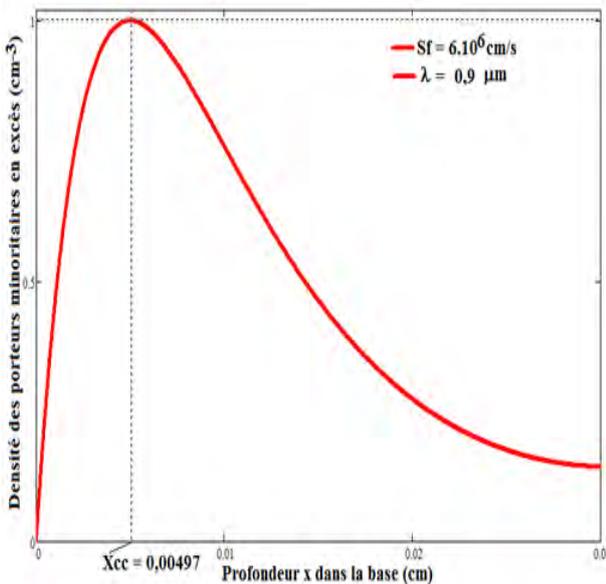


Figure 47: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330K

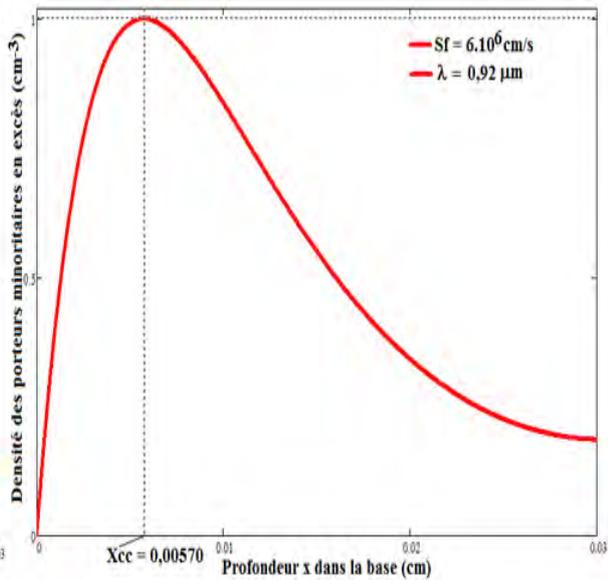


Figure 48: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x pour une valeur de température T = 330 K

Les figures 45, 46, 47, 48 ont permis de produire le tableau 6

Le tableau 6 présente les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace X_{cc} des grandes longueurs de la photopile en court-circuit.

Tableau 6: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc\lambda}(T)$ avec leurs grandes longueurs d'onde correspondantes.

T(K)	$X_{cc\lambda}(T)$ (cm)	$\lambda(\mu\text{m})$
330	0,00334	0,84
330	0,00437	0,88
330	0,00497	0,9
330	0,00570	0,92

Nous obtenons la figure 49 de $X_{cc\lambda}(T)$ en fonction des grandes longueurs de la photopile en court-circuit en utilisant le tableau 6

La figure 49 donne le profil de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit en fonction des grandes longueurs.

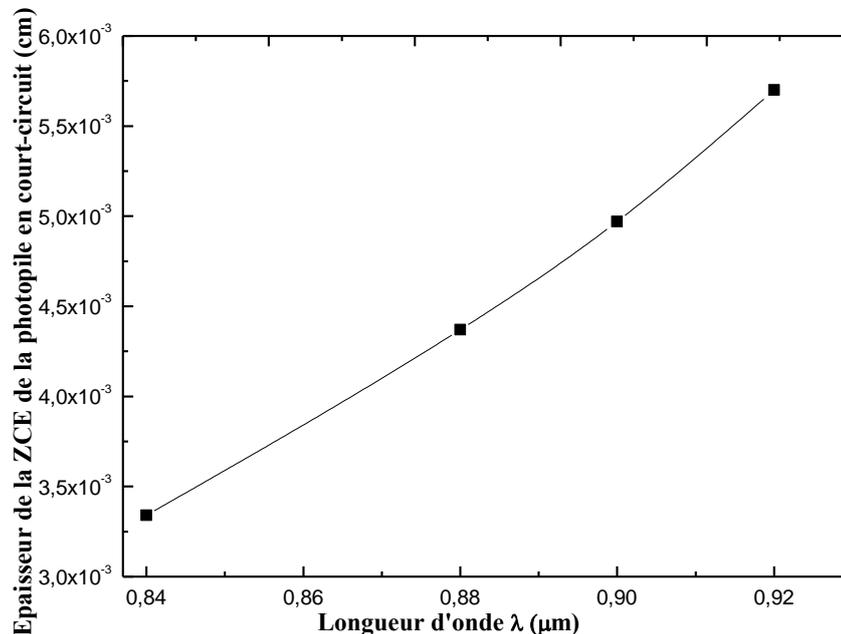


Figure 49: L'épaisseur de la ZCE de la photopile en court-circuit en fonction des grandes longueurs d'onde. T = 330K.

Nous observons que quand la longueur d'onde augmente, la zone de charge d'espace augmente.

Alors pour une photopile en situation de court-circuit nous avons évidemment une extension de la zone de charge d'espace (ZCE). Toutefois cette ZCE augmente d'avantage lorsque la longueur d'onde augmente pour les faibles comme pour les grandes longueurs d'onde. Cette importante augmentation de la ZCE est plus intéressante pour les grandes longueurs d'onde.

II.2.6 Effet de la longueur d'onde sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge

Le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur dans la base lorsque la photopile fonctionne en circuit ouvert pour une faible et une grande valeur de la longueur d'onde est donné à la figure 50.

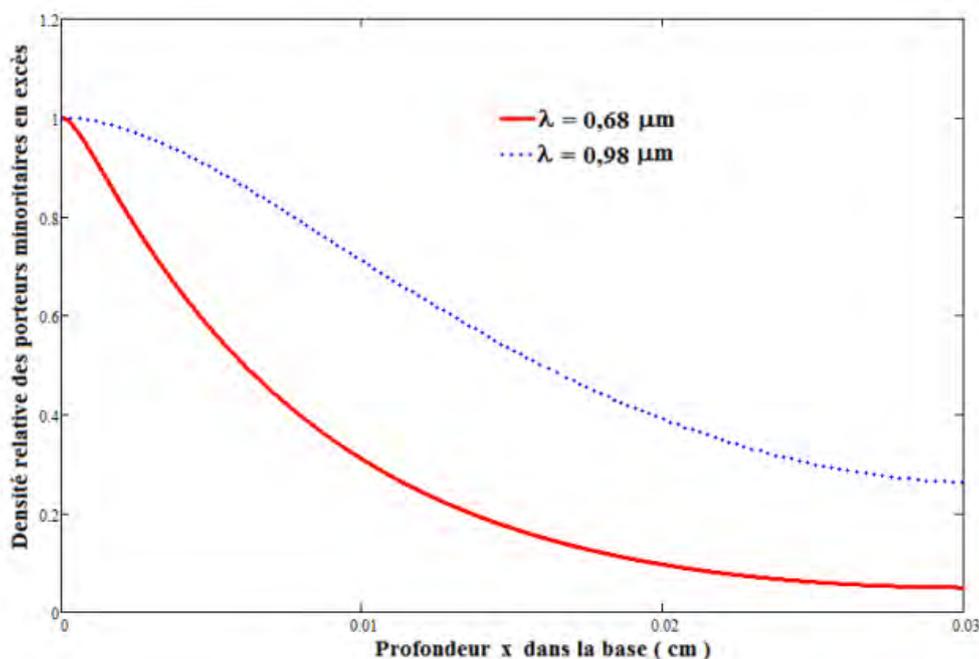


Figure 50: Densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur de la photopile en circuit ouvert pour une faible et une grande valeur de la longueur d'onde ($S_f=10\text{cm/s}$, $T=330\text{K}$).

Nous constatons que le déplacement du maximum de la densité des porteurs minoritaires de charge en profondeur dans la base n'est pas visible pour les faibles comme grandes longueurs d'onde. Donc l'élargissement de la zone de charge d'espace n'est pas visible.

La figure 51 présente le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base de la photopile maintenue en court-circuit et éclairée par différentes longueurs d'onde.

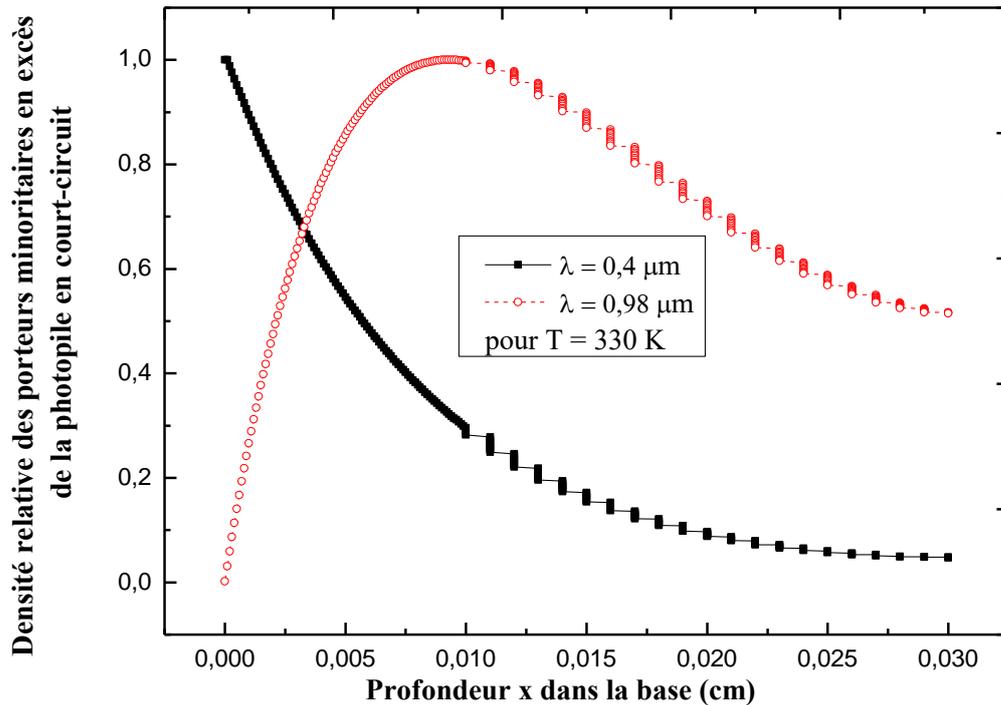


Figure 51: Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la photopile en court-circuit ($S_f = 6.10^6$ cm/s) pour une faible et grande longueur d'onde. $T = 330$ K.

Nous constatons que l'abscisse $X_{cc}(T, \lambda)$ du maximum de la densité relative des porteurs minoritaires de charge augmente avec λ pour cette gamme de longueur d'onde. La longueur d'onde est un paramètre important [25] pour l'étude des variations du rendement de la capacité.

II.3 Densité de photocourant

Le photocourant résulte de la diffusion des porteurs minoritaires à la jonction et son expression est donnée par :

$$J_{ph}(S_f, \lambda, T) = qD(T) \left. \frac{\partial \delta(x, S_f, \lambda, T)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (14)$$

II.3.1 Effet de la température sur la densité de photocourant

La figure 52 est le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour diverses valeurs de la température.

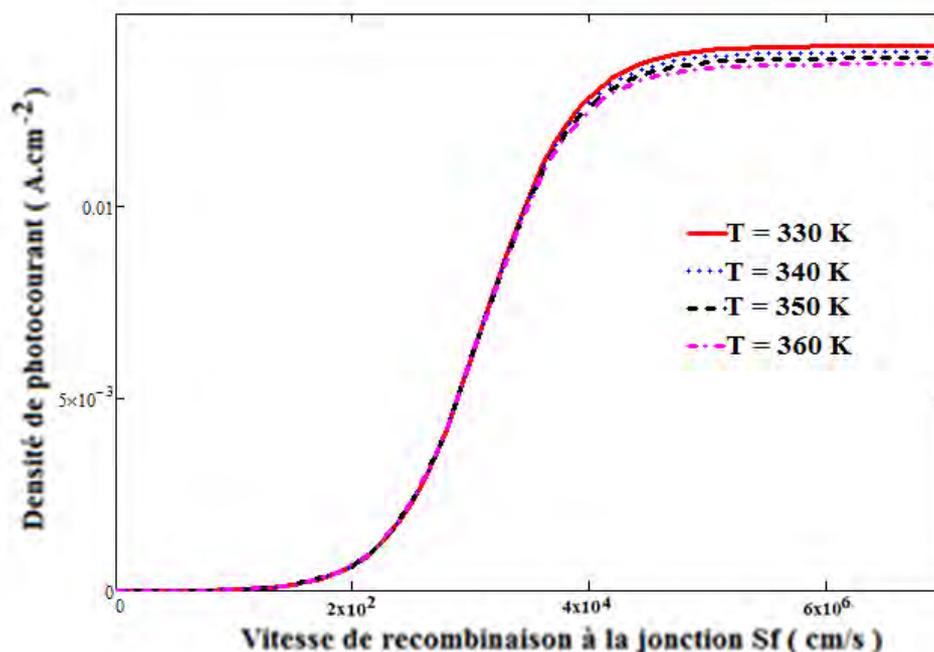


Figure 52: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

Les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction correspondent au fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. Quant aux grandes valeurs elles correspondent au fonctionnement de la photopile en court-circuit.

Nous constatons trois parties (figure 52) :

- i) le circuit ouvert (stockage des porteurs minoritaires de charge à la jonction) qui est la densité de photocourant nulle ;
- ii) le court-circuit (la traversée du maximum de porteurs minoritaires) qui est la densité de photocourant maximale et constante ;
- iii) la partie entre le circuit ouvert et le court-circuit qui est une augmentation progressive de la densité de photocourant. Cette augmentation progressive est la traversée de plus en plus des porteurs minoritaires à la jonction.

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la densité de photocourant lorsque la photopile fonctionne en court-circuit.

Cela s'explique comment suit : la densité de photocourant étant un déplacement ordonné de porteur et que l'augmentation de la température provoque une agitation thermique (mouvement générale et désordonné).

II.3.2 Effet de la longueur d'onde sur la densité de photocourant

Les figures 53 et 54 représentent les densités de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour de faibles et grandes valeurs de la longueur d'onde.

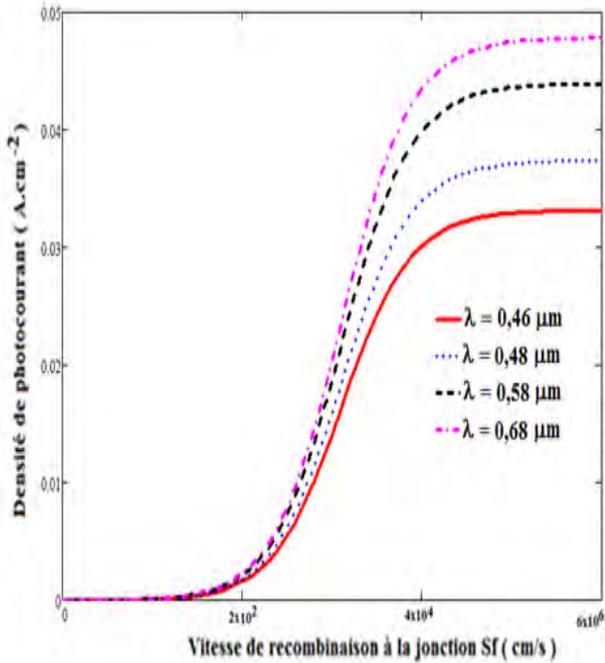


Figure 53: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

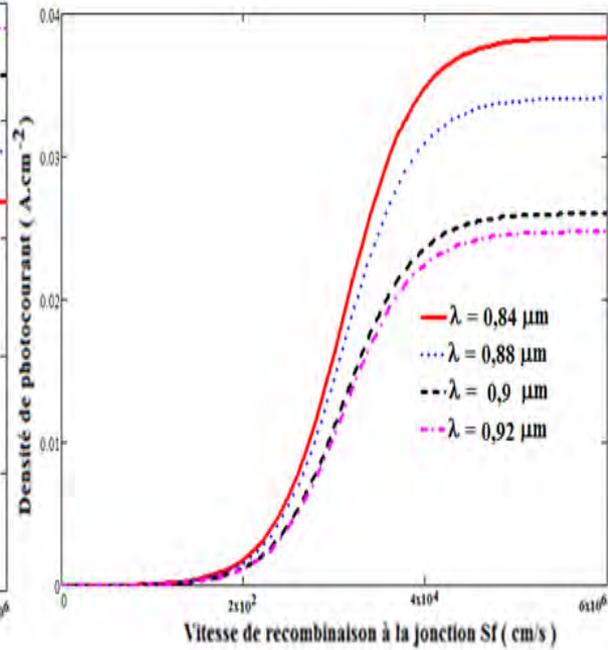


Figure 54: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

L'analyse de la figure 52 est analogue à celles des figures 53 et 54 sur la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

Nous observons à la figure 53 que lorsque la longueur d'onde augmente, La densité de photocourant des porteurs minoritaires de charge augmente.

Nous allons étudier la vitesse de recombinaison à la face arrière à l'aide de la densité de photocourant.

II.3.3 Vitesse de recombinaison à la face arrière

En dérivant l'expression de la densité de photocourant par la vitesse de recombinaison à la jonction. Cette phrase traduit en mathématique devient :

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial f_{\geq s}} = 0 \tag{15}$$

L'équation (15) nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison à la face arrière. Cette expression est donnée par l'équation (16)

$$S_b(\lambda, T) = \frac{D(T)}{L(T)} \left[\frac{L(T)\alpha(\lambda) \left[e^{-\alpha(\lambda)H} - \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right) \right] + \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)}{e^{-\alpha(\lambda)H} - \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + L(T)\alpha(\lambda)\sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)} \right] \quad (16)$$

L'équation (12) nous permet d'obtenir les figures 55, 56 et 57.

Les figures 55 et 56 sont les profils de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température pour de faibles et grandes longueurs d'onde.

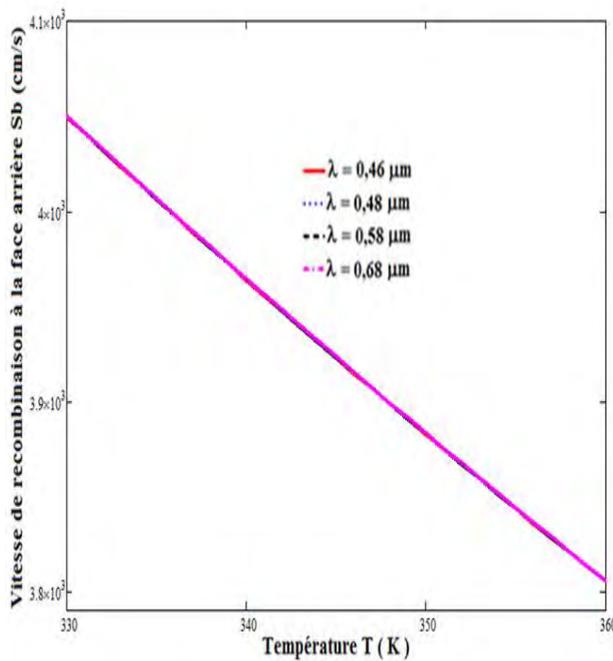


Figure 55: vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température pour de faibles longueurs d'onde.

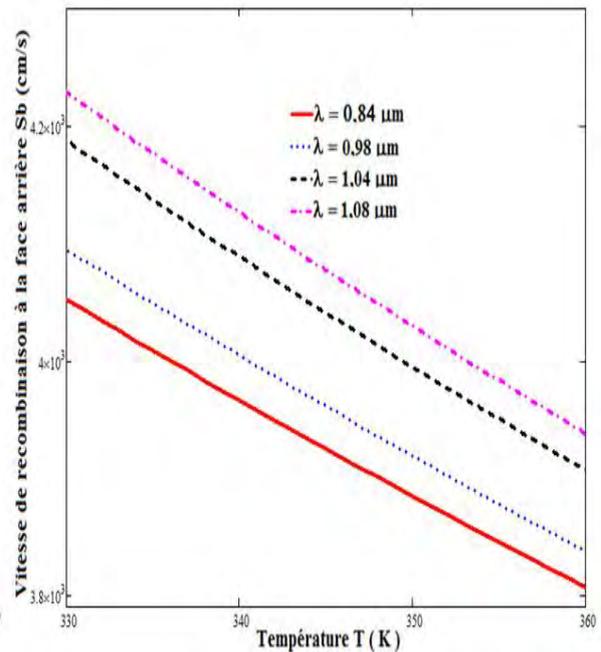


Figure 56: vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température pour de grandes longueurs d'onde.

Nous remarquons que lorsque la température augmente, la vitesse de recombinaison à la face arrière diminue (figures 55 et 56). L'influence de la longueur d'onde n'est pas visible sur vitesse de recombinaison à la face arrière (figure 55). Lorsque la longueur d'onde augmente, la vitesse de recombinaison à la face arrière augmente (figure 56).

En effet, comme l'augmentation de la vitesse de recombinaison traduit des pertes de porteurs. Et l'augmentation de la température entraîne une agitation des porteurs, donc empêche leurs recombinaison. Alors l'augmentation de la température diminue les pertes de porteurs, d'où la diminution de la vitesse de recombinaison à la face arrière S_b . Pour les faibles longueurs d'onde

la génération des porteurs se fait près de la jonction. Pour les grandes longueurs d'onde les porteurs sont créés à l'intérieur et arrière de la base.

Comme son nom l'indique la vitesse de recombinaison à la face arrière, donc l'influence de cette vitesse n'est pas importante près de la jonction. D'où la non visibilité de l'action de S_b pour les faibles longueurs d'onde.

Pour plus de preuves de l'action de la température et de la longueur d'onde sur la vitesse de recombinaison à la face arrière, nous avons tracé la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température.

Mais aussi, à partir des figures 55 et 56 nous avons extrait l'équation 17

$$S_{b\lambda}(T) = \sigma T + \theta \quad (17)$$

Avec,

σ qui est la pente à la courbe, θ qui est l'ordonnée à l'origine et peut être exprimé comme une vitesse de recombinaison à la face arrière.

Pour les faibles longueurs d'onde nous avons : $\sigma = -8 \text{ cm.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $\theta = 6688,6 \text{ cm/s}$

Pour les grandes longueurs d'onde nous avons les valeurs de σ et de θ sont données par le tableau 7

Tableau 7: valeurs de σ et θ de pour les grandes longueurs d'onde avec la vitesse de recombinaison à la face arrière.

$\sigma \text{ (cm.s}^{-1}.\text{K}^{-1})$	$\theta \text{ (cm/s)}$
-8,21	6691,3
-8,63	6732,5
-9,45	7144,8
-9,78	7527,2

Le profil de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs températures est représenté par la figure 57.

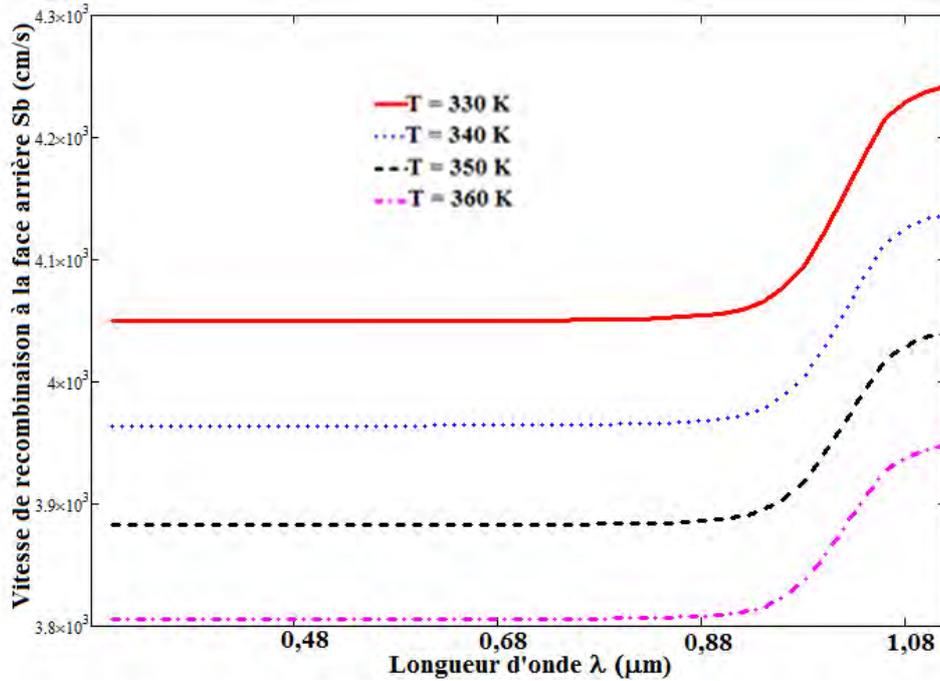


Figure 57: vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures.

Nous constatons que pour de faibles longueurs d'onde, quel que soit la valeur de la longueur d'onde la vitesse de recombinaison à la face arrière reste constante. Et pour les fortes longueurs d'onde, l'augmentation de la longueur entraîne celle de la vitesse de recombinaison à la face arrière. Lorsque la température augmente, la vitesse de recombinaison à la face arrière diminue. Ces résultats confirment celles des figures 55 et 56.

Nous allons voir l'influence de la température et de la longueur d'onde sur la phototension.

II.4 Phototension

La phototension de la photopile est donnée par la relation de Boltzmann.

$$V_{ph}(S_f, \lambda, T) = V_T \ln \left[\frac{N_b}{(n_i(T))^2} \delta(0, S_f, \lambda, T) + 1 \right] \quad (18)$$

Où V_T est la tension thermique, elle est définie comme suit :

$$V_T = \frac{k_b T}{q} \quad (19)$$

N_b est le taux de dopage and n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires [7] exprimée comme suit:

$$n_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (20)$$

E_g est l'énergie de gap, et correspond à la différence entre l'énergie de la bande de conduction E_c et celle de la bande de valence E_v . $E_g = 1,12.1,6.10^{-19}$ J

A est une constante. $A = 3,87.10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$

Commençons par l'influence de la température.

II.4.1 Effet de la température sur la phototension

La figure 58 présente le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

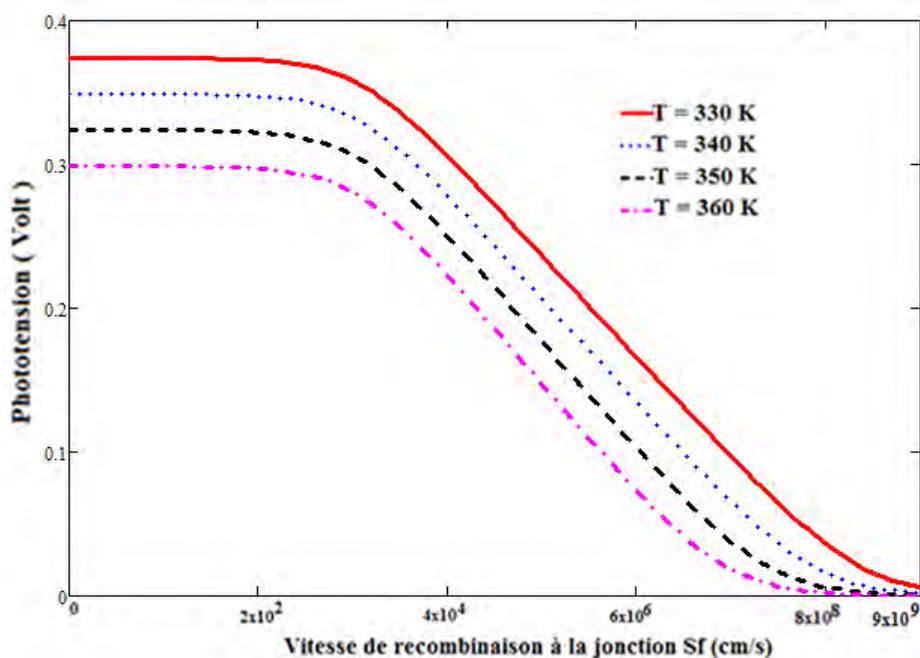


Figure 58: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

Nous observons que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison qui correspond au circuit ouvert, la phototension maximale et constante. Cette dernière commence à diminuer jusqu'à devenir nulle quand la vitesse de recombinaison prend des valeurs de plus en plus grandes (court-circuit).

Nous remarquons que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la phototension.

Effet la phototension est la répartition de charges. L'augmentation de la température (agitation porteurs donc désordre) perturbe cette distribution de charge où la diminution de la phototension.

II.4.2 Effet de la longueur d'onde sur la phototension

Les profils de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour de petites et grandes valeurs de la longueur d'onde sont donnés respectivement par les figures 59 et 58

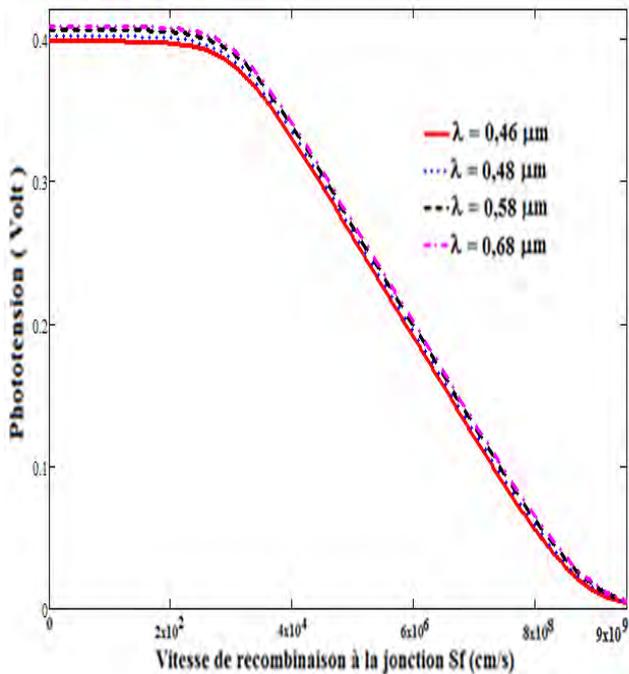


Figure 59: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

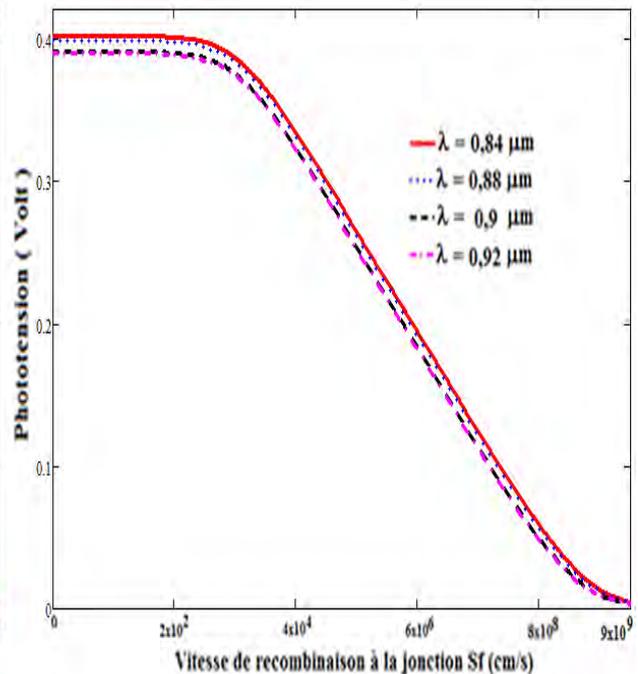


Figure 60: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

Nous constatons pour les figures 59 et 60 que lorsque pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison la phototension est constante et maximale. Cependant quand cette vitesse de recombinaison devient de plus en plus grande, la phototension devient de plus en plus faible jusqu'à être nulle.

Lorsque la longueur d'onde augmente, la phototension augmente (figure 59). Quand la longueur d'onde augmente, la phototension diminue (figure 60).

Etudions la phototension de circuit ouvert et la densité de photocourant de court-circuit en utilisant la méthode de détermination expérimentale

II.5 Détermination expérimentale des photocourant de court-circuit J_{phcc} et phototension de circuit ouvert V_{phco}

Les figures 61 et 62 représentent respectivement la densité de photocourant et la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

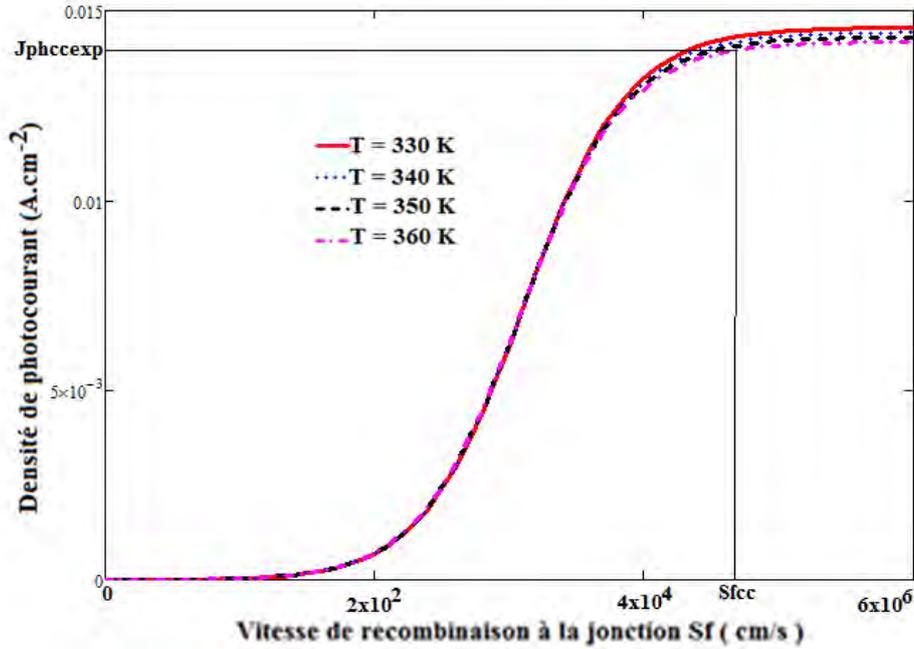


Figure 61: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

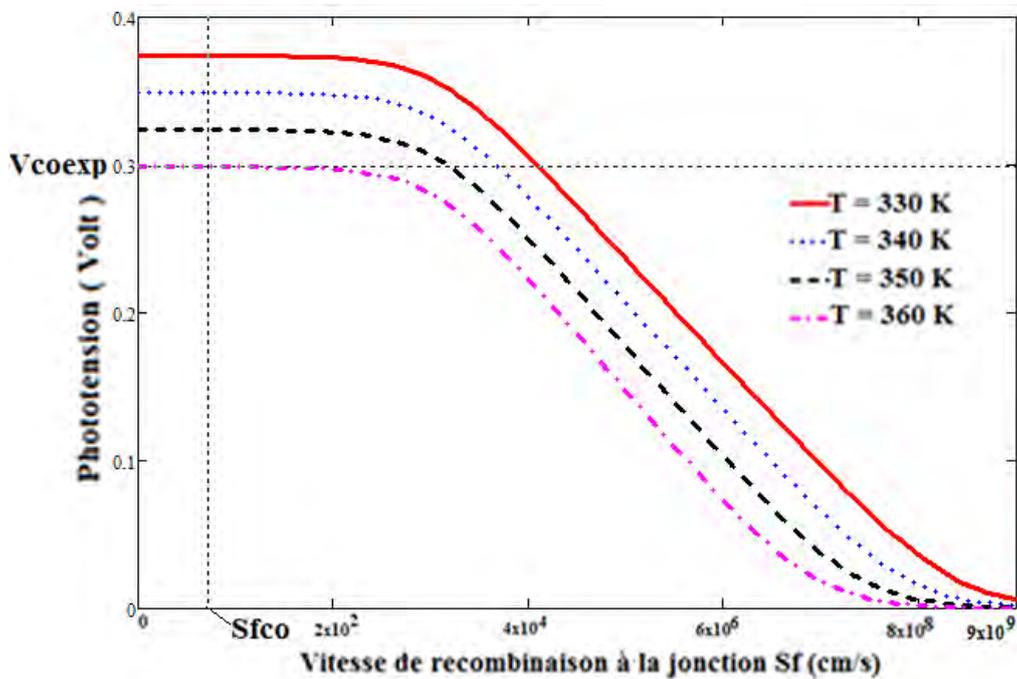


Figure 62: : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

La projection au niveau des courbes de la densité de photocourant permet d'obtenir les valeurs de vitesses de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit S_{fsc} et de la densité de photocourant de court-circuit expérimentale J_{phcexp} d'une part (figure 61).

La projection au niveau de la figure 62 permet d'obtenir les valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert S_{fco} et de la phototension de circuit ouvert expérimentale $V_{phcoexp}$ d'autre part. Ces valeurs sont données par le tableau 8.

Tableau 8: Valeurs de S_{fcc} , S_{fco} , J_{phcc} et V_{phco} expérimentales avec leurs températures respectives

T(K)	$S_{fcc}(cm/s)$	$S_{fco}(cm/s)$	$J_{phccexp}(A/cm^2)$	$V_{phcoexp}(Volt)$	$\lambda(\mu m)$
330	$2,2294.10^6$	$1,1357.10^2$	$1,4532.10^{-2}$	0,3735	0,98
340	$1,3564.10^6$	200	$1,4389.10^{-2}$	0,3498	0,98
350	$8,2414.10^5$	$2,6437.10^2$	$1,4240.10^{-2}$	0,3225	0,98
360	$6,4205.10^5$	$3,4867.10^2$	$1,4103.10^{-2}$	0,2967	0,98

A partir du tableau 8, les figures 63 et 64 ont été obtenues.

Les profils de la densité de photocourant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert en fonction de la température sont représentés par les figures 63 et 64.

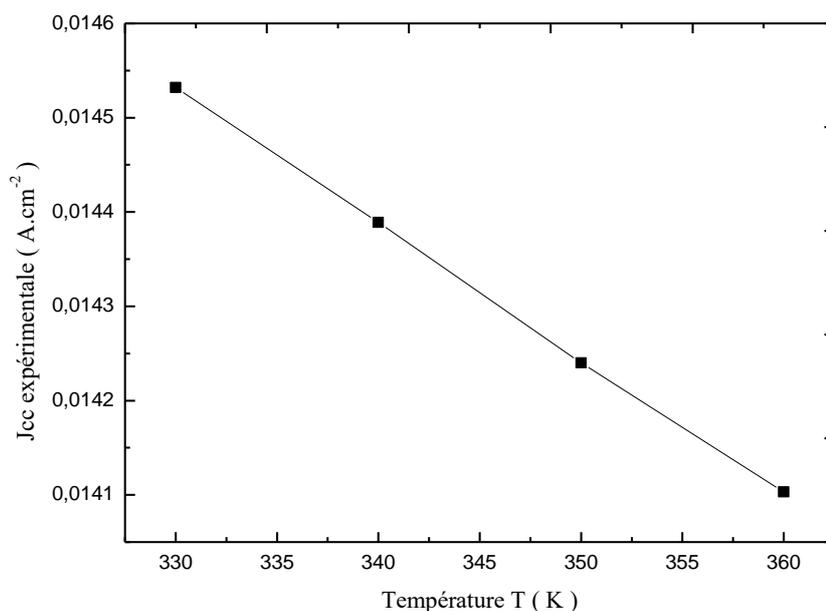


Figure 63: Densité de photocourant expérimentale en fonction de la température.

Nous constatons que la diminution de la température favorise l'augmentation de la densité de photocourant de court-circuit J_{cc} .

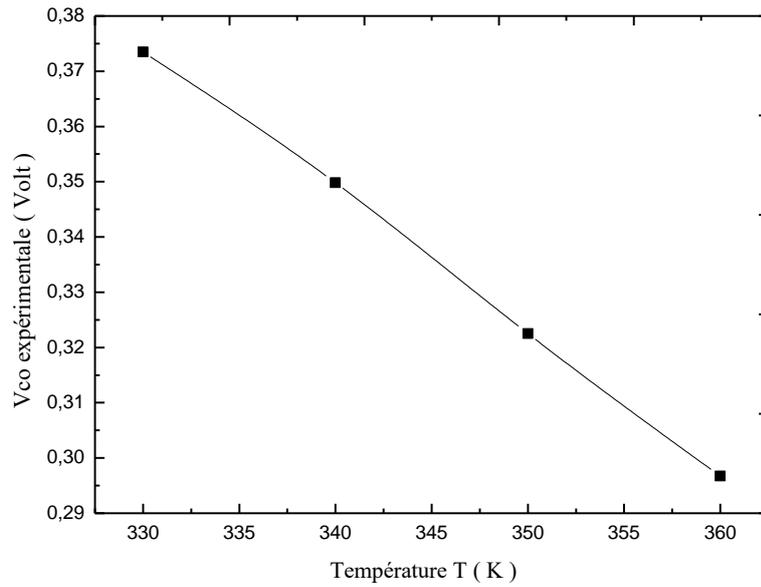


Figure 64: Phototension expérimentale en fonction de la température.

Nous remarquons que la diminution de la phototension de circuit ouvert est due à l'augmentation de la température.

L'étude de la phototension sera suivie de celle de la capacité sous l'influence de la température et de la longueur d'onde.

II.6 Capacité

En utilisant l'expression de la phototension, la capacité de la photopile est exprimée sous la forme

$$C(S_f, \lambda, T) = \frac{dQ(S_f, \lambda, T)}{dV(S_f, \lambda, T)} \quad (21)$$

avec $Q(S_f, \lambda, T) = q\delta(x=0, S_f, \lambda, T)$ (22)

$$C = q \frac{d\delta(x=0)}{dV} \quad (23)$$

L'équation (21) peut être réécrit:

$$C = q \frac{d\delta(x=0)}{dS_f} \frac{1}{\frac{dV}{dS_f}} \quad (24)$$

En tenant compte de l'expression de la phototension et de la densité des porteurs minoritaires, nous obtenons l'expression suivante:

$$C(S_f, \lambda, T) = \frac{q(n_i(T))^2}{N_b V_T} + \frac{q\delta(x=0, S_f, \lambda, T)}{V_T} \quad (25)$$

$$C(S_f, \lambda, T) = C_0(T) + C_d(S_f, \lambda, T) \quad (26)$$

Où $C_0(T) = \frac{q(n_i(T))^2}{N_b V_T}$ (27)

$$C_d(S_f, \lambda, T) = \frac{q\delta(x=0, S_f, \lambda, T)}{V_T} \quad (28)$$

$C_0(T)$ est la capacité de la photopile lorsqu'elle est en court-circuit

$C_d(T, \lambda, S_f)$ est la capacité de diffusion de la photopile à la température T , sous éclairage λ , en un point de fonctionnement donné par S_f .

II.6.1 Effet de la température sur la capacité

La figure 65 présente le profil de la capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

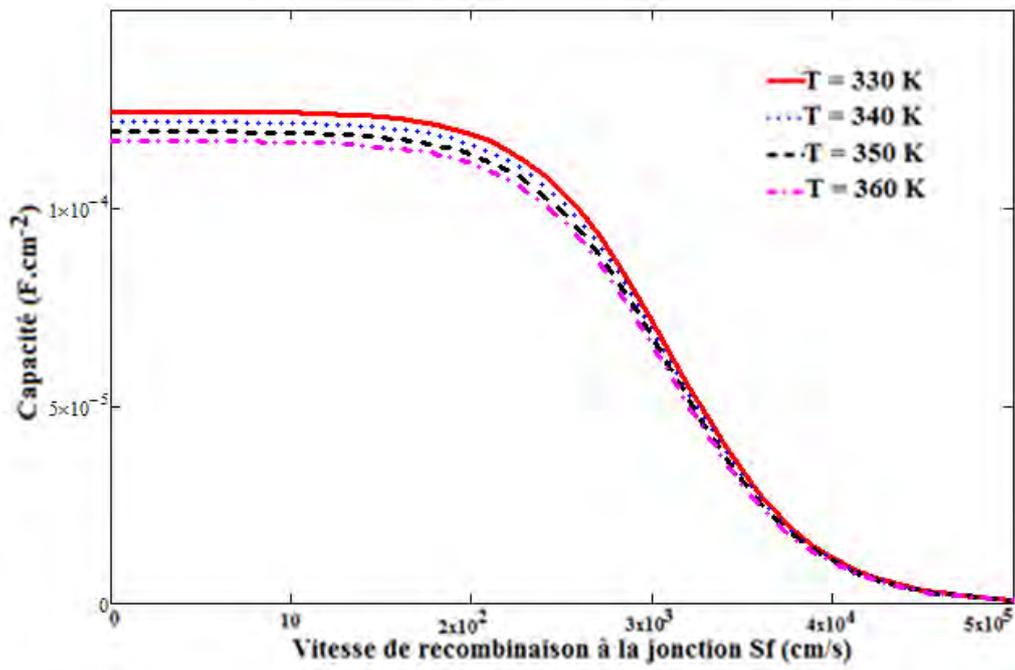


Figure 65: Capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température. ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

La courbe de capacité (figure 65), est décroissante et présente deux paliers :

- La zone de vitesse de recombinaison à la jonction inférieure à 2.10^2cm.s^{-1} , correspond à un fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. La capacité est maximale et

constante. L'épaisseur du condensateur plan associé est faible. Les porteurs de charge minoritaires sont stockés à la jonction.

- La zone de vitesse de recombinaison à la jonction supérieure à 4.10^4cm.s^{-1} , correspond à un fonctionnement de la photopile en court-circuit. La capacité est minimale; c'est un élargissement de l'épaisseur X du condensateur plan. La traversée de porteurs minoritaires de charge est importante.

Pour les vitesses de recombinaisons à la jonction, $2.10^2 \text{cm.s}^{-1} < Sf < 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$, la capacité de la photopile diminue considérablement. Ceci correspond à une décharge rapide des porteurs minoritaires de charge.

L'effet de la température sur la capacité est plus sensible lorsque la photopile fonctionne en circuit ouvert ($Sf < 2.10^2 \text{cm.s}^{-1}$). La longueur d'onde a moins d'effet sur la photopile en circuit ouvert, donc c'est la température, à travers la capacité $C_0(T)$ qui agit, car celle de diffusion a peu d'influence. Lorsque la température augmente, la capacité $C_0(T)$ décroît donc son épaisseur s'agrandit. Lorsque le point de fonctionnement se déplace vers le court-circuit, la capacité de diffusion C_d devient faible, son épaisseur s'agrandit. En ce point de fonctionnement, la capacité peut être associée à un condensateur à large épaisseur qui dépend de la température.

A partir de la figure 65, nous pouvons réécrire l'expression du rendement de la capacité de la photopile donnée par l'équation 13 sous la forme suivante

$$\eta_{\lambda}(T) = 1 - \frac{C_{cc\lambda}(T)}{C_{co\lambda}(T)} \quad (29)$$

$C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ sont respectivement capacité de la photopile en circuit ouvert et capacité de la photopile en court-circuit.

Leurs valeurs correspondant à leurs températures respectives sont extraites à partir de la figure 65 et données par le tableau 9.

Tableau 9: Valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$C_{co\lambda}(T)(F/cm^2)$	$C_{cc\lambda}(T)(F/cm^2)$	$\eta_{\lambda}(T)$	$\lambda(\mu m)$
330	0,000124	$7,43.10^{-9}$	$9,9994.10^{-1}$	0,98
340	0,000121	$7,71.10^{-9}$	$9,9993.10^{-1}$	0,98
350	0,000119	$9,23.10^{-9}$	$9,9992.10^{-1}$	0,98
360	0,000116	$1,42.10^{-8}$	$9,9987.10^{-1}$	0,98

La figure 66 du rendement de la capacité de la photopile en fonction de la température est obtenue à partir du tableau 9.

La figure 66 est le profil du rendement de la capacité de la photopile en fonction de la température.

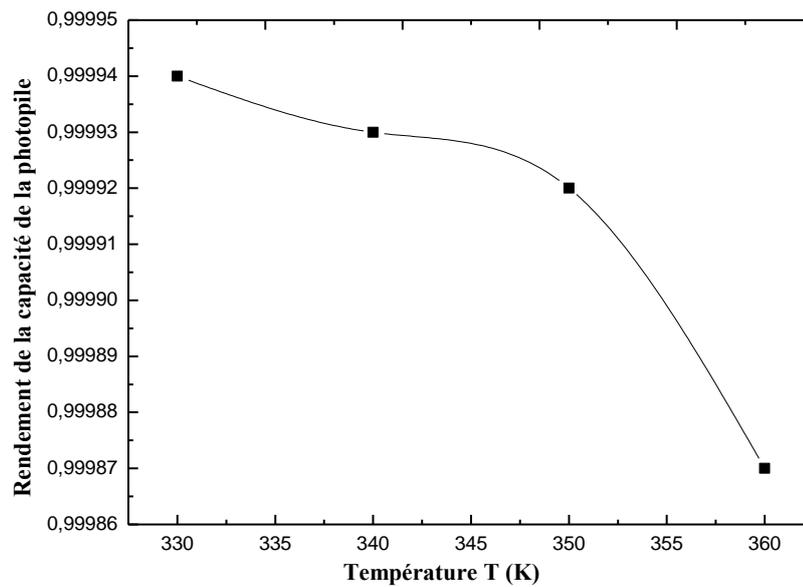


Figure 66: Rendement de la capacité de la photopile en fonction de la température. $\lambda=0,98 \mu\text{m}$.

Nous remarquons que le rendement de la capacité de la photopile diminue lorsque la température augmente.

Après l'étude de la température sur la capacité, observons le comportement de cette dernière vis-à-vis de la température.

II.6.2 Effet de la longueur d'onde sur la Capacité

La figure 67 représente le profil de la capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison pour de faibles valeurs de la longueur d'onde.

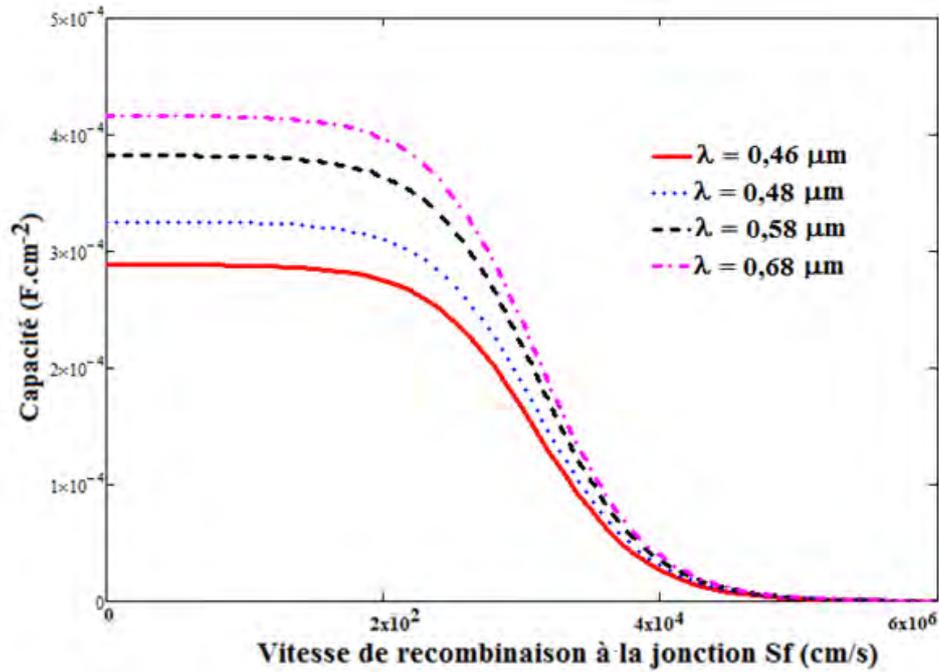


Figure 67: Capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

L'analyse concernant la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la figure 65 est la même pour la figure.

Nous remarquons que pour les faibles valeurs de la longueur d'onde, lorsque la longueur d'onde augmente, la capacité de la photopile augmente. Cette augmentation de la capacité correspond à un rétrécissement de la zone de charge d'espace. La zone de charge d'espace est assimilée à un condensateur plan [1]. Alors la réduction de la zone de charge d'espace correspond à une charge du condensateur.

A partir de la figure 67, nous obtenons les $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$.

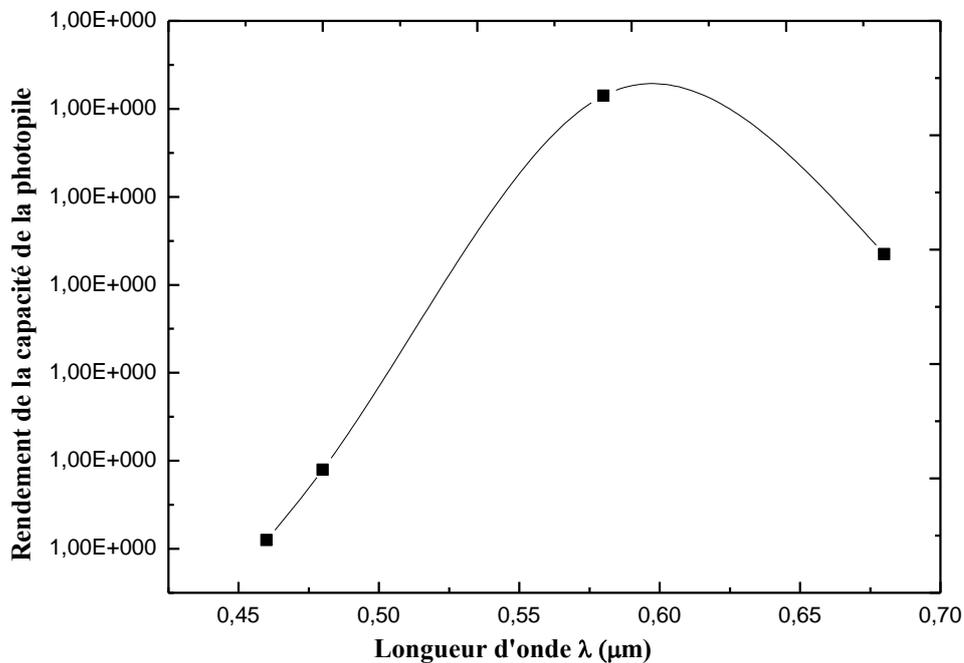
$C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ sont respectivement capacité de la photopile en circuit ouvert et capacité de la photopile en court-circuit.

Les valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ obtenues à partir de la figure 67, sont données par le tableau 10

Tableau 10: Valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$C_{co\lambda}(T)(F/cm^2)$	$C_{cc\lambda}(T)(F/cm^2)$	$\eta_{\lambda}(T)$	$\lambda(\mu m)$
330	0,000289	$1,69.10^{-8}$	$9,99941522.10^{-1}$	0,46
330	0,000325	$1,90.10^{-8}$	$9,99941538.10^{-1}$	0,48
330	0,000382	$2,23.10^{-8}$	$9,99941623.10^{-1}$	0,58
330	0,000416	$2,43.10^{-8}$	$9,99941587.10^{-1}$	0,68

La figure 68 du rendement de la capacité de la photopile en fonction des faibles longueurs d'onde est obtenue à partir du tableau 10.



**Figure 68: Rendement de la capacité de la photopile en fonction des faibles longueurs d'onde.
T=330 K**

Nous remarquons que le rendement de la capacité de la photopile augmente lorsque la longueur d'onde augmente jusqu'à $0,575 \mu\text{m}$. A partir de cette valeur ce rendement diminue quand la longueur d'onde continue d'augmenter.

La figure 69 donne le profil de la capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température.

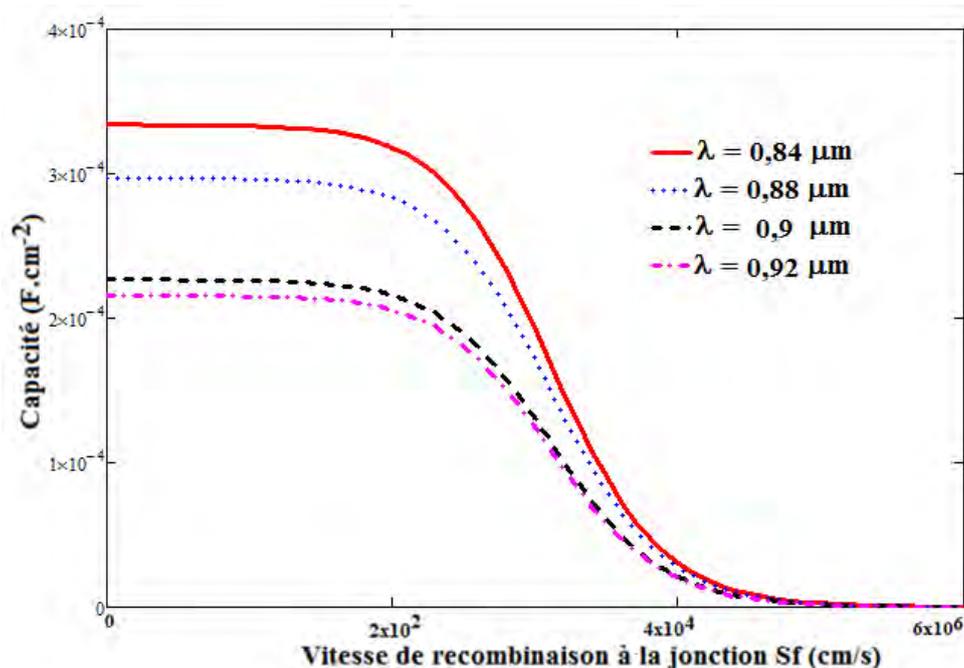


Figure 69: Capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

L'analyse concernant la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction sur la figure 65 est la même pour la figure 69.

Nous constatons que pour les grandes valeurs de la longueur d'onde, quand la longueur d'onde augmente, la capacité de la photopile diminue. Cette diminution de la capacité correspond à une extension de la zone de charge d'espace. La zone de charge d'espace est assimilée à un condensateur plan [1]. Donc l'élargissement de la zone de charge d'espace correspond à une décharge du condensateur. Alors le condensateur est assimilé à un générateur de courant.

A partir de la figure 69, nous avons extrait les valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$.

$C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ sont respectivement capacité de la photopile en circuit ouvert et capacité de la photopile en court-circuit.

Le tableau 11 est celui des valeurs des capacités de circuit ouvert $C_{co\lambda}(T)$ et de court-circuit $C_{cc\lambda}(T)$ dépendants de la longueur et de la température.

Tableau 11: Valeurs de $C_{co\lambda}(T)$ et $C_{cc\lambda}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$C_{co\lambda}(T)(F/cm^2)$	$C_{cc\lambda}(T)(F/cm^2)$	$\eta_{\lambda}(T)$	$\lambda(\mu m)$
330	0,000334	$1,95 \cdot 10^{-8}$	$9,99941617 \cdot 10^{-1}$	0,84
330	0,000297	$1,74 \cdot 10^{-8}$	$9,99941414 \cdot 10^{-1}$	0,88
330	0,000227	$1,33 \cdot 10^{-8}$	$9,99941410 \cdot 10^{-1}$	0,9
330	0,000215	$1,26 \cdot 10^{-8}$	$9,99941395 \cdot 10^{-1}$	0,94

La figure 70 du rendement de la capacité de la photopile en fonction des fortes longueurs d'onde est obtenue à partir du tableau 11.

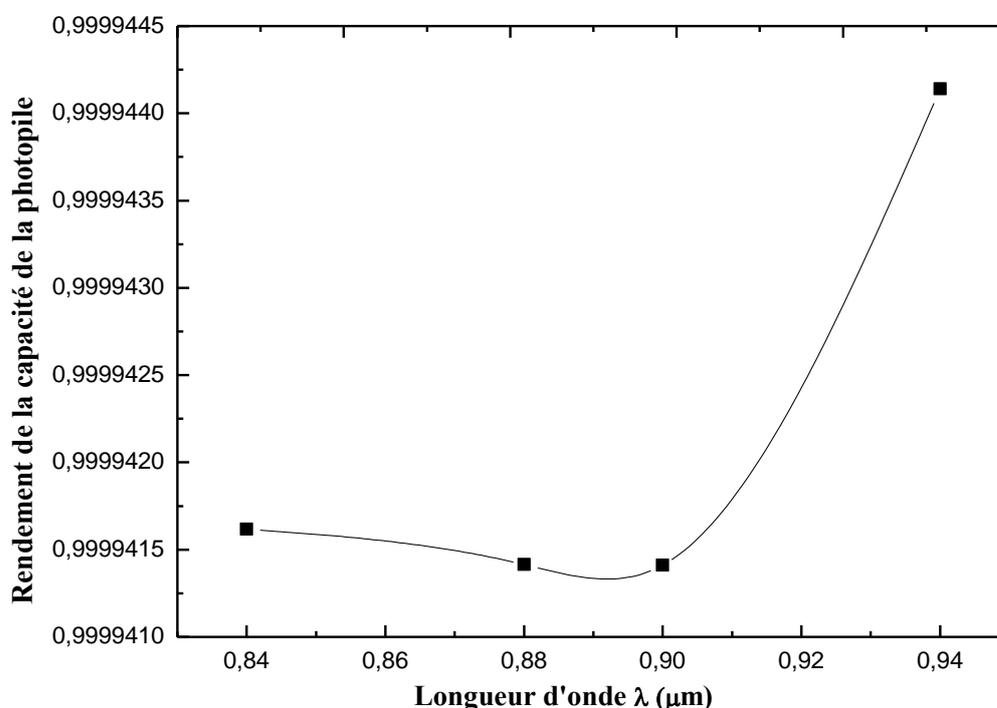


Figure 70: Rendement de la capacité de la photopile en fonction des fortes longueurs d'onde. T=330K.

Nous constatons que le rendement de la capacité de la photopile diminue quand la longueur d'onde augmente jusqu'à atteindre $0,89\mu m$. A partir de cette valeur le rendement de la capacité de la photopile augmente lorsque la longueur d'onde poursuit son augmentation.

Les figures 71 et 72 exposent la capacité de la photopile en situation de circuit ouvert en fonction de la température pour les faibles longueurs d'onde (figure 71) et la capacité de la photopile en situation de circuit ouvert en fonction de la température pour les grandes longueurs d'onde (figure 72).

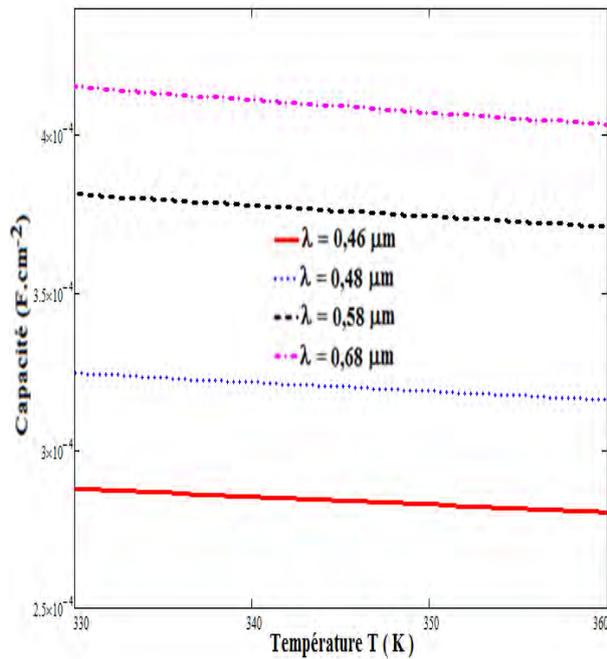


Figure 71: : Capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm/s}$) en fonction de la température pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde.

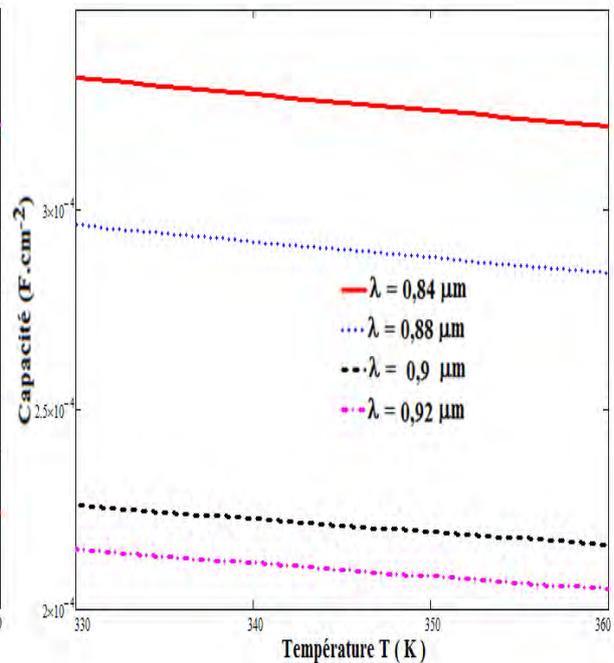


Figure 72: Capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm/s}$) en fonction de la température pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde.

Nous constatons en circuit ouvert (figures 71 et 72) que l'augmentation de la température provoque une diminution de la capacité. Lorsque la longueur d'onde augmente, la capacité augmente (figure 71). Les faibles longueurs d'onde génèrent des porteurs minoritaires de charge près de la jonction, correspondant à une faible épaisseur de la zone de charge d'espace (figure 71). Quand la longueur d'onde augmente, la capacité diminue (figure 72). Parce les porteurs minoritaires sont créés à l'intérieur de la base. Alors cela indique un élargissement de la zone de charge d'espace.

Nous allons maintenant étudier la capacité lorsque la photopile fonctionne totalement en court-circuit ($S_f = 9.10^9 \text{ cm/s}$) pour de faibles et grandes valeurs de la longueur d'onde.

Les figures 73 et 74 représentent respectivement la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température pour de faibles et grandes valeurs de la longueur d'onde.

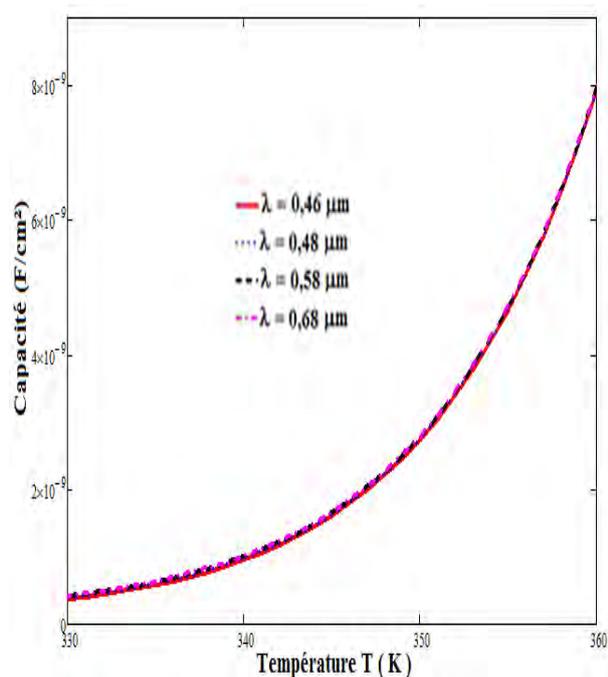


Figure 73: Capacité de la photopile en court-circuit ($Sf = 9.10^9$ cm/s) en fonction de la température pour de petites valeurs de la longueur d'onde.

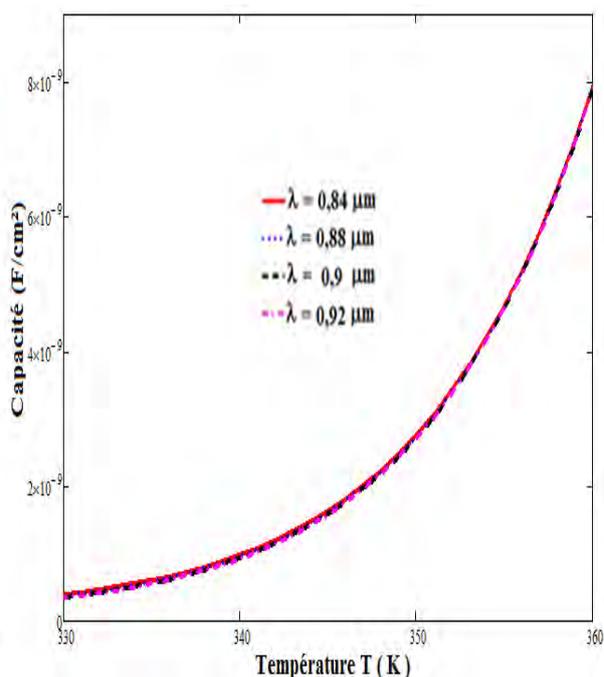


Figure 74: Capacité de la photopile en court-circuit ($Sf = 9.10^9$ cm/s) en fonction de la température pour de grandes valeurs de la longueur d'onde.

Nous constatons que lorsque la température augmente, la capacité de la photopile en situation de court-circuit augmente. Lorsque la photopile est totalement en court-circuit, l'influence de la longueur d'onde n'est pas visible. Cela permet de dire que la capacité de la photopile en situation de court-circuit ne dépend que de la longueur d'onde.

Après avoir étudié l'effet de la longueur d'onde sur la capacité, nous allons faire de même pour l'influence de la température sur la capacité de la photopile en court-circuit. Nous allons déterminer la capacité de court-circuit autrement.

II.6.3 Influence de la température sur la Capacité de la photopile en fonctionnement de court-circuit

La figure 75 représente le logarithme népérien de la capacité C avec différentes valeurs du logarithme népérien de la capacité de la photopile en situation de court-circuit C_0 en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température.

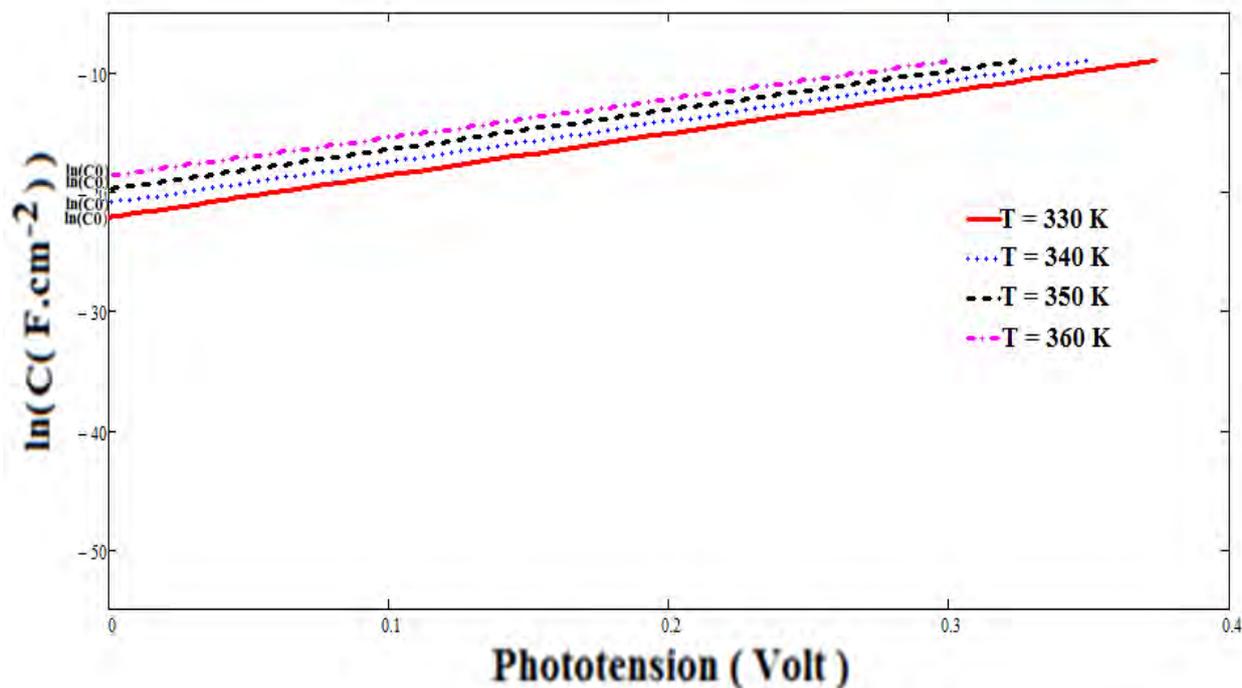


Figure 75: Logarithme de la capacité en fonction de la phototension pour différentes de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

A partir de cette figure 75 nous avons déterminé la capacité de la photopile en situation de court-circuit $C_0(T)$ pour chaque valeur de la température T . Ces valeurs de $C_0(T)$ sont représentées dans le tableau 12 :

Tableau 12: Valeurs de $C_0(T)$ avec leurs températures respectives

T(K)	C_0 (F.cm ⁻²)	$\lambda(\mu\text{m})$
330	$2,50 \cdot 10^{-10}$	0,98
340	$8,31 \cdot 10^{-10}$	0,98
350	$2,62 \cdot 10^{-9}$	0,98
360	$7,81 \cdot 10^{-9}$	0,98

A partir du tableau 12, nous avons la figure 76 est qui la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température.

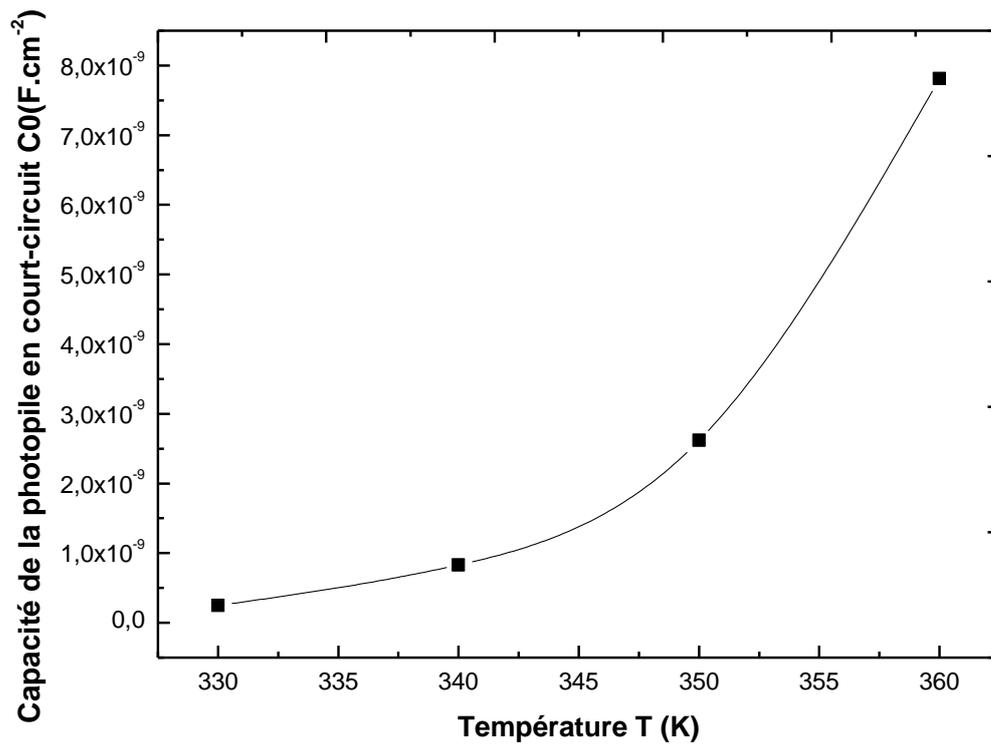


Figure 76: Capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

Alors, traçons la figure 77 qui est le logarithme de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température à partir du tableau 12.

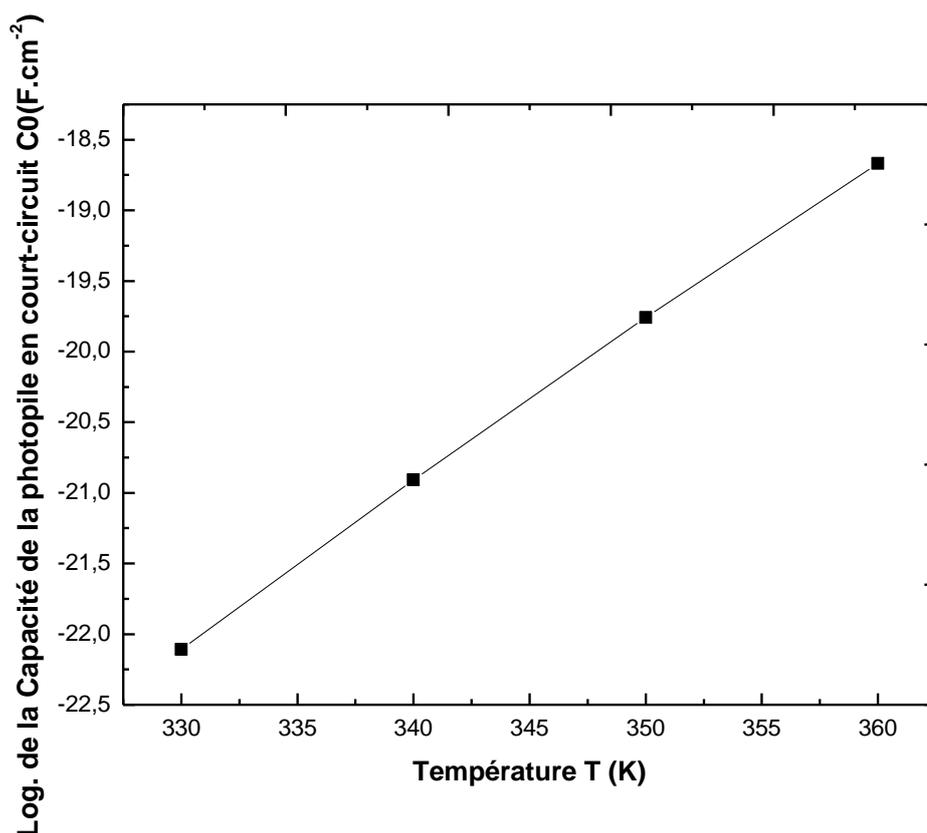


Figure 77: Logarithme de la capacité en fonction de la température ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$).

Nous remarquons aux figures 76 et 77 que lorsque la température augmente, la capacité de la photopile en court-circuit augmente (résultat confirmé par les figures 73 et 74). Parce que comme le photocourant de court-circuit est un déplacement ordonné de porteurs minoritaires traversant tous la jonction, et l'augmentation de la température entraîne un mouvement désordonné des porteurs. Ce mouvement désordonné des porteurs provoque un ralentissement à la traversée au niveau de la jonction de ces derniers. Alors les porteurs ne traversant de moins en moins la jonction, donc sont stockés de plus en plus celle dernière. Ce stockage des porteurs à la jonction entraîne une augmentation de la capacité de court-circuit.

Les figures 78 et 79 présentent respectivement le profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température pour de faibles longueurs d'onde et le profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température pour de grandes longueurs d'onde.

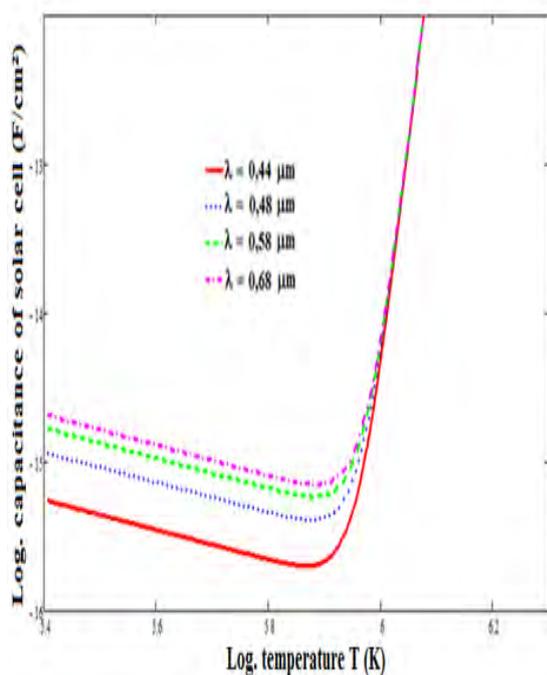


Figure 78: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en court-circuit ($S_f=6.10^6 \text{ cm/s}$) en fonction du logarithme de la température pour de faibles valeurs de la longueur d'onde.

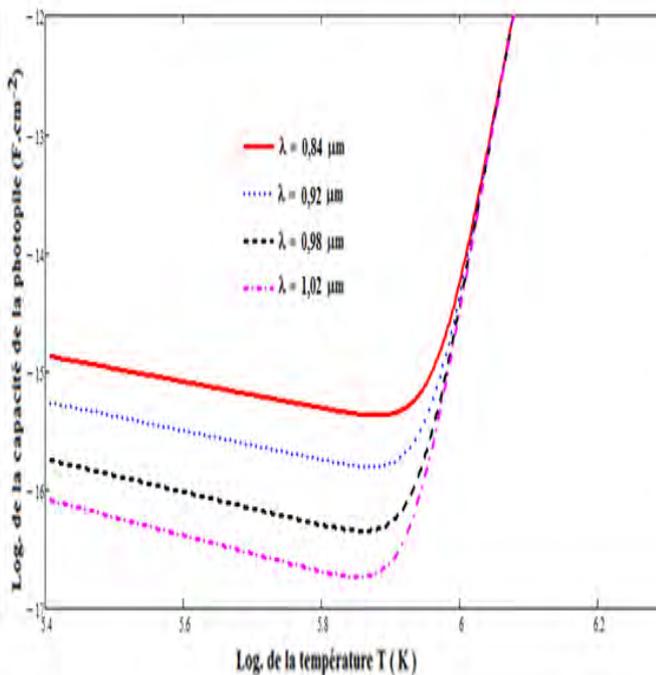


Figure 79: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en court-circuit ($S_f=6.10^6 \text{ cm/s}$) en fonction du logarithme de la température pour de grandes valeurs de la longueur d'onde.

La capacité de la photopile diminue linéairement avec la température jusqu'à une valeur minimale $X_{cc}(T_{opt}, \lambda)$ d'abscisse $T_{opt}(\lambda)$; Cette diminution correspond à un élargissement $X_{cc}(T, \lambda)$ de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (figures 78 et 79).

Pour les températures supérieures à $T_{opt}(\lambda)$ la capacité augmente linéairement, toute longueur d'onde confondue : en une seule droite, avec une grande pente. Ainsi s'opère le rétrécissement de l'épaisseur de la zone de charge d'espace $X_{cc}(T)_\lambda$ (figures 78 et 79).

Pour une longueur d'onde donnée, la température optimale $T_{opt}(\lambda)$ est obtenue en projetant le point d'intersection des deux tangentes à la courbes sur l'axe des températures (figures 78 et 79).

La température optimale correspond à une condition de fonctionnement de la photopile qui donne un rendement élevé de la capacité pour la longueur d'onde fixée (figures 78 et 79).

L'augmentation de la capacité avec la longueur d'onde (figure 78). Par contre l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de la capacité (figure 79). Pour de grandes valeurs de la température, la capacité de la photopile est insensible à la variation de la longueur d'onde (figures 78 et 79).

L'évolution des courbes, permet de modéliser la capacité de la photopile par la relation suivante (figures 78, 79, 80 et 81) :

$$C_{\lambda}(T) = \chi_{\lambda} T^{\gamma_{\lambda}} \quad (30)$$

Avec,

χ_{λ} est déterminé à partir de l'ordonnée à l'origine, il est homogène à une capacité,

γ_{λ} est la pente avec T homogène à une capacité

Le tableau 12 et 13, donne les valeurs de χ_{λ} et de γ_{λ} obtenus à partir des courbes des figure 78 et 79.

Tableau 13: Valeurs de χ_{λ} et de γ_{λ} en fonction de la température pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde de la photopile en court-circuit.

Zone	λ (μm)	χ_{λ} (F.cm ⁻²)	γ_{λ}
T < T _{opt} (λ)	0,44	2,36.10 ⁻⁷	-1
	0,48	3,24.10 ⁻⁷	-1
	0,58	3,83.10 ⁻⁷	-1
	0,68	4,20.10 ⁻⁷	-1
T > T _{opt} (λ)		1,82.10 ⁻⁸²	29

Tableau 14: Valeurs de χ_{λ} et de γ_{λ} en fonction de la température pour différentes valeurs de la longueur d'onde de la photopile en court-circuit.

Zone	λ (μm)	χ_{λ} (F.cm ⁻²)	γ_{λ}
T < T _{opt} (λ)	0,84	7,66.10 ⁻⁵	-1
	0,92	5,19.10 ⁻⁵	-1
	0,98	3,16.10 ⁻⁵	-1
	1,02	2,19.10 ⁻⁵	-1
T > T _{opt} (λ)		9,22.10 ⁻⁸⁸	31

A partir de la figure 78, nous avons déterminé pour chaque longueur d'onde la température optimum et le rendement correspondant :

Pour $T_{\text{opt}} = 353 \text{ K}$ et $\lambda = 0,44 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,999$

Pour $T_{\text{opt}} = 359 \text{ K}$ et $\lambda = 0,48 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,994$

Pour $T_{\text{opt}} = 362 \text{ K}$ et $\lambda = 0,58 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,875$

Pour $T_{\text{opt}} = 365 \text{ K}$ et $\lambda = 0,68 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,991$

A partir de la figure 79, nous avons déterminé pour chaque longueur d'onde la température optimum et le rendement correspondant :

Pour $T_{\text{opt}} = 369 \text{ K}$ et $\lambda = 0,84 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,9990$.

Pour $T_{\text{opt}} = 359 \text{ K}$ et $\lambda = 0,92 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,9999$.

Pour $T_{\text{opt}} = 355 \text{ K}$ et $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,9997$.

Pour $T_{\text{opt}} = 349 \text{ K}$ et $\lambda = 1,02 \mu\text{m}$, le rendement $\eta = 0,9999$.

Les figures 80 et 81 représentent les profils du logarithme de la capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm/s}$) en fonction du logarithme de la température pour de faibles et grandes valeurs de la longueur d'onde.

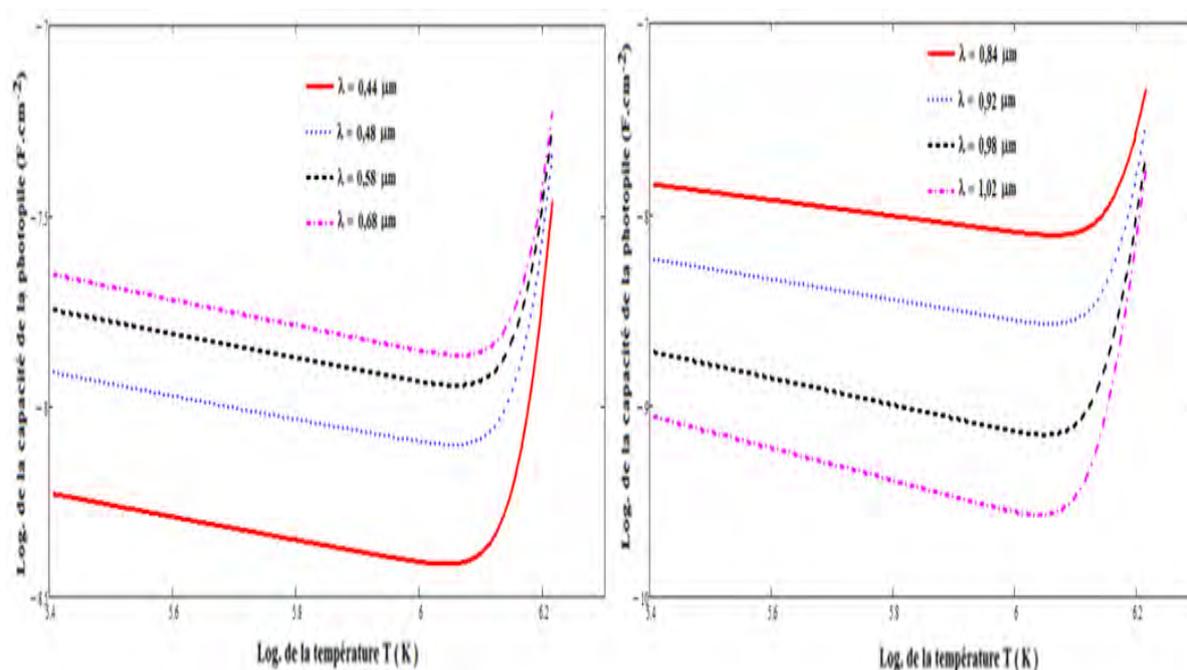


Figure 80: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en circuit ouvert (Sf= 10 cm/s) en fonction du logarithme de la température pour de faibles valeurs de la longueur d'onde.

Figure 81: Profil du logarithme de la capacité de la photopile en circuit ouvert (Sf= 10 cm/s) en fonction du logarithme de la température pour de grandes valeurs de la longueur d'onde.

D'une part, nous constatons une diminution linéaire de la capacité de la photopile avec la température jusqu'à une valeur minimale $X_{co}(T_{opt}, \lambda)$ d'abscisse $T_{opt}(\lambda)$ pour des températures inférieures à $T_{opt}(\lambda)$. Cette diminution peut être assimilée à une extension $X_{co}(T, \lambda)$ de la largeur de la zone de charge d'espace (figures 80 et 81).

Dans la même gamme de température, nous observons une augmentation de la capacité avec la longueur d'onde (figure 80). Par contre l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de la capacité (figure 81).

D'autre part pour de grandes valeurs de la température (températures supérieures à $T_{opt}(\lambda)$), la capacité de la photopile est sensible à la variation de la longueur d'onde (figures 80 et 81). Une augmentation linéaire de la capacité, lorsque la longueur d'onde augmente ou diminue, est observée. Cette linéarité est liée à de grandes pentes. Ainsi s'opère le rétrécissement de l'épaisseur de la zone de charge d'espace $X_{co}(T)_\lambda$ (figures 80 et 81).

Pour une longueur d'onde donnée, la température optimale $T_{opt}(\lambda)$ est obtenue en projetant le point d'intersection des deux tangentes à la courbes sur l'axe des températures (figures 80 et 81).

La température optimale correspond à une condition de fonctionnement de la photopile qui donne un rendement élevé de la capacité pour la longueur d'onde fixée (figures 80 et 81).

Le tableau 14 et 15, donne les valeurs de χ_λ et de γ_λ obtenus à partir des courbes des figures 80 et 81.

Tableau 15: Valeurs de χ_λ et de γ_λ en fonction de la température pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde de la photopile en circuit ouvert

Zone	λ (μm)	χ_λ (F.cm^{-2})	γ_λ
	0,44	$1,42 \cdot 10^{-3}$	-0,31
	0,48	$1,85 \cdot 10^{-3}$	-0,30

$T < T_{opt}(\lambda)$	0,58	$2,43.10^{-3}$	-0,32
	0,68	$2,98.10^{-3}$	-0,34
$T > T_{opt}(\lambda)$	0,44	$4,62.10^{-39}$	13
	0,48	$5,31.10^{-39}$	13
	0,58	$1,40.10^{-33}$	11
	0,68	$2,96.10^{-36}$	12

En utilisant la figure 80, nous avons spécifié pour chaque longueur d'onde la température optimum et le rendement correspondant :

Pour $T_{opt} = 462$ K et $\lambda = 0,44$ μm , le rendement $\eta = 0,979$

Pour $T_{opt} = 466$ K et $\lambda = 0,48$ μm , le rendement $\eta = 0,995$

Pour $T_{opt} = 468$ K et $\lambda = 0,58$ μm , le rendement $\eta = 0,999$

Pour $T_{opt} = 469$ K et $\lambda = 0,68$ μm , le rendement $\eta = 0,992$

Tableau 16: : Valeurs de χ_λ et de γ_λ en fonction de la température pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde de la photopile en circuit ouvert.

Zone	λ (μm)	χ_λ (F.cm^{-2})	γ_λ
$T < T_{opt}(\lambda)$	0,84	$3,60.10^{-3}$	-0,41
	0,92	$4,91.10^{-3}$	-0,54
	0,98	$7,20.10^{-3}$	-0,70
	1,02	$10,93.10^{-3}$	-0,84
$T > T_{opt}(\lambda)$	0,84	$1,80.10^{-52}$	18
	0,92	$3,45.10^{-47}$	16
	0,98	$4,75.10^{-58}$	20
	1,02	$3,55.10^{-66}$	23

La figure 81, nous a permis de déterminer pour chaque longueur d'onde la température optimum et le rendement correspondant :

Pour $T_{opt} = 469$ K et $\lambda = 0,84$ μm , le rendement $\eta = 0,996$.

Pour $T_{opt} = 462$ K et $\lambda = 0,92$ μm , le rendement $\eta = 0,994$.

Pour $T_{opt} = 456$ K et $\lambda = 0,98$ μm , le rendement $\eta = 0,999$.

Pour $T_{opt} = 454$ K et $\lambda = 1,02$ μm , le rendement $\eta = 0,985$.

II.7. Conclusion

L'étude de ce chapitre nous a permis de voir que :

Le taux de génération des porteurs diminue en profondeur dans la base. Pour les faibles longueurs d'onde, la génération des porteurs se fait près de la jonction. Pour les grandes longueurs cette génération se fait en volume.

Lorsque la température augmente, la longueur de diffusion, le coefficient de mobilité des porteurs et le coefficient de diffusion diminuent.

Lorsque nous sommes en circuit ouvert, la densité des porteurs minoritaires de charge augmente avec l'augmentation de la température pour les faibles valeurs de la profondeur dans la base. En circuit ouvert toujours, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la densité des porteurs minoritaires de charge pour les grandes valeurs de la profondeur dans la base.

En court-circuit, lorsque la température augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge dans la base augmente.

En circuit ouvert comme en court-circuit, la diminution de la température entraîne une augmentation de la phototension.

En circuit ouvert, lorsque la longueur d'onde augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base augmente, (faibles longueurs d'onde). Toujours en situation de circuit ouvert, l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de la densité des porteurs minoritaires.

L'augmentation des faibles longueurs d'onde entraîne : une augmentation de la densité de photocourant, une augmentation de la phototension et sa non visibilité au niveau de la vitesse de recombinaison à la face arrière. L'augmentation des grandes longueurs d'onde provoque : une diminution de la densité de photocourant, une diminution de la phototension et une augmentation de la vitesse de recombinaison à la face arrière.

L'étude à montrer aussi que le rendement de la capacité de la photopile dépend de l'épaisseur de la zone de charge d'espace $X_{cc}(T, \lambda)$ lorsque la photopile fonctionne en court-circuit. Aussi lorsque la température augmente, le rendement de la capacité de la photopile diminue. Les expressions de $C_0(T)$ et de $C_d(T, S_f, \lambda)$ ont été déterminées à partir de la définition de la capacité de la photopile. La capacité de la photopile en circuit ouvert diminue lorsque la température augmente. Alors que l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la capacité de la photopile en court-circuit.

Les variations de la capacité en fonction de la température ont permis de déterminer une température optimale $T_{opt}(\lambda)$ qui donne un rendement élevé de la capacité.

En court-circuit, lorsque la température est inférieure à $T_{opt}(\lambda)$, la capacité de la photopile diminue linéairement avec la température jusqu'à une valeur minimale $X_{cc}(T_{opt}, \lambda)$ d'abscisse

$T_{opt}(\lambda)$. Par contre pour les températures supérieures à $T_{opt}(\lambda)$ la capacité augmente linéairement, toute longueur d'onde confondue en fonction de la température.

En circuit ouvert, quand la température est inférieure à $T_{opt}(\lambda)$, la capacité de la photopile diminue linéairement avec la température jusqu'à une valeur minimale $X_{co}(T_{opt}, \lambda)$ d'abscisse $T_{opt}(\lambda)$. Par contre pour les températures supérieures à $T_{opt}(\lambda)$ la capacité augmente linéairement.

II.8 Références

- [1] B.R. Chawla, H.K. Gummel, "Transition Region. Capacitance of Diffusion p-n Junction", IEEE Transactions on. Electron Devices, ED-18,3,pp:178-195, 1971.

- [2] G. Sissoko, B. Dieng, A. Corr a, M.Adj, D. Azilinson, " Silicon Solar cell space charge region width determination by a study in modeling". Renewable Energy, vol-3, pp.1852-1855- Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/# (2004).

- [3] G. Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot, P. Mialhe
"Constant illumination-induced open circuit voltage decay (CIOCV) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk and back surface characterization"
11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, poster 1B, pp.352-54, 12-16 October, 1992, Montreux, Switzerland.

[4] H.L. Diallo, A. Seïdou. Maiga, A. Wereme, and G.Sissoko, “New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell”, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 42, pp: 203–211, 2008.

[5] G. Sissoko, E. Nanéma, A. L. Ndiaye, Y. L. B. Bocandé and M. Adj. Minority carrier diffusion length measurement in silicon solar cell under constant white bias light, *Renewable Energy*, 3, pp:1594-1597, 1996. Pergamon, 0960-1481/94\$ 700 +0.00.

[6] G. Sissoko, E. Nanéma, A. Corrêa, P. M. Biteye, M.Adj, A. L. Ndiaye. “Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic”, *Renewable Energy*, vol-3, pp.1848-1851, 1998. Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#.

[7] C. D. Thurmond, « The standard thermodynamic functions for the formation of electron and hole in Ge, Si, GaAs and GaP », *J. Electrochem. Soc*, vol. 122, pp 133-41, Aug 1975.

[8] A. Corrêa, I. Gaye, B. Ba, A. L. Ndiaye, and G. Sissoko, “Solar cells parameters determination by constant illumination induced transient voltage decay method”, *Renewable Energy*, Vol 5, part I, pp.166-168, 1994.-Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00

[9]- A. Diao, N. Thiam, M. Zoungrana, M. Ndiaye, G. Sahin and G. Sissoko “Diffusion coefficient in silicon solar cell with applied magnetic field and under frequency: Electric equivalent circuits”, *World Journal of Condensed Matter Physics*, 4, pp 1-9, 2014. Published Online **** 2014 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/wjcmp> http://dx.doi.org/10.4236/wjcmp.2014.*****

[10]- E. H. Ndiaye, G. Sahin, M. Dieng, A. Thiam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, G. Sissoko “Study of the intrinsic recombination velocity at the junction of silicon solar cell under frequency modulation and radiation”, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, , 3, pp:1522-1535, 2015. Published Online November 2015 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/jamp> <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>

[11] G. Yaron and D. F.-Bentchkowsky, « capacitance voltage characterization of poly Si-SiO₂-Si structures », *Solid-State Electronics*, Vol. 23, pp 433-439, 1980.

[12] S. Mbodji, B. Mbow, F. I. Barro and G. Sissoko, “A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition”, *Turkish Journal of Physics*, 35, pp.281 –291, 2011.

[13] A. Jakubowski, « Graphic method of substrate doping determination from C-V characteristics of MIS capacitors », *Solid-State Electronics*, Vol. 24, No. 10, pp 985-987, 1981.

[14] J.J. Liou, F.A. Lindholm, and D.C. Malocha, “Forward-voltage capacitance of heterojunction space charge regions *J.Appl.Phys.*63(10) Sept1988

[15] C. H. Wang and A. Neugroschel, “Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence”, *IEEE. Transaction on electron devices* Vol.38, N° 9(Sept) 1987

[16] H. L. Diallo, B. Dieng, I. Ly, M.M. Dione, M. Ndiaye, O.H. Lemrabott, Z.N. Bako, A. Wereme And G. Sissoko, “Determinations of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(16); pp: 2626-2631, 2012.

[17] H. L. Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Ndiaye, B. Dieng, O.H. Lemrabott, A.S. Maïga and G. Sissoko, “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* 4, pp:1672-1676, 2012.

[18] J. H. Scofield, « effets of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37 (2), pp: 217-233, May 1995.

[19] R. A. Kumar, M. S. Suresh, and J. Nagaraju, « measurement of AC parameters of Gallium Arsenide (GaAs /Ge) solar cell by impedance spectroscopy », *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. 48, No. 9, pp: 2177-2179, September 2001.

[20] H. Bayhan, A. S. Kavasglu, « admittance and impedance spectroscopy on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells », *Turk. J. Phys.*, 27, pp: 529-535, 2003.

[21] G. Sahin, M. Dieng, M. A. O. E. Moujtaba, M. I. Ngom, Amary Thiam, Grégoire Sissoko, “Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination”, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, pp: 1536-1543, 2015.

Published Online November 2015 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/jamp>
<http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2015.311178>.

[22] A. Dieng, I. Zerbo, M. Wade, A. S. Maïga and G. Sissoko, “Three-dimensional study of a polycrystalline silicon solar cell: the influence of the applied magnetic field on the electrical parameters”, *Semicond. Sci. Technol.* 26, 095023 (9pp), 2011.

[23] B. Zetterlund and A. J. SeclLow, “Temperature operation of silicon surface channel charge coupled devices”, *IEEE. Transaction on electron devices* Vol.ED34, N° 1(Sept) 1991.

[24] M. Kunst and A. Sanders, “Transport of excess carriers in silicon wafers”, *Semicond. Sci. Technol.* 7, pp: 51-59, 1992 in the UK

[25] G. Sissoko, C. Museruka, A. Corr ea, I. Gaye and A. L. Ndiaye, “Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell”, *Renewable Energy*, Vol 3, pp.1487-1490, 1996. Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.

Chapitre III : Influence de la température sur la capacité de la photopile sous éclairage polychromatique

III.1 Introduction

La zone de charge d'espace d'une cellule solaire appelé capacité de transition due à l'ionisation des charges fixes, peut être assimilée à un condensateur plan [1]. La vitesse de recombinaison à la jonction qui fixe le point de fonctionnement, du circuit ouvert au court-circuit [2,3] conditionne l'épaisseur de la capacité de diffusion. Cette dernière est due à la diffusion des porteurs minoritaires de charges [4]. En régimes : statique [5,6], transitoire [7,8], ou dynamique fréquentiel [9,10], la photopile peut y être étudiée.

Dans l'objectif de déterminer le taux de dopage [11], la capacité de diffusion a été étudié plusieurs fois en régime statique [12,13]. L'élargissement de la zone de charge d'espace est obtenu en régime transitoire [14]. Les paramètres de recombinaison en volume et en surface sont approfondi en régime dynamique fréquentiel [15,16,17]. Les paramètres électriques: la capacité [18,19], la self inductance unis à chaque zone de la photopile, les résistances série et shunt [20,21] le sont aussi. Ainsi pour de secteurs distincts de fréquences d'excitation de la photopile, des modèles électriques équivalents [22] sont instaurés .

La température agit sur les paramètres électriques ainsi que sur le rendement de la photopile [23].

L'influence de la température sur la capacité de la photopile au silicium sous éclairage monochromatique en régime statique sera étudiée. Nous allons donner deux expressions du rendement de la capacité de la photopile ainsi que la capacité de court-circuit $C_0(T)$ de la photopile seront. Avant cela nous allons voir l'influence de la température sur : la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, la densité de photocourant, la vitesse de recombinaison à la face arrière qui sera obtenu à l'aide de la densité de photocourant, et la phototension. Les expressions : de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès, de la densité de photocourant et de la phototension seront obtenu à l'aide de l'équation de l'équation de continuité.

ETUDE THEORIQUE

La photopile considérée est de type $n^+ - p - p^+$ et sa structure est présentée à la figure 82.

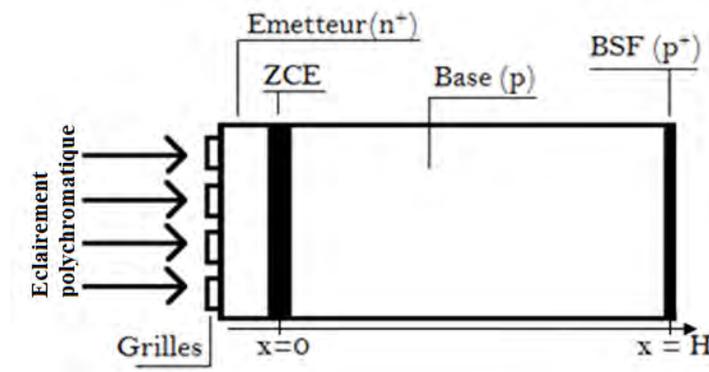


Figure 82: Structure d'une photopile de type n+-p-p+.

Lorsque la photopile est éclairée, il y a création de paires électron-trou dans la base. La densité de porteurs minoritaires en excès dans la base est modélisée par l'équation de continuité suivante:

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{G(x)}{D} \quad (31)$$

Avec

$\delta(x)$ est la densité des électrons générés dans la base à la position x ,

$G(x)$ est le taux de génération des porteurs minoritaires à la position x de la base [24] donné par :

$$G(x) = \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i x} \quad (32)$$

Les coefficients a_i et b_i sont obtenus à partir des valeurs tabulées du rayonnement sous A.M1,5 [25]. Ces coefficients sont donnés par :

$$a_1=6,13 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad a_2=0,54 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad a_3=0,0991 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad b_1=6630 \text{ cm}^{-1}; \quad b_2=1000 \text{ cm}^{-1}; \quad b_3=130 \text{ cm}^{-1},$$

$$(L(T))^2 = \tau D(T) \quad (33)$$

L est la longueur de diffusion des électrons dans la base, elle dépend de la température,

τ est la durée de vie des électrons dans la base,

$$D(T) = \mu(T) \frac{k_b T}{q} \quad (34)$$

$D(T)$ est le coefficient de diffusion des électrons dans la base donné par la relation Einstein.

$$\mu(T) = 1,43.10^9 T^{-2,42} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (35)$$

$\mu(T)$ est le coefficient de mobilité des électrons [26],

k_b est la constante de Boltzmann,

q est la charge élémentaire de l'électron

L'équation (31) a pour solution générale

$$\delta(x, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i (L(T))^2}{D(T) [(L(T))^2 (b_i)^2 - 1]} e^{-b_i x} \quad (36)$$

Les expressions de A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes:

i) At the junction ($x = 0$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(T)} \delta(x, T) \Big|_{x=0} \quad (37)$$

ii) At the back surface ($x = H$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(T)} \delta(x, T) \Big|_{x=H} \quad (38)$$

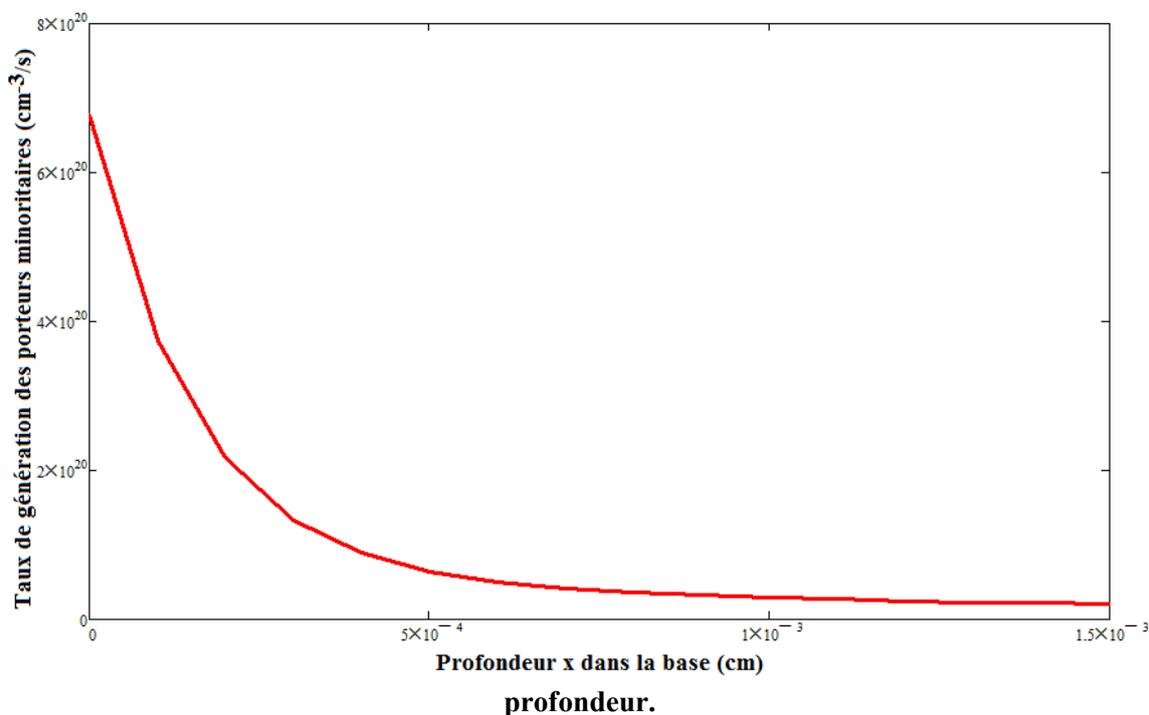
S_f est la vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, elle caractérise aussi le point de fonctionnement de la photopile [3,4].

S_b est la vitesse de recombinaison à l'arrière des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base [4].

Nous allons commencer ce Chapitre avec l'étude du taux de génération des porteurs minoritaires de charge en excès.

La figure 83 est le profil du taux de génération des porteurs de charge en fonction de la profondeur.

Figure 83: Taux de génération des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la



Nous constatons que le taux de génération des porteurs minoritaires de charge en excès est à son maximum à l'entrée de la base. Ce taux de génération des porteurs diminue de plus en plus qu'il évolue en profondeur.

Nous allons étudier la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, après avoir fait l'étude du taux de génération de ces porteurs en fonction de la profondeur

III.2 Densité des porteurs minoritaires de charge

III.2.1 Effet de la température sur la densité des porteurs minoritaires de charge

La figure 84 est le profil de la densité des porteurs minoritaires de charge lorsque la photopile est en situation de circuit ouvert en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la température.

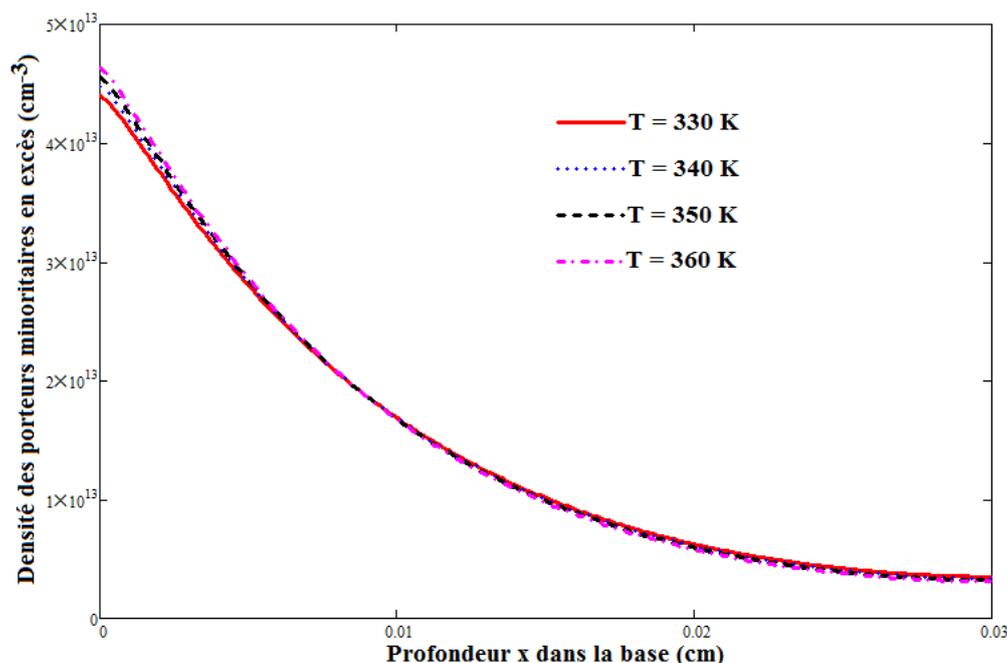


Figure 84 : Densité des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température. La photopile est en circuit ouvert ($S_f = 10$).

Nous remarquons un gradient nul près de la jonction correspondant à une barrière des porteurs minoritaires de charge. Une deuxième partie correspondant à un gradient négatif. A ce stade les porteurs minoritaires subiront une recombinaison en volume et en surface arrière.

Près de la jonction, nous constatons que lorsque la température augmente, la densité des porteurs minoritaires augmente. Cette augmentation de la densité des porteurs est due à l'agitation des porteurs causée par l'augmentation de la température. Par contre loin de la jonction c'est-à-dire à l'intérieur de la base, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès. En effet, lorsque les porteurs sont générés près de la face arrière de la photopile, ils seront renvoyés par le champ électrique né de la jonction base-face arrière (ici jonction p-p⁺) vers la jonction. Cependant pour qu'il ait ce renvoi, il faut avoir un mouvement en un sens unique des porteurs minoritaires. Or l'augmentation de la température provoque un mouvement désordonné de ces porteurs. Donc les porteurs minoritaires ne pourront plus accéder à la jonction émetteur-base. Alors ils resteront à l'intérieur de la base. La force de la température diminue de plus en plus en profondeur. Alors que la recombinaison en volume est intense plus que la recombinaison en surface. La force de la recombinaison volumique l'emporte sur la force de la température. Ainsi les porteurs minoritaires freinés par la température vers la jonction émetteur-base, subiront une recombinaison en volume. D'où la diminution de la densité des porteurs minoritaires de charge quand la température augmente.

La figure 85 présente la densité des porteurs minoritaires de charge quand la photopile est en situation de court-circuit en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la température.

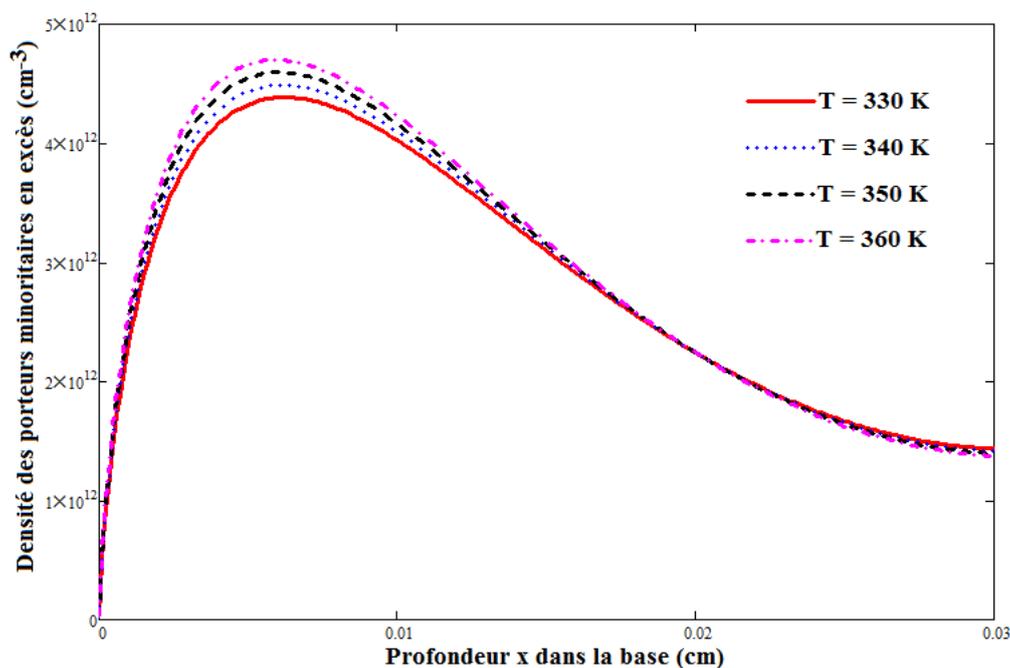


Figure 85: Densité des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température. La photopile est en court-circuit($S_f = 6.10^6$ cm/s).

A la figure 1, la courbe montre trois types de gradients :

- le gradient positif permet la traversée des porteurs minoritaires générés dans cette zone
- le gradient nul, point de densité maximale correspondant à l'abscisse $X_{cc}(T)$, permet une accumulation des porteurs minoritaires de charge et définit en ce point la barrière de stockage des porteurs de charge.
- le gradient négatif empêche les porteurs minoritaires de charge de passer la barrière. Ils subiront des recombinaisons en volume dans la base en surface arrière.

La variation de température est plus sensible au point de densité maximale correspondant à l'abscisse $X_{cc}(T)$. Le déplacement du maximum en profondeur lorsque la température augmente, entraîne un élargissement de la zone de charge d'espace.

Nous allons faire l'étude sur l'impact du point de fonctionnement sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, après l'influence de la température sur la densité des porteurs minoritaires.

III.2.2. Effet du point de fonctionnement sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge.

La figure 86 est le profil de la densité relative des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur dans la base pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction.

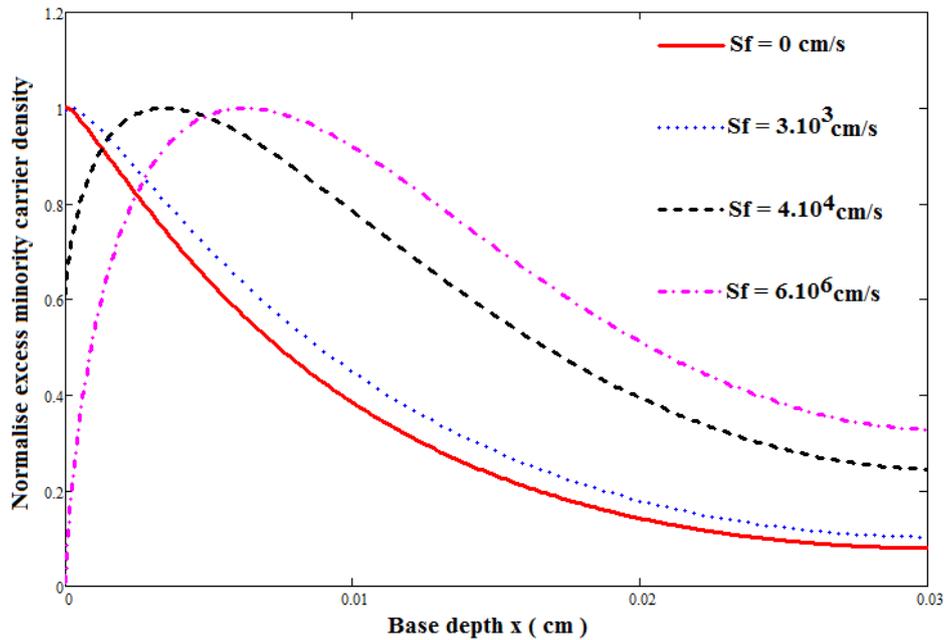


Figure 86: Densité relative des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de la profondeur x pour différentes valeurs de la vitesse recombinaison ($T = 330K$).

L'analyse de la densité relative des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur (figures 86) est identique à celle de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur (figure 85).

Lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente, le maximum de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en excès se déplace vers l'intérieur de la base. Ce maximum de la densité relative des porteurs minoritaires correspond à l'épaisseur de la zone de charge d'espace noté $X(T, Sf)$.

Pour de faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction (circuit ouvert), nous avons de faibles valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace noté $X_{co}(T)$. Cette faible valeur de l'épaisseur de la zone de charge d'espace correspond à un rétrécissement de la zone de charge d'espace. Alors les porteurs minoritaires sont accumulés au niveau de la jonction émetteur-base.

Pour les grandes de la vitesse de recombinaison à la jonction (court-circuit), nous avons de grandes valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace noté $X_{cc}(T)$. Cette grande valeur de l'épaisseur de la zone de charge d'espace correspond à un élargissement de la zone de charge d'espace. Ainsi le maximum de porteurs minoritaires traverse la jonction émetteur-base.

Au niveau de la figure 86, nous avons étudié la densité relative des porteurs minoritaires pour différentes vitesses de recombinaison à la jonction. Cependant nous allons étudier

la densité relative des porteurs uniquement en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm/s}$) et en court-circuit ($S_f = 6.10^6 \text{ cm/s}$).

Le profil de la densité relative des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur dans la base est donné à la figure 87 quand la photopile fonctionne en court-circuit et en circuit ouvert.

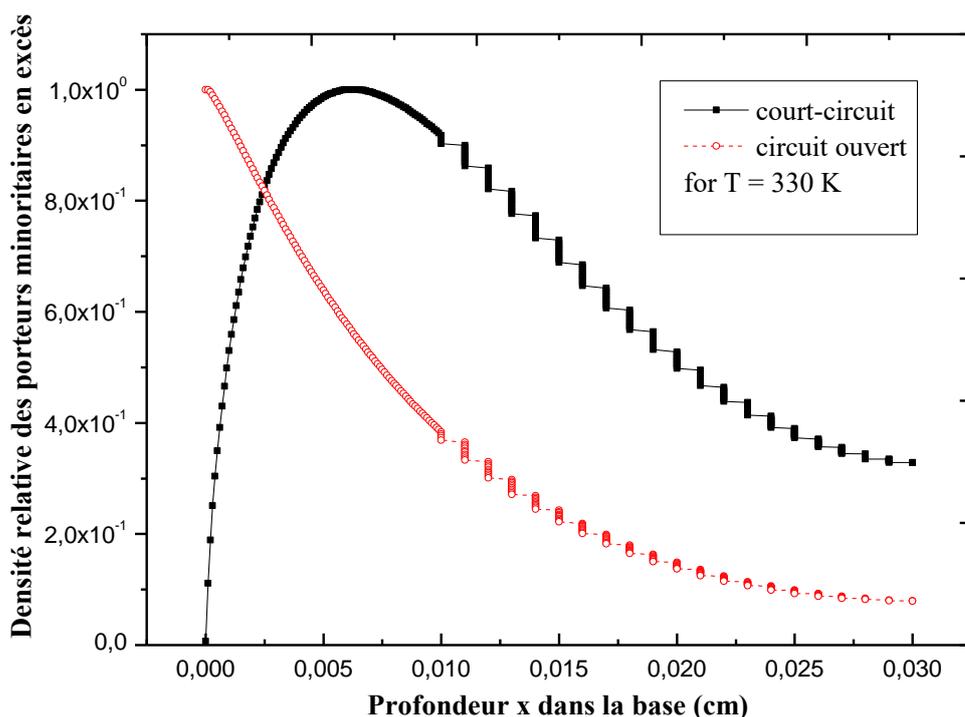


Figure 87: Densités relatives des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert et de la photopile en court-circuit en fonction de la profondeur x. T = 330K.

$X_{co}(T)$ est l'épaisseur de la zone de charge d'espace quand la photopile fonctionne en circuit ouvert.

$X_{cc}(T)$ est l'épaisseur de la zone de charge d'espace lorsque la photopile fonctionne en court-circuit.

Alors le rendement $\eta(T)$ de la capacité de la photopile peut être défini à partir des abscisses $X_{co}(T)$ et $X_{cc}(T)$ sous la forme [12].

$$\eta(T) = 1 - \frac{X_{co}(T)}{X_{cc}(T)} \quad (39)$$

L'étude du modèle de la capacité d'un condensateur plan $C = \frac{\epsilon S}{X}$ peut se faire en comparant deux abscisses du maximum de la densité relative.

La recherche du rendement de la capacité se simplifie à celle de l'abscisse $X_{cc}(T)$, car la valeur de $X_{co}(T)$ est négligeable devant celle de $X_{cc}(T)$.

Etudions l'influence de la température sur le point de fonctionnement de la photopile.

III.2.3 Effet de la température sur le point de fonctionnement de la photopile

a. Circuit ouvert

Les figures 88, 89, 90 et 91 représentent la densité relative des porteurs minoritaires de la photopile en circuit ouvert en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température.

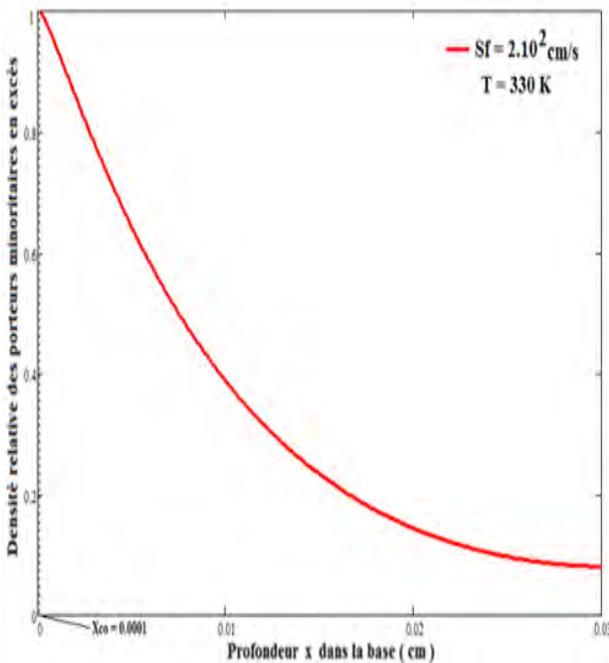


Figure 88: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x. T=330K.

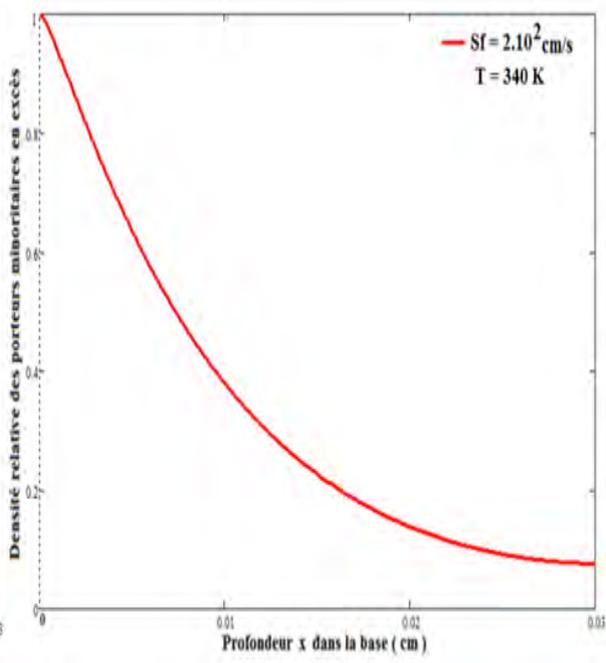


Figure 89: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x. T=340K.

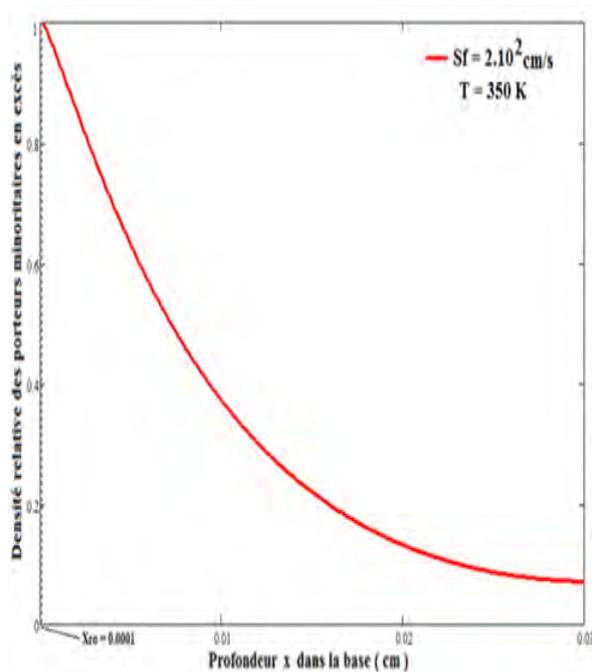


Figure 90: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x . $T=350K$.

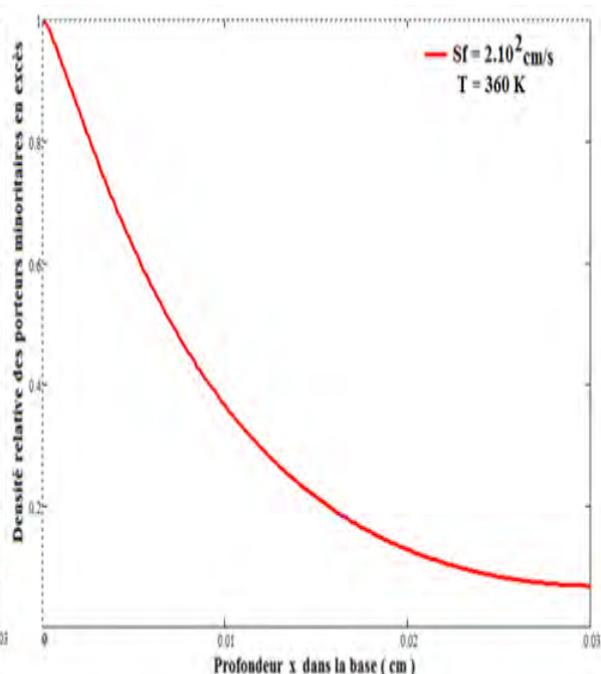


Figure 91: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en circuit ouvert en fonction de la profondeur x . $T=360K$.

Les figures 88, 89, 90 et 91 permettent d'obtenir le tableau 17

Tableau 17: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$X_{cc}(T)$ (cm)
330	0
340	0,0001
350	0
360	0,0001

La figure 92 est obtenue à partir du tableau 17.

Le profil de l'épaisseur de la zone de d'espace de la photopile en circuit ouvert en fonction de la température est donné par la figure 92.

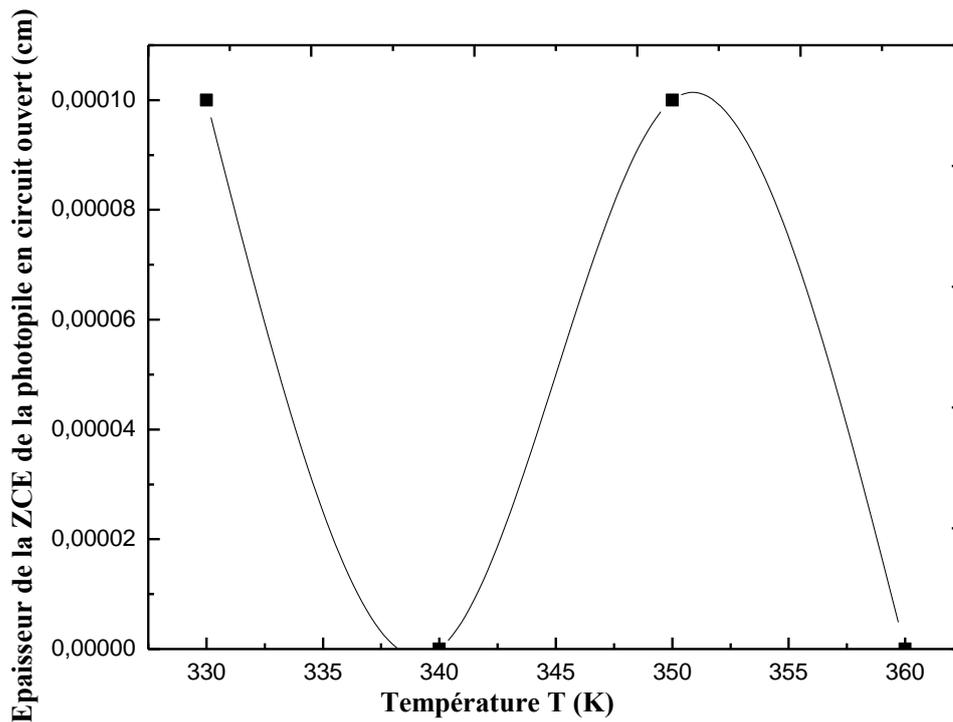


Figure 92: Epaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en circuit ouvert en fonction de la température.

Nous observons que la variation de l'épaisseur de la ZCE de la photopile en situation de circuit ouvert n'est pas significative lorsque la température augmente.

Après avoir étudié la densité relative des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile en circuit ouvert pour différentes valeurs de la température, Nous allons faire de même pour la densité relative des porteurs minoritaires de charge de la photopile en situation de court-circuit pour différentes températures.

b. Court-circuit

Les figures 93, 94, 95 et 96 représentent les profils de la densité des porteurs minoritaires de charge de la photopile en court-circuit pour différentes valeurs de la température.

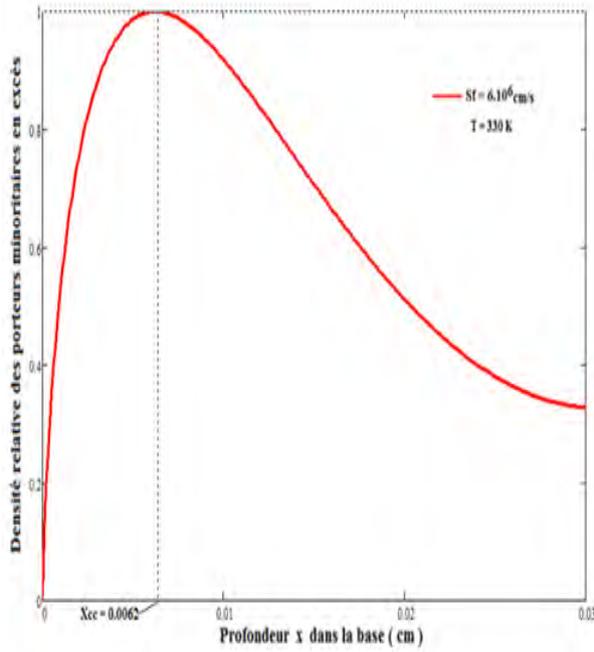


Figure 93: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x .
 $T=330\text{K}$.

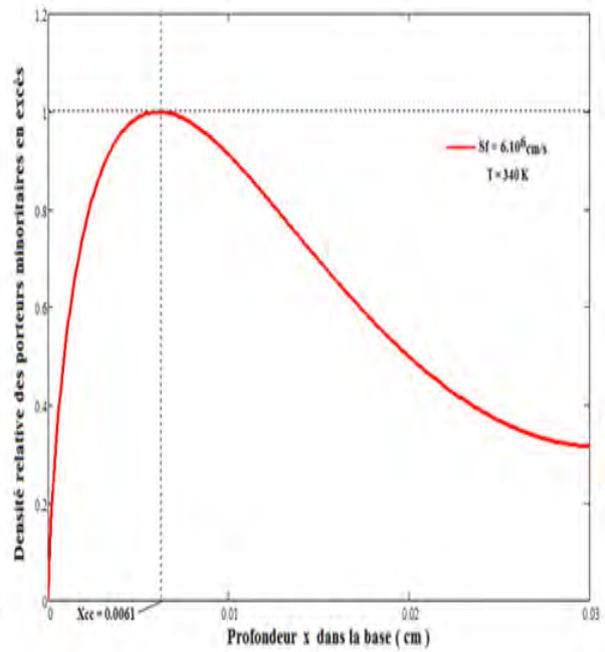


Figure 94: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x .
 $T=340\text{K}$.

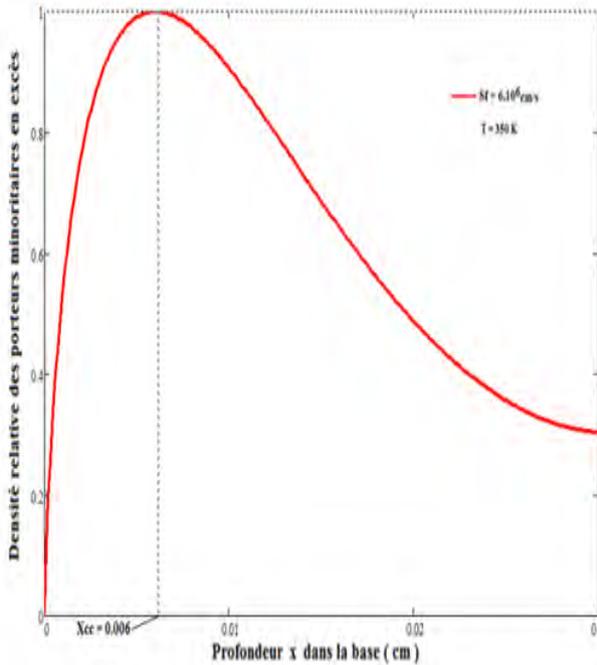


Figure 95: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x .
 $T=350\text{K}$.

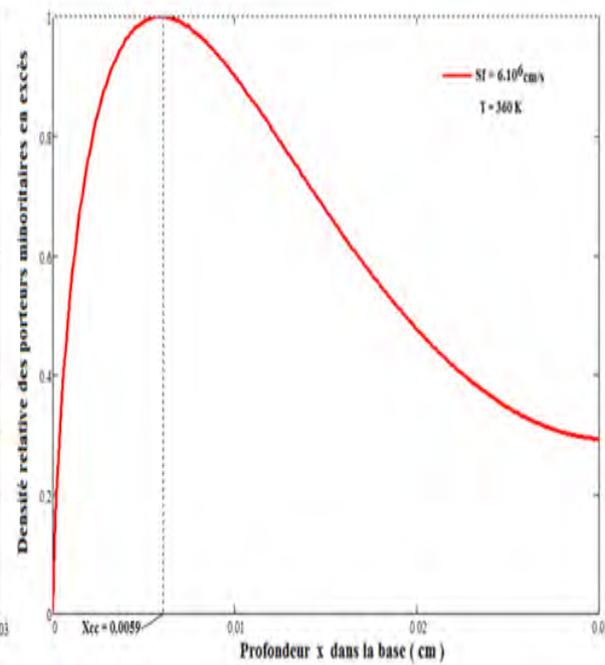


Figure 96: Densité relative des porteurs minoritaires lorsque la photopile est en court-circuit en fonction de la profondeur x .
 $T=360\text{K}$.

**court-circuit en fonction de la profondeur x.
T=360K.**

Le tableau 18 est obtenu en utilisant les figures 93, 94, 95 et 96.

Tableau 18: les valeurs de l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit $X_{cc}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$X_{cc}(T)$ (cm)
330	0,0062
340	0,0061
350	0,0060
360	0,0059

A partir du tableau 18, la figure 97 est obtenue

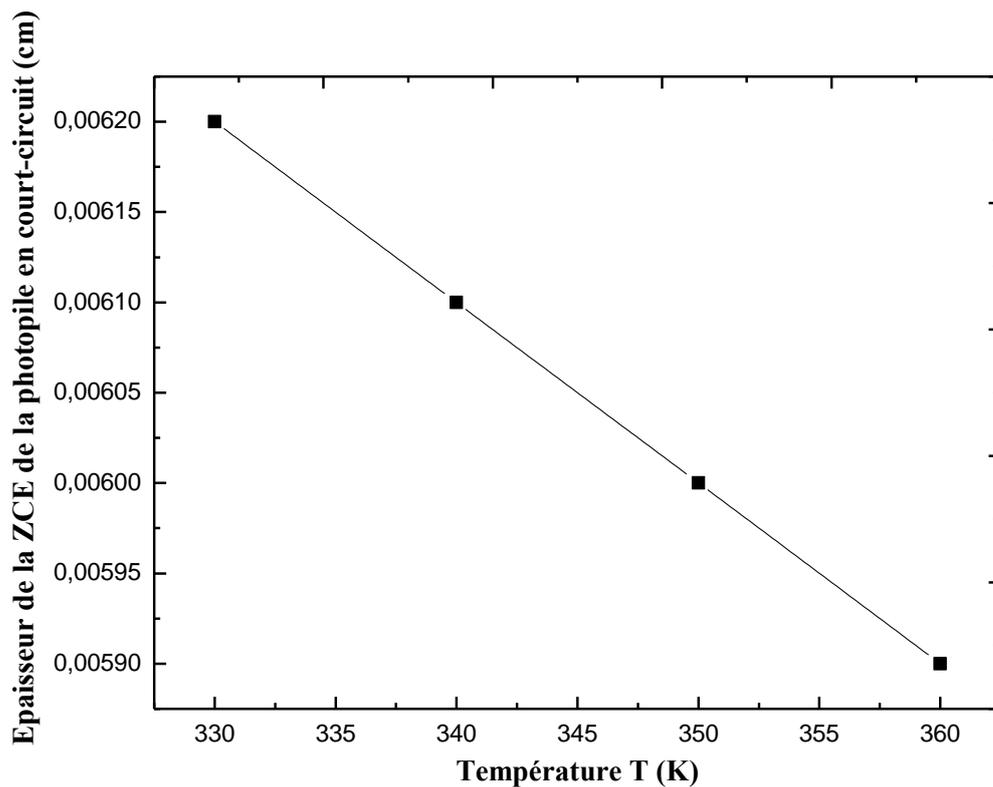


Figure 97: Epaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE) de la photopile en court-circuit en fonction de la température.

Nous constatons que lorsque la température augmente, l'épaisseur de la zone de charge d'espace diminue.

Nous allons étudier la densité de photocourant pour différentes valeurs de la température.

III.3. Densité de photocourant

Le photocourant découle de la diffusion des porteurs minoritaires à la jonction et son expression est donnée par :

$$J_{ph}(S_f, T) = qD(T) \left. \frac{\partial \delta(x, S_f, T)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (40)$$

III.3.1 Effet de la température sur la densité de photocourant

Le profil de la densité de photocourant en fonction de la température pour différentes valeurs de la température est représenté par figure 98.

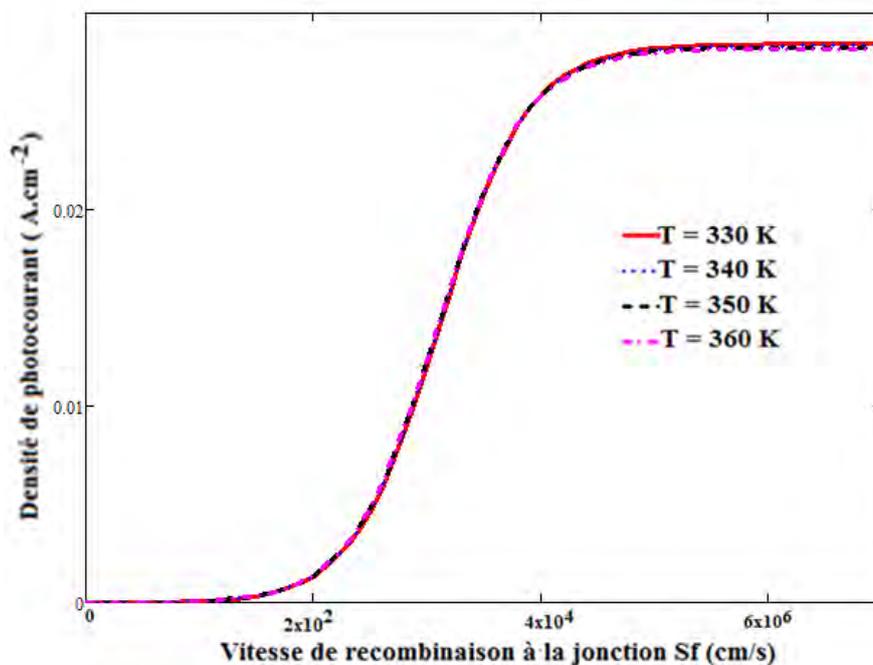


Figure 98 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

Nous allons faire l'étude de la vitesse de recombinaison à la face arrière en passant par la densité de photocourant.

Pour mieux voir l'influence de la température, nous avons tracé la densité de photocourant en fonction de la température de la photopile en circuit ouvert (figure 99) et densité de photocourant en fonction de la température de la photopile en court-circuit (figure 100).

Les figures 99 et 100 présentent respectivement les profils de la densité de photocourant en fonction de la température de la photopile en circuit ouvert et de la densité de photocourant en fonction de la température de la photopile en court-circuit.

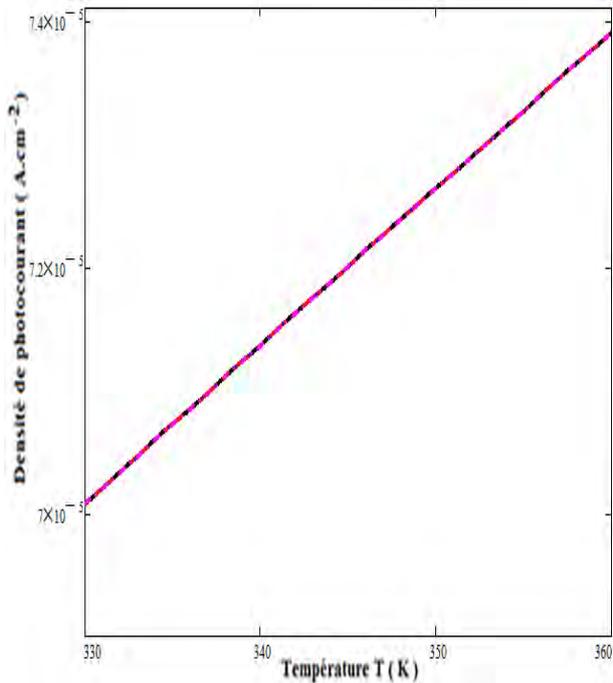


Figure 99: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température de la photopile en circuit ouvert.

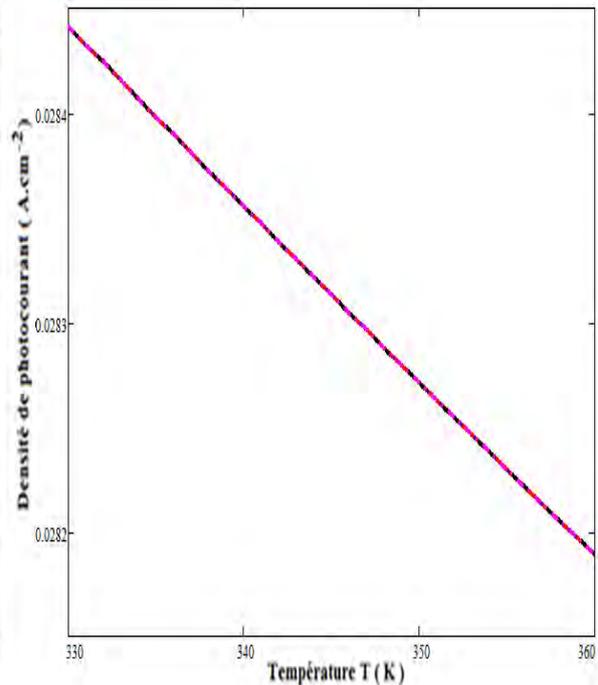


Figure 100: Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température de la photopile en court-circuit.

Nous constatons que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la densité de photocourant (figure 99) et une augmentation de la densité de photocourant (figure 100).

Les figures 99 et 100 nous ont permis d'établir l'équation 41

$$J_{ph}(T) = \psi T + \varphi \quad (41)$$

Avec,

ψ la pente et φ l'ordonnée à l'origine qui peut être considéré comme une densité de photocourant.

Pour la photopile en circuit ouvert nous avons; $\psi = 1,27 \cdot 10^{-7} \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-1}$, $\varphi = 2,81 \cdot 10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}$

Pour la photopile en circuit ouvert nous avons ; $\psi = -8,70.10^{-6} \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-1}$, $\varphi = 0,031 \text{ A.cm}^2$

III.3.2 Vitesse de recombinaison à l'arrière de la photopile.

L'utilisation de l'expression de la densité de photocourant de photocourant, avec l'appui de l'équation 42 :

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial S_{\geq 5}} = 0 \quad (42)$$

nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison à la face arrière donnée par l'équation 43

$$S_b(T) = \frac{\left[-\left[\sum_{i=1}^3 \frac{K(T)}{L(T)D(T)} \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right) \right] - \sum_{i=1}^3 \frac{K(T)b_i}{D(T)} e^{-b_i H} \right]}{\left[\sum_{i=1}^3 \frac{K(T)}{(D(T))^2} \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right) - \sum_{i=1}^3 \frac{K(T)b_i}{(D(T))^2} e^{-b_i H} \right]} \quad (43)$$

La figure 101 est le profil de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température.

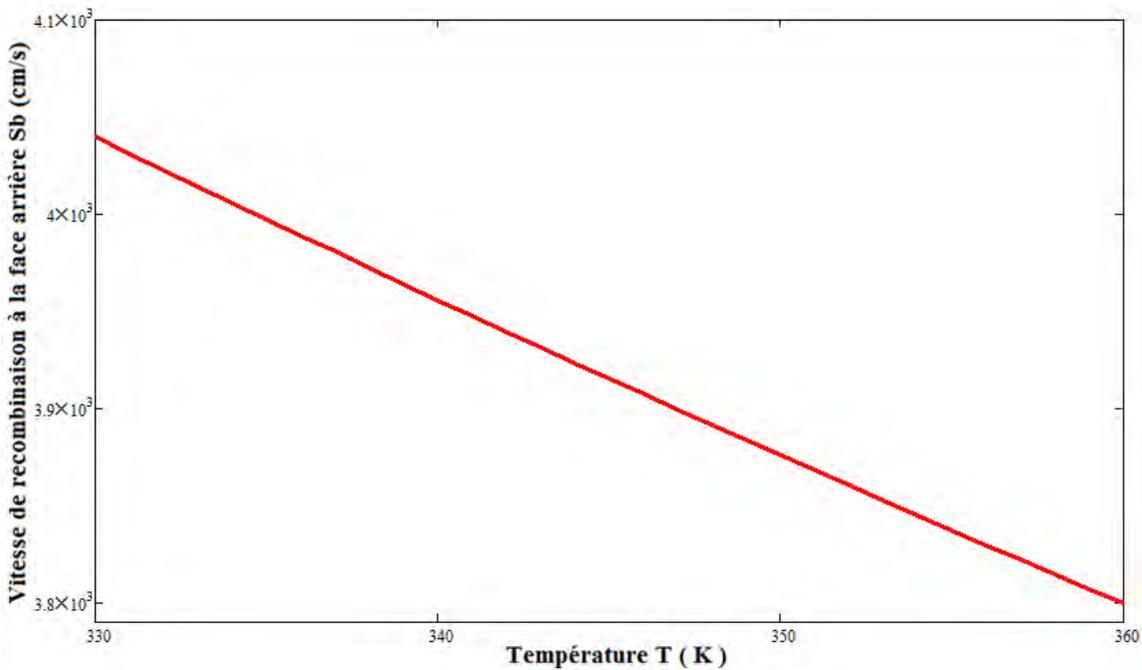


Figure 101: vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température

Nous remarquons que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la vitesse de recombinaison.

En effet, la vitesse de recombinaison à la face arrière caractérise les pertes par recombinaison des porteurs minoritaires de charge en excès. L'augmentation de la température provoque une agitation des porteurs dans la base. Pour avoir une recombinaison, il faut que les porteurs aient fait un déplacement vers son lieu de recombinaison. Et l'augmentation de la température perturbe le sens déplacement.

Ainsi la figure 101 permet d'obtenir l'équation 44

$$S_b(T) = \sigma T + \theta \quad (44)$$

Avec,

$\sigma = -8,021 \text{ cm.s}^{-1}\text{K}^{-1}$ la pente et $\theta = 1317,3 \text{ cm/s}$ l'ordonnée à l'origine assimilable à une vitesse de recombinaison à la face arrière.

Après l'influence de la température sur le photocourant, étudions l'effet de la température sur la phototension

III.4. Phototension

La phototension de la photopile est donnée par la relation de Boltzmann.

$$V_{ph}(S_f, T) = V_T \ln \left[\frac{N_b}{(n_i(T))^2} \delta(0, S_f, T) + 1 \right] \quad (45)$$

Où V_T est la tension thermique, elle est définie comme suit :

$$V_T = \frac{k_b T}{q} \quad (46)$$

N_b est le taux de dopage et n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires [7] exprimé comme suit:

$$n_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (47)$$

E_g est l'énergie de gap, et correspond à la différence entre l'énergie de la bande de conduction E_c et celle de la bande de valence E_v . $E_g = 1,12 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

A est une constante. $A = 3,87.10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$

III.4.1. Effet de la température sur la phototension

Le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes températures est présenté par la figure 102.

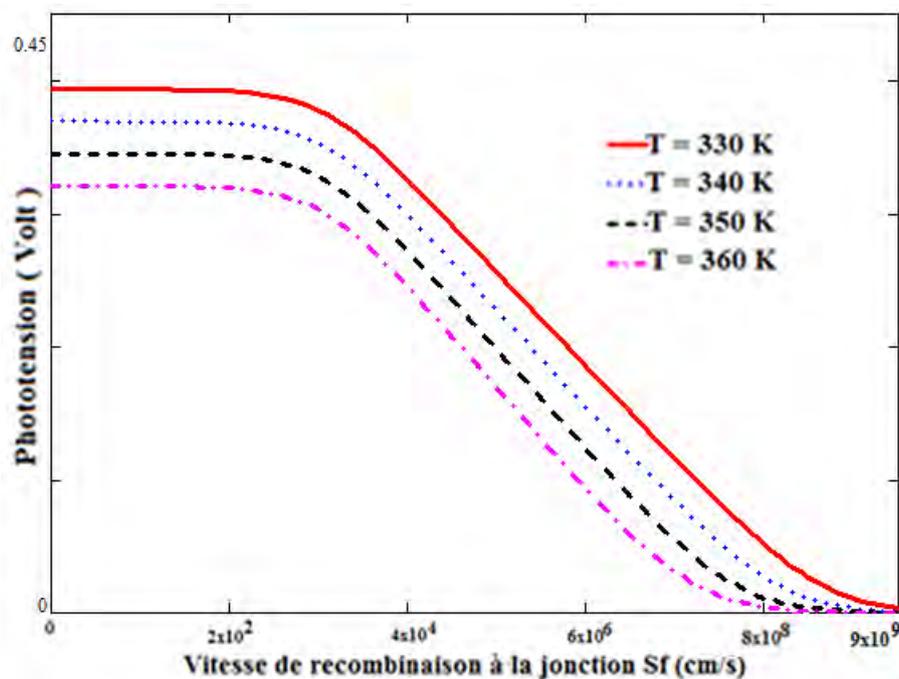


Figure 102: Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température.

Nous remarquons que la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction présente trois parties :

- i) Une partie correspondant à de très faibles vitesses de recombinaison à la jonction (situation de circuit ouvert de la photopile). Dans cette partie quel que soit la vitesse de recombinaison, la phototension reste constante et maximale. Les porteurs minoritaires de charge sont accumulés à la jonction.
- ii) Une partie qui correspond aux grandes vitesses de recombinaison à la jonction (situation de court-circuit de la photopile). La phototension est nulle et constante quel que soit la valeur de la vitesse de recombinaison. Tous les porteurs minoritaires de charge en excès dans la base traversent la jonction pour être collectés et participer à la production de la densité de photocourant.
- iii) Une et dernière partie correspondant à la diminution de la phototension lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction quitte les faibles valeurs (circuit ouvert) pour les grandes valeurs (court-circuit). Les porteurs minoritaires de charge en excès dans

la base qui étaient accumulés à la jonction traversent la jonction de plus en plus la vitesse de recombinaison à la jonction augmente.

Lorsque la température augmente, la phototension diminue.

Etudions la détermination expérimentale des densités de photocourant de court-circuit et phototension pour différentes températures.

III.5 Détermination expérimentale des photocourant de court-circuit J_{phcc} et phototension de circuit ouvert V_{phco}

Les figures 103 et 104 présentent respectivement les courbes de détermination de J_{phcc} à partir de la densité de photocourant et de V_{phco} à partir de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes températures.

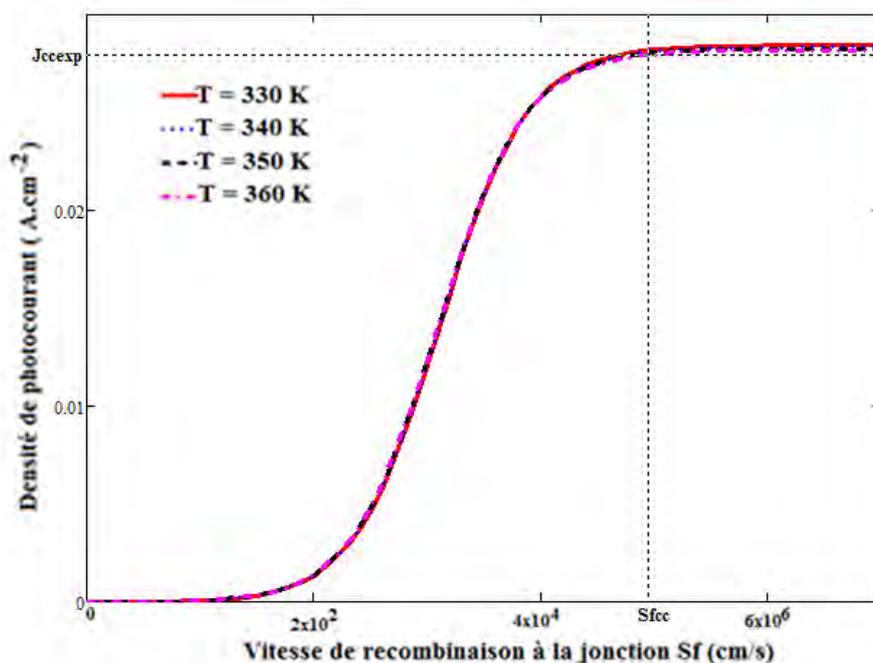


Figure 103: Détermination de J_{phcc} à partir de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

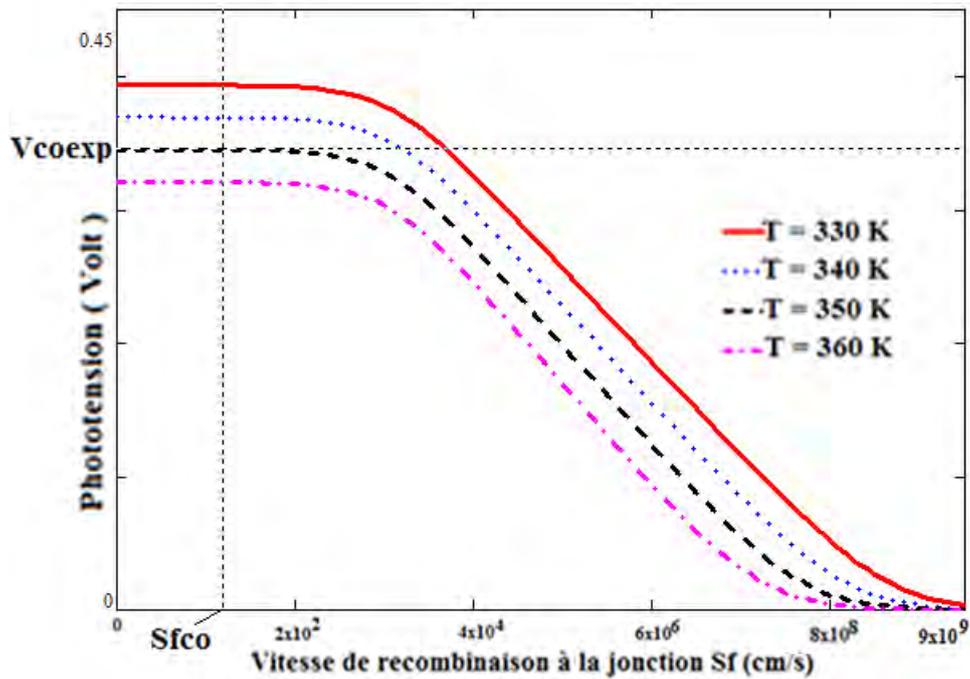


Figure 104: Détermination de V_{phco} à partir de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la température.

Les valeurs de vitesses de recombinaison à la jonction initiant le court-circuit S_{fcc} et vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert S_{fco} ont été obtenu respectivement à partir des figures 103 et 104. Aussi la densité de photocourant de court-circuit expérimentale J_{phcexp} d'une part (figure 103) et la phototension de circuit ouvert expérimentale $V_{phcoexp}$ d'autre part (figure 104) ont été obtenu. Ces valeurs sont données par le tableau 18.

Tableau 19: Valeurs de S_{fcc} , S_{fco} , J_{phcexp} et $V_{phcoexp}$ expérimentales avec leurs températures

T(K)	$S_{fcc}(cm/s)$	$S_{fco}(cm/s)$	$J_{phcexp}(A/cm^2)$	$V_{phcoexp}(Volt)$
330	$2,89.10^5$	$2,64.10^2$	$2,81.10^{-2}$	0,3915
340	$3,03.10^5$	200	$2,79.10^{-2}$	0,3678
350	$2,35.10^5$	$1,50.10^2$	$2,78.10^{-2}$	0,3439

A partir du tableau 19, les figures 105 et 106 ont été obtenues

La figure 105 est le profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la température

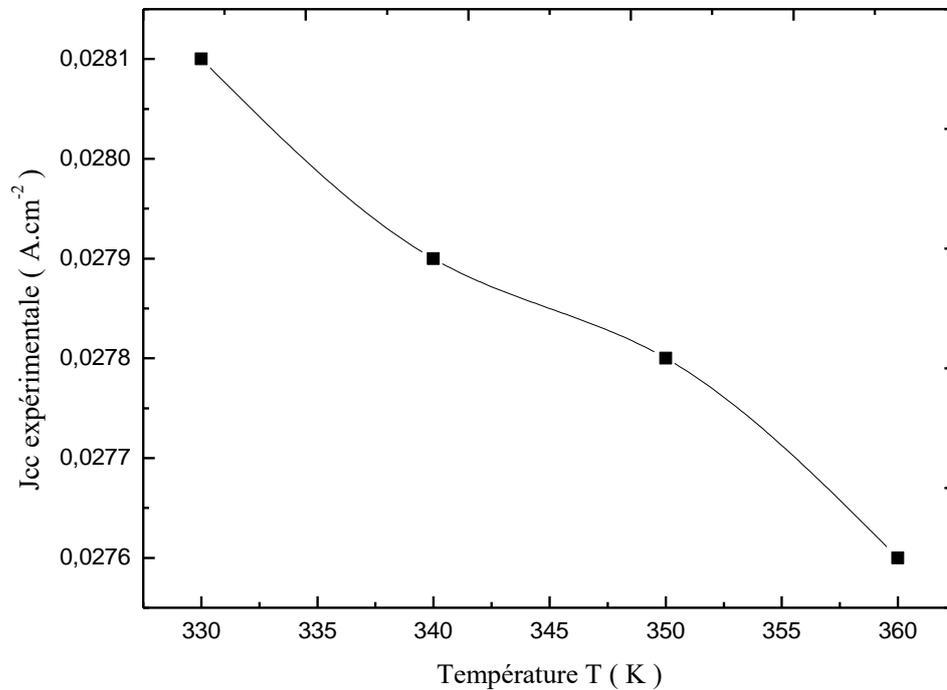


Figure 105: Densité de photocourant expérimentale en fonction de la température.

Nous constatons que lorsque la température augmente, la densité de photocourant de court-circuit diminue.

La figure 106 présente le profil de la phototension de circuit ouvert en fonction de la température.

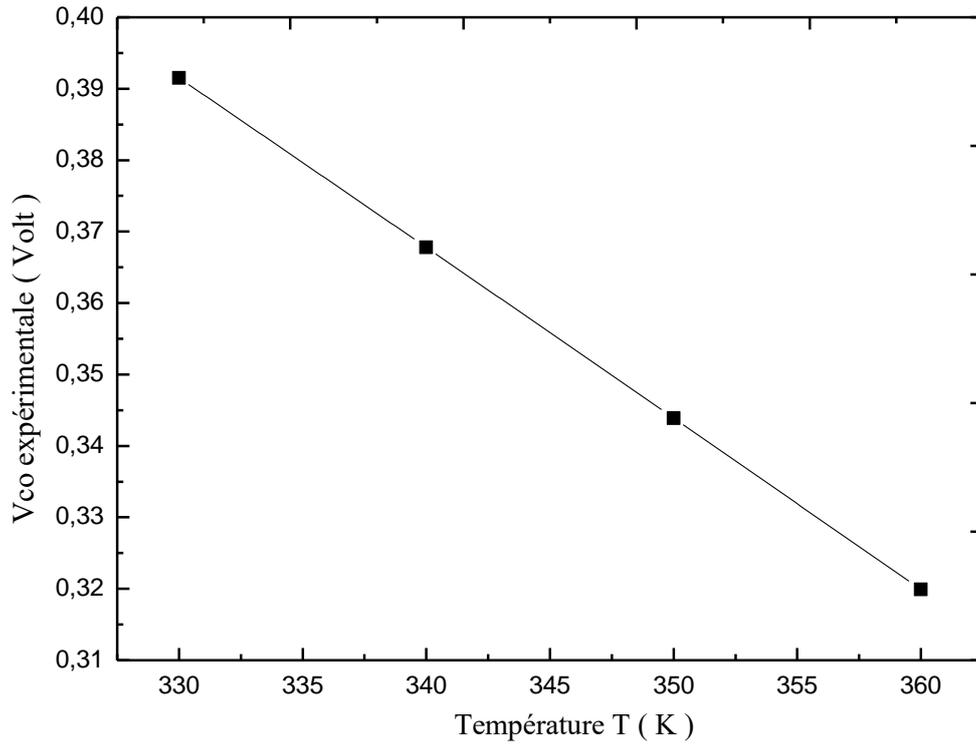


Figure 106: Phototension expérimentale en fonction de la température.

Nous remarquons que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la phototension de circuit ouvert.

Etudions le comportement de la capacité vis-à-vis de la température, après l'étude de cette dernière sur la densité de photocourant et la phototension.

III.6. Capacité

En utilisant l'expression de la phototension, la capacité de la photopile est exprimée sous la forme :

$$C(S_f, T) = \frac{dQ(S_f, T)}{dV(S_f, T)} \quad (48)$$

$$\text{avec } Q(S_f, T) = q\delta(x=0, S_f, T) \quad (49)$$

and

$$C = q \frac{d\delta(x=0)}{dV} \quad (50)$$

Equation (50) peut être réécrite comme suit:

$$C = q \frac{d\delta(x=0)}{dS_f} \frac{1}{\frac{dV}{dS_f}} \quad (51)$$

En tenant compte de l'expression de la phototension et de la densité des porteurs minoritaires, nous obtenons l'expression suivante:

$$C(S_f, T) = \frac{q(n_i(T))^2}{N_b V_T} + \frac{q\delta(x=0, S_f, T)}{V_T} \quad (52)$$

$$C(S_f, T) = C_0(T) + C_d(S_f, T) \quad (53)$$

$$\text{Où } C_0(T) = \frac{q(n_i(T))^2}{N_b V_T} \quad (54)$$

$$C_d(S_f, T) = \frac{q\delta(x=0, S_f, T)}{V_T} \quad (55)$$

$C_0(T)$ est la capacité de la photopile en court-circuit.

$C_d(T, S_f)$ est la capacité de diffusion de la photopile à la température T , sous éclairage polychromatique, en un point de fonctionnement donné par S_f .

III.6.1 Effet de la température sur la capacité

La figure 107 montre le profil de la capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

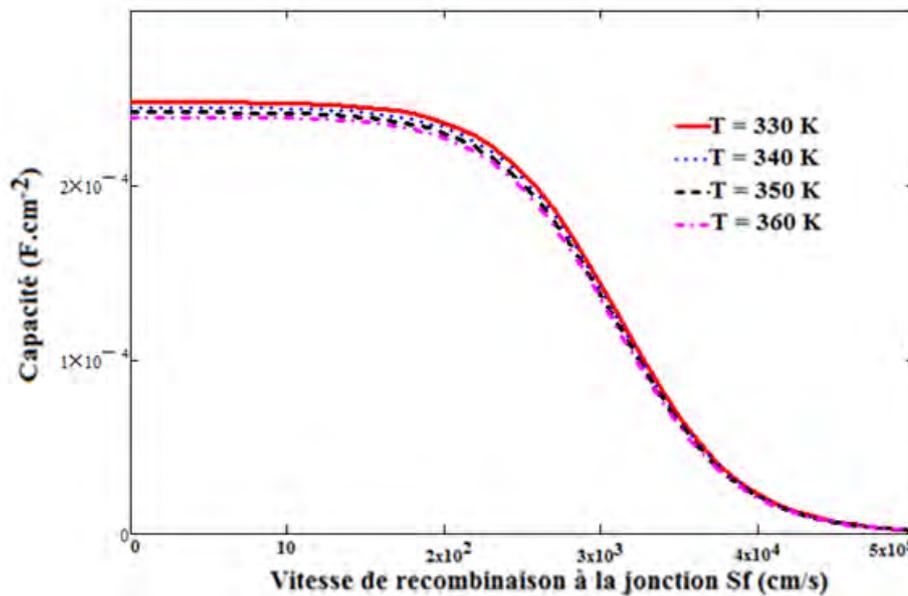


Figure 107: Capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

Cette courbe (figure 107) montre deux paliers:

- a) La zone de photopile en circuit ouvert, la vitesse de recombinaison est inférieure à 2.10^2cm.s^{-1} . Il ya une stabilité et un maximum de la capacité. Donc il ya stockage de porteurs minoritaires à la jonction émetteur-base.
- b) La zone de photopile en court-circuit, La vitesse de recombinaison à la jonction supérieure est à 4.10^4cm.s^{-1} .La faiblesse de la capacité est atteint. Alors il ya un important passage de porteurs minoritaires de charges à la jonction émetteur-base.

La partie entre le circuit ouvert et le court-circuit, la capacité de la photopile admet une décroissance. Cette dernière est due à une rapide libération des porteurs minoritaires de charges en excès.

Lorsque la photopile est en circuit ouvert ($S_f < 2.10^2\text{cm.s}^{-1}$), l'influence de la température est plus visible. La capacité de diffusion agit peu, c'est la température qui agit par l'intermédiaire de $C_0(T)$. Cette capacité $C_0(T)$ diminue quand la température augmente. La faiblesse de la capacité entraine le rétrécissement de son épaisseur. Ce rétrécissement est dû au mouvement du point de fonctionnement vers le court-circuit.

L'expression du rendement de la capacité de la photopile donnée au niveau de l'équation 39 peut être réécrite de la manière suivante :

$$\eta(T) = 1 - \frac{C_{cc}(T)}{C_{co}(T)} \tag{56}$$

$C_{co}(T)$ est la capacité de la photopile en circuit ouvert et $C_{cc}(T)$ la capacité de la photopile en court-circuit.

Leurs valeurs de $C_{co}(T)$ et $C_{cc}(T)$ sont données par le tableau 20.

Tableau 20: Valeurs de $C_{co}(T)$ et $C_{cc}(T)$ avec leurs températures respectives.

T(K)	$C_{co}(T)(F/cm^2)$	$C_{cc}(T)(F/cm^2)$	$\eta(T)$
330	0,000247	$1,45.10^{-8}$	$9,99941.10^{-1}$
340	0,000244	$1,46.10^{-8}$	$9,99940.10^{-1}$
350	0,000244	$1,60.10^{-8}$	$9,99934.10^{-1}$
360	0,000239	$2,07.10^{-8}$	$9,99913.10^{-1}$

Nous obtenons à partir du tableau 20 la figure 108.

Le profil du rendement de la capacité de la photopile en fonction de la température est donné par la figure 108.

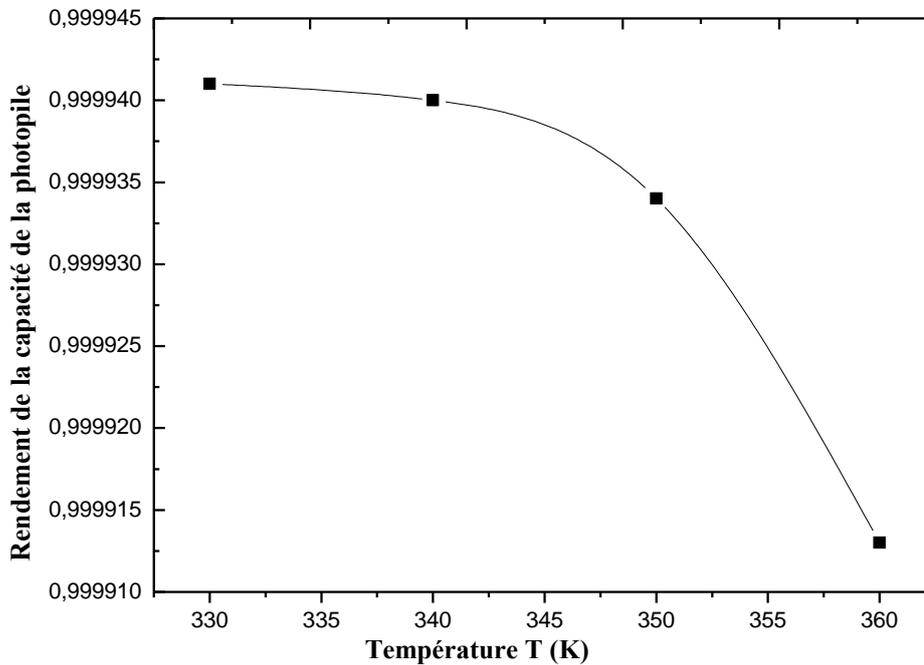


Figure 108: Rendement de la capacité de la photopile en fonction de la température.

Nous remarquons que lorsque la température diminue, le rendement de la capacité de la photopile augmente.

Etudions la capacité en fonction de la température lorsque la photopile est en circuit ouvert et lorsque la photopile est en court-circuit.

La figure 109 représente le profil de la capacité de la photopile lorsqu'elle est en situation de circuit ouvert en fonction de la température.

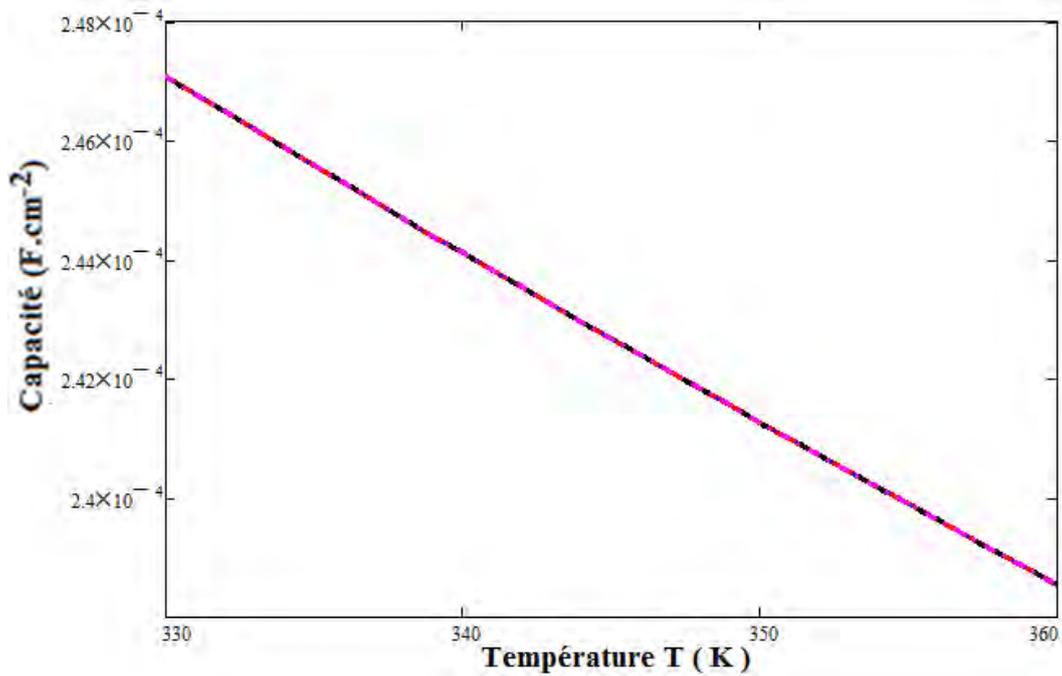


Figure 109: Capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$) en fonction de la température.

Nous remarquons que lorsque la température augmente, la capacité de la photopile en circuit ouvert diminue.

Après la capacité de la photopile en circuit ouvert, étudions la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température.

La figure 109 permet de tirer une autre expression de la capacité en fonction de la température. Cette expression est donnée par l'équation 57

$$C(T) = \mathcal{R}T + \mathcal{N} \quad (57)$$

Avec, $\mathcal{R} = -3,84 \cdot 10^{-7} \text{ F.cm}^{-2}\text{K}^{-1}$ la pente et $\mathcal{N} = 3,67 \cdot 10^{-4} \text{ F/cm}^2$ l'ordonnée à l'origine considérée comme une capacité.

Le profil de la capacité de la photopile en situation de court-circuit en fonction de la température est représenté par la figure 110.

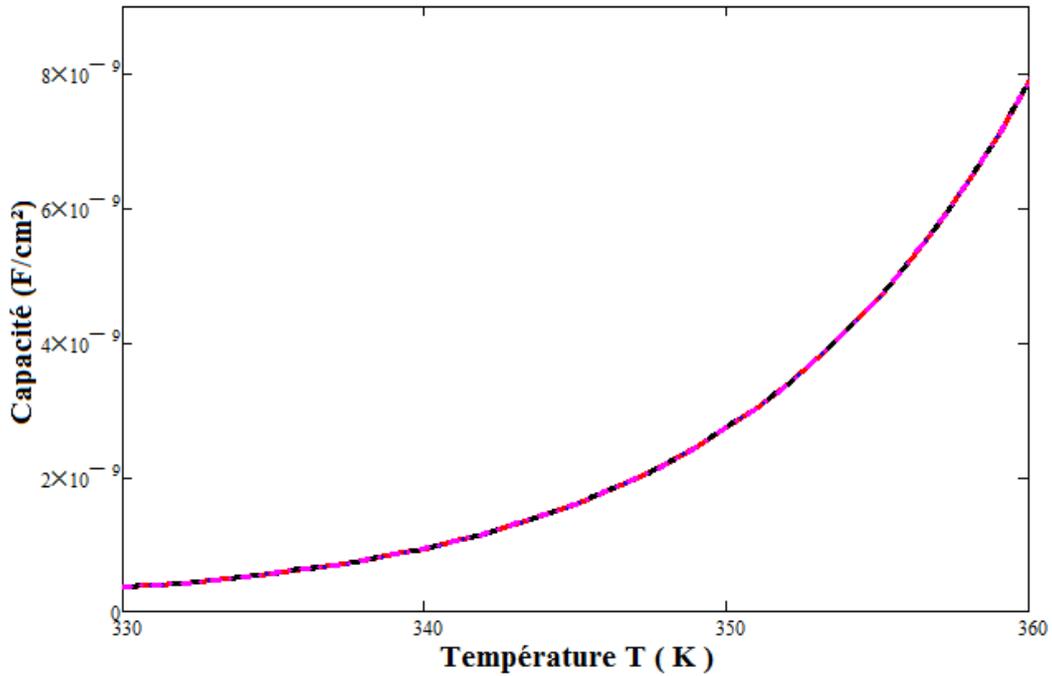


Figure 110 : Capacité de la photopile en court-circuit ($S_f=9.10^9$ cm/s) en fonction de la température.

Nous constatons (figure 110) que l'augmentation de la température provoque une augmentation de la capacité de la photopile

III.6.2 Influence de la température sur la Capacité de la photopile en fonctionnement de court-circuit

La figure 111 présente le profil du Logarithme de la capacité de la photopile en fonction de la phototension

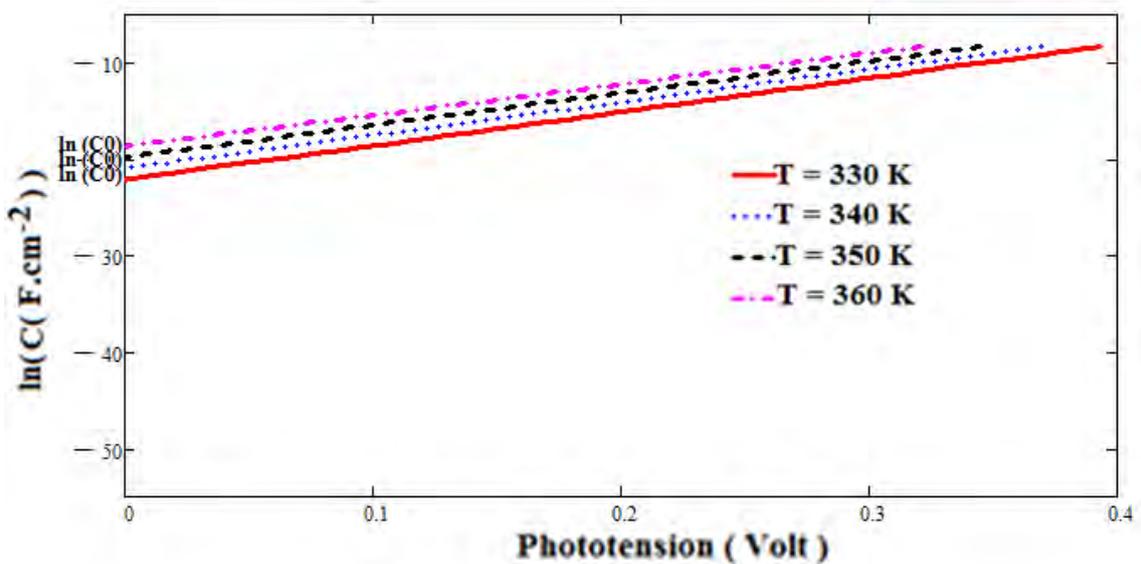


Figure 111: Logarithme de la capacité en fonction de la phototension pour différentes de la température.

Nous avons produit la capacité de la photopile en situation de court-circuit $C_0(T)$ pour chaque valeur de la température T en utilisant la figure 111. Ces valeurs de $C_0(T)$ sont représentées dans le tableau 21 suivant :

Tableau 21: Valeurs de $C_0(T)$ avec leurs températures respectives

$T(K)$	$C_0(T) (F.cm^{-2})$
330	$2,46.10^{-10}$
340	$8,47.10^{-10}$
350	$2,68.10^{-9}$
360	$7,79.10^{-9}$

La capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température donnée par la figure 112 est tirée à partir du tableau 21.

La figure 112 est le profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température.

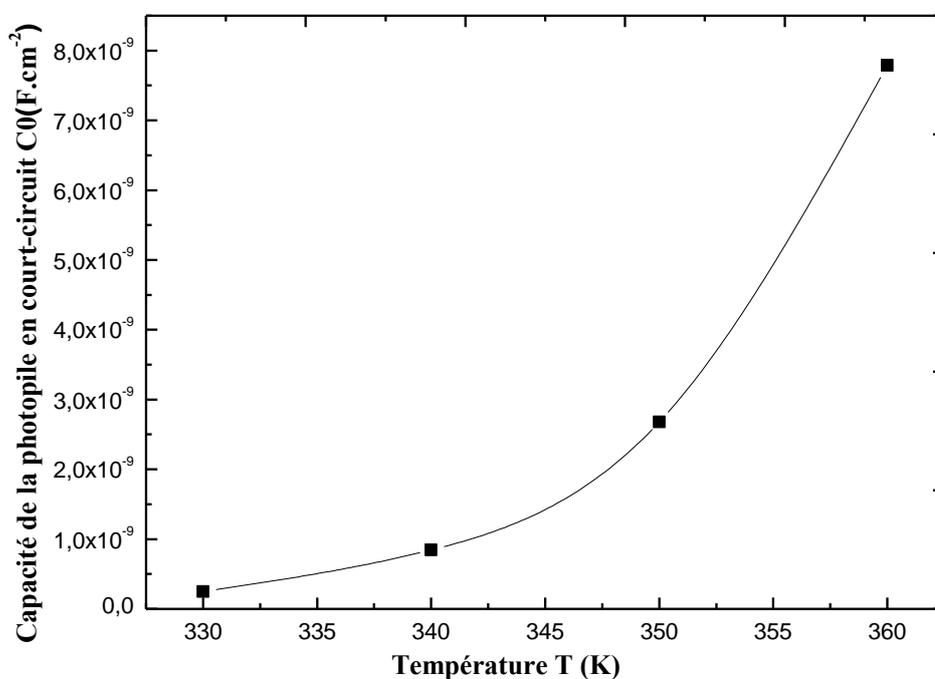


Figure 112: Capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température.

Nous observons l'augmentation de la capacité de la photopile en court-circuit induit par l'augmentation de la température. Cette figure 112 vérifie la figure 110.

Nous allons maintenant observer la figure 113 qui est le logarithme de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température extrait à partir du tableau 20.

Le profil du logarithme de la capacité de la photopile C0 en court-circuit en fonction de la température est donné par la figure 113

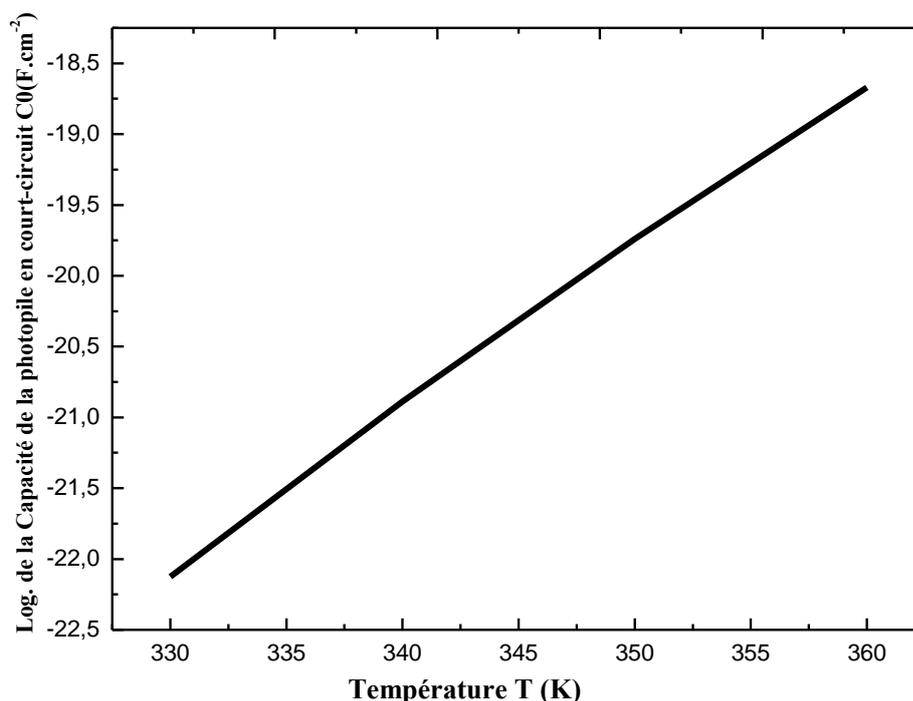


Figure 113: Logarithme de la capacité de la photopile en fonction de la température.

Nous remarquons que cette figure confirme l'augmentation de la capacité de la photopile en court-circuit quand la température augmente.

Le profil de la capacité de la photopile en circuit ouvert en fonction de la température est représenté par la figure 114

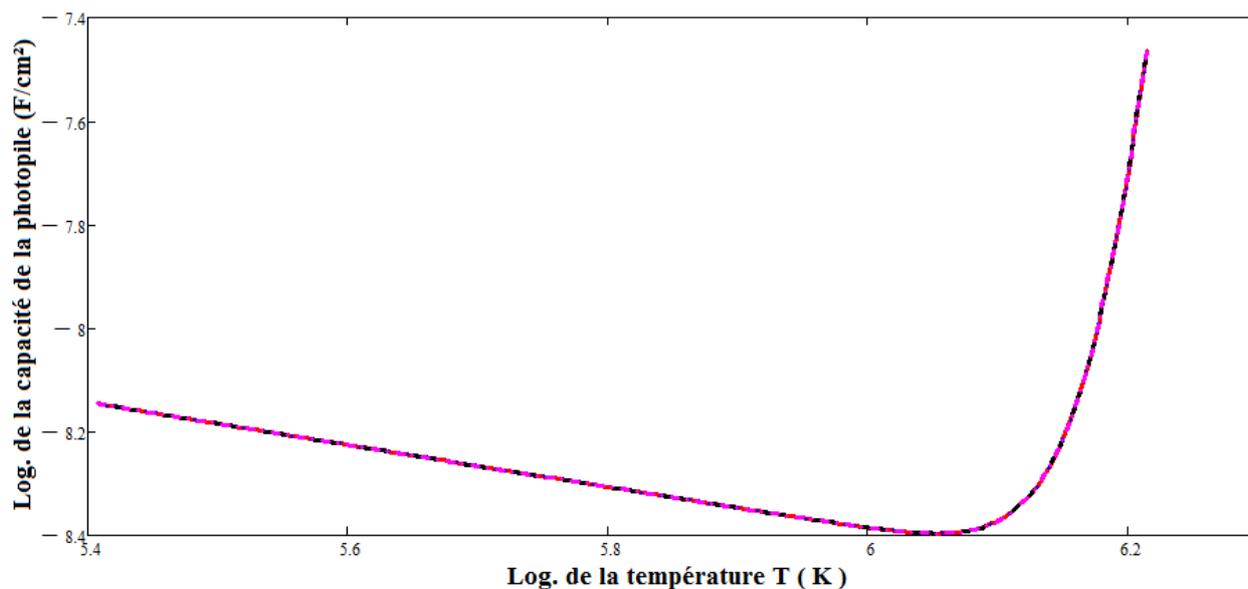


Figure 114: Capacité de la photopile en circuit ouvert ($S_f = 10 \text{ cm}^2$) en fonction de la température.

La tangente des deux droites (ascendante et descendante) permet de déterminer une température optimale noté T_{opt} . Cette optimale est celle pour laquelle la photopile a un meilleur rendement.

Nous constatons que pour des températures inférieures à T_{opt} , la capacité de la photopile en circuit ouvert diminue. Cela correspond à une augmentation de l'épaisseur $X_{co}(T)$ de la zone de charge d'espace, donc une extension de la zone de charge d'espace. Par contre la capacité de la photopile en circuit ouvert augmente pour des températures supérieures à T_{opt} . Cela correspond à un rétrécissement de l'épaisseur de la zone de charge d'espace $X_{co}(T)$, donc une réduction de la zone de charge d'espace.

La conception d'un modèle théorique de la capacité de la photopile à travers la progression de la courbe est donner par :

$$C(T) = \chi T^\gamma \tag{58}$$

Avec,

χ est déterminé à partir de l'ordonnée à l'origine, il est homogène à une capacité,

γ est la pente avec T^γ homogène à une capacité.

Tableau 22: Valeurs de χ et de γ en fonction de la température de la photopile en circuit ouvert.

Zone	χ (F.cm⁻²)	γ
$T < T_{opt}$	$2,66.10^{-3}$	-0,41
$T > T_{opt}$	$7,20.10^{-41}$	13,67

La température optimale $T_{opt} = 458$ K et le rendement correspondant est $\eta = 0,980$

Après avoir vu le logarithme de la capacité de la photopile en circuit ouvert, nous allons étudier le logarithme de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction du logarithme de la température.

La figure 115 donne le profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la température

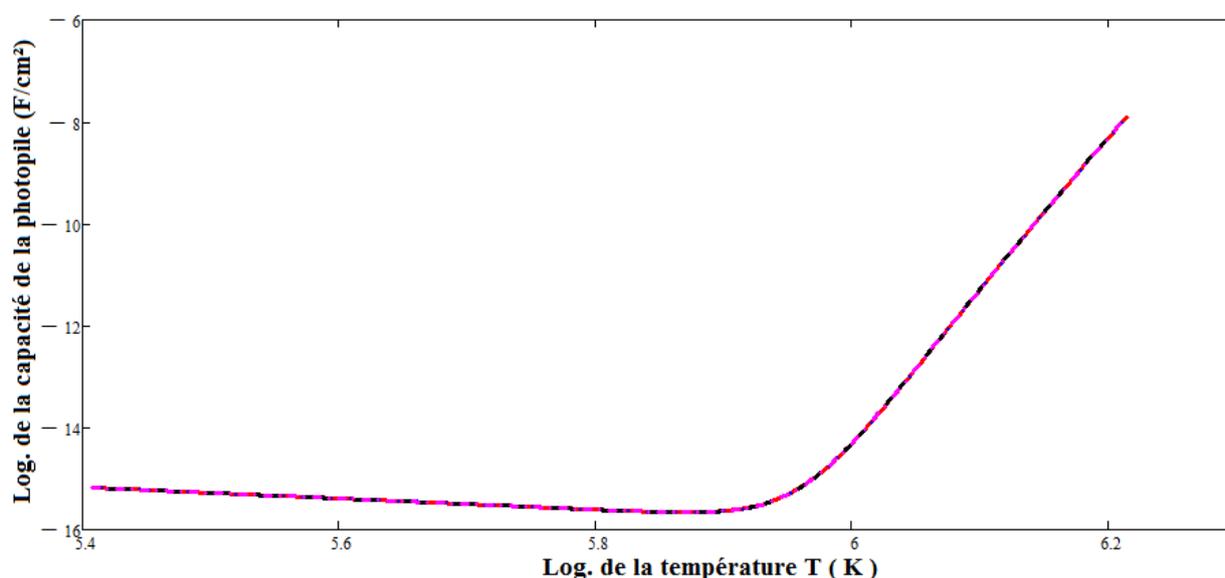


Figure 115: Capacité de la photopile en court-circuit ($S_f = 6.10^6$ cm/s) en fonction de la température.

A la limite d'une valeur minimale $X_{cc}(T)$ d'abscisse T_{opt} , la capacité de la photopile admet une diminution linéaire avec la température. Cette diminution a lieu à des températures inférieures

à T_{opt} . L'extension de la zone de charges d'espace est identique à la diminution de la capacité de la photopile.

Une grande pente liée à l'augmentation linéaire de la capacité. Cette augmentation a lieu à des températures supérieures à T_{opt} . Cette augmentation correspond au rétrécissement de l'épaisseur $X_{cc}(T)$.

La température optimale offre un grand rendement de la capacité.

La projection du point de rencontre des deux tangentes à la courbe sur l'axe des températures permet d'obtenir T_{opt} .

A partir de la figure 115, nous obtenons l'équation 58

Le tableau 23, donne les valeurs de χ et γ obtenus à partir des courbes de la figure 115.

Tableau 23: Valeurs de χ et de γ en fonction de la température de la photopile en court-circuit.

Zone	χ (F.cm ⁻²)	γ
$T < T_{opt}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	-1,12
$T > T_{opt}$	$3,12 \cdot 10^{-81}$	28,52

La température optimale $T_{opt} = 362$ K et le rendement correspondant est $\eta = 0,999$

III.7. Conclusion

Le travail effectué dans ce chapitre nous a permis de tirer les résultats :

Le taux de génération des porteurs diminue lorsque la profondeur dans la base augmente.

Lorsque la température augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base augmente pour les faibles valeurs de la profondeur dans la base. Pour les grandes valeurs de la profondeur l'augmentation de la température provoque une diminution de la densité des porteurs minoritaires dans la base (photopile en situation de circuit ouvert). Toujours en circuit ouvert, la densité de photocourant augmente lorsque la température augmente

Quand la température augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge augmente et la densité de photocourant diminue (photopile en situation de court-circuit).

La phototension et la vitesse de recombinaison à la face arrière diminuent lorsque la température augmente.

L'étude de ce chapitre a montré que :

- i) le rendement de la capacité de la photopile dépend $X_{cc}(T)$ ou $X_{co}(T)$;
- ii) Le rendement de la capacité de la photopile augmente lorsque la température diminue.
- iii) La capacité de la photopile est constitué des expressions $C_0(T)$ et $C_d(T,S_f)$.
- iv) Une température optimale T_{opt} est définie grâce à la fluctuation de la capacité de la photopile en fonction de la température. La température optimale offre un grand rendement de la capacité. A une valeur $X_{cc}(T)$ ou $X_{co}(T)$ d'abscisse $T \leq T_{opt}$, la capacité de la photopile admet une diminution linéaire avec la température. La capacité de la photopile diminue linéairement avec la température lorsque que nous avons une valeur de $X_{cc}(T)$ ou $X_{co}(T)$ d'abscisse $T \geq T_{opt}$.

III.8. Références

[1] B.R. Chawla, H.K. Gummel, "Transition Region. Capacitance of Diffusion p-n Junction", IEEE Transactions on. Electron Devices, ED-18,3,pp: 178-195, 1971.

[2] G. Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot, P. Mialhe, "Constant illumination-induced open circuit voltage decay (CIOCV) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk

and back surface characterization”, 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, poster 1B, pp.352-54 Montreux, Switzerland 12-16 October, 1992.

[3] H.L. Diallo, A. S. Maïga, A. Wereme, and G. Sissoko, “New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell” Eur. Phys. J. Appl. Phys. 42, pp: 203–211, 2008.

[4] G. Sissoko, B. Dieng, A. Corrêa, M.Adj, D. Azilinson, “ Silicon Solar cell space charge region width determination by a study in modeling”. Renewable Energy, vol-3, pp.1852-1855-Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/# (2004).

[5] G. Sissoko, E. Nanéma, A. L. Ndiaye, Y. L. B. Bocand  and M. Adj. Minority carrier diffusion length measurement in silicon solar cell under constant white bias light, Renewable Energy, 3, pp: 1594-1597, 1996. Pergamon, 0960-1481/94\$ 700 +0.00.

[6] G. Sissoko, E. Nanéma, A. Corrêa, P. M. Bit ye, M.Adj, A. L. Ndiaye. « Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic”, Renewable Energy, vol-3, pp.1848-1851, 1998. Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#.

[7] C. D. Thurmond, « The standard thermodynamic functions for the formation of electron and hole in Ge, Si, GaAs and GaP », J. Electrochem. Soc, vol. 122, pp 133-41, Aug 1975.

[8]- A. Corrêa, I. Gaye, B. Ba, A. L. Ndiaye, and G. Sissoko “Solar cells parameters determination by constant illumination induced transient voltage decay method”, Renewable Energy, Vol 5, part I, pp.166-168, 1994.-Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.

[9]- A. Diao, N. Thiam, M. Zoungrana, M. Ndiaye, G. Sahin and G. Sissoko, “Diffusion coefficient in silicon solar cell with applied magnetic field and under frequency: Electric equivalent circuits”, World Journal of Condensed Matter Physics, 4, pp 1-9, 2014. Published Online **** 2014 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/wjcmp>
http://dx.doi.org/10.4236/wjcmp.2014.*****

[10]- E. H. Ndiaye, G. Sahin, M. Dieng, A. Thiam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, G. Sissoko “Study of the intrinsic recombination velocity at the junction of silicon solar cell under frequency modulation and radiation”, Journal of Applied Mathematics and Physics, 3, pp: 1522-1535, 2015.
Published Online November 2015 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/jamp>

<http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>.

[11] A. Jakubowski, « Graphic method of substrate doping determination from C-V characteristics of MIS capacitors », *Solid-State Electronics*, Vol. 24, No. 10, pp 985-987, 1981.

[12] G. Yaron and D. F.-Bentchkowsky, « capacitance voltage characterization of poly Si-SiO₂-Si structures », *Solid-State Electronics*, Vol. 23, pp 433-439, 1980.

[13] S. Mbodji, B. Mbow, F. I. Barro and G. Sissoko, A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition, *Turkish Journal of Physics*, 35, 2011, pp.281 –291.

[14] J.J. Liou, F.A. Lindholm, and D.C. Malocha, “Forward-voltage capacitance of heterojunction space charge regions”, *J.Appl.Phys.*63 (10) Sept1988.

[15] C. H. Wang and A. Neugroschel, “Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence”, *IEEE. Transaction on electron devices* Vol.38, N° 9(Sept)1987

[16] H. L. Diallo, B. Dieng, I. Ly, M.M. Dione, M. Ndiaye, O.H. Lemrabott, Z.N. Bako, A. Wereme and G. Sissoko, “Determinations of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(16); 2626-2631, 2012.

[17] H. L. Diallo, M. Wade, I. Ly, M. NDiaye, B. Dieng, O.H. Lemrabott, A.S. Maïga and G. Sissoko, “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* (4)1672-1676, 2012.

[18] H. Bayhan, A. S. Kavasglu, « admittance and impedance spectroscopy on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells », *Turk. J. Phys.*, 27, pp: 529-535, 2003.

[19] G. Sahin, M. Dieng, M. A. O. E. Moujtaba, Moussa Ibra Ngom, Amary Thiam, Grégoire Sissoko, “Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination” *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3, 1536-1543, 2015.

Published Online November 2015 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/jamp>

<http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2015.311178>

[20] J. H. Scofield, « effets of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37 (2) 217-233 (May 1995)

[21] R. A. Kumar, M. S. Suresh, and J. Nagaraju, « measurement of AC parameters of Gallium Arsenide (GaAs /Ge) solar cell by impedance spectroscopy », *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. 48, No. 9, pp: 2177-2179, September 2001.

[22] A Dieng, I. Zerbo, M. Wade, A. S. Maiga and G. Sissoko, “Three-dimensional study of a polycrystalline silicon solar cell: the influence of the applied magnetic field on the electrical parameters”, *Semicond. Sci. Technol.* 26, 095023 (9pp), 2011.

[23] B. Zetterlund and A. J. SeclLow - Temperature operation of silicon surface channel charge coupled devices *IEEE. Transaction on electron devices* Vol.ED34, N° 1(Sept) 1991.

[24] J. Furlan, and S. Amon, « Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon. *Solid State Electron* », 28, pp. 1241–43, 1985,

[25] S. N. Mohammad, « An alternative method for the performance analysis of silicon solar cells. » *J. Appl. Phys.* 61(2), pp. 767-777, 1987

[26] M. Kunst and A. Sanders,. Transport of excess carriers in silicon wafers, *Semicond. Sci.Technol* », 7, pp : 51-59, 1992 in the UK.

Chapitre IV : Influence de la température sur les résistances parasites shunt et série d'une photopile monofaciale au silicium sous éclairage monochromatique

IV.1 Introduction

La résistance série est provoquée par le mouvement des électrons à travers l'émetteur et la base de la cellule solaire, la résistance de contact entre le contact métallique et le silicium et la résistance des grilles métalliques à l'avant et l'arrière de la cellule solaire [1, 2, 3].

La résistance de shunt est due à des défauts de fabrication et aussi à la légère conception de cellules solaires. Elle correspond à un chemin de courant alternatif pour le photocourant [1, 2,3].

Ces résistance shunt et série peuvent être étudié : en régime statique [4], en régime dynamique fréquentiel [5, 6, 7].

Dans ce chapitre, notre étude portera sur l'influence de la température et éventuellement de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série d'une photopile au silicium en régime statique sous éclairage monochromatique. Ces résistances seront déterminées à partir de la caractéristique courant- tension (I-V). Les expressions respectives des vitesses de recombinaison limitant le circuit ouvert S_{fco} et initiant le court-circuit S_{fcc} seront déterminées. Les valeurs des résistances shunt et série expérimentales seront aussi déterminées à partir des courbes de résistances shunt et série en fonction de la vitesse de recombinaison à la fonction S_f .

ETUDE THEORIQUE

La photopile considérée est de type $n^+ - p - p^+$ et sa structure est présentée à la figure 116.

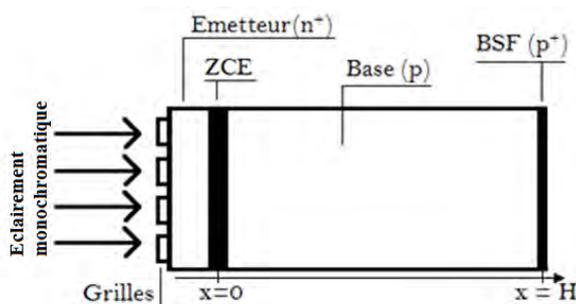


Figure 116: Structure d'une photopile de type $n^+ - p - p^+$

Lorsque la photopile est éclairée, il y a production de paires électron-trou dans la base. La densité de porteurs minoritaires en excès dans la base est modélisée par l'équation de continuité suivante:

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{g(x)}{D} \quad (1)$$

Avec

$\delta(x)$ est la densité des électrons générés dans la base à la position x ,

$$g(x) = \phi(\lambda) \alpha(\lambda) (1 - R(\lambda)) e^{(-\alpha(\lambda)x)} \quad (2)$$

est le taux de génération des porteurs,

$\phi(\lambda)$ est le flux incident monochromatique de la lumière,

$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ ,

$R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ ,

$$(L(T))^2 = \tau D(T) \quad (3)$$

L est la longueur de diffusion des électrons dans la base, elle dépend de la température,

τ est la durée de vie des électrons dans la base. $D(T)$ est le coefficient de diffusion des électrons dans la base donnée par la relation d'Einstein comme suit

$$D(T) = \mu(T) \frac{k_b T}{q} \quad (4)$$

$$\mu(T) = 1,43.10^9 T^{-2,42} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

$\mu(T)$ est le coefficient de mobilité des électrons [8],

k_b est la constante de Boltzmann,

q est la charge élémentaire de l'électron

L'équation (1) a pour solution générale

$$\delta(x, \lambda, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) - \frac{\phi(\lambda) \alpha(\lambda) (L(T))^2 (1 - R(\lambda)) e^{(-\alpha(\lambda)x)}}{D(T) [(L(T))^2 (\alpha(\lambda))^2 - 1]} \quad (6)$$

Les expressions de A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes:

i) A la jonction ($x = 0$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, T)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(T)} \delta(x, \lambda, T) \Big|_{x=0} \quad (7)$$

ii) A la face arrière ($x = H$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, T)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(T)} \delta(x, \lambda, T) \Big|_{x=H} \quad (8)$$

S_f est la vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires en excès, et aussi détermine le point de fonctionnement de la photopile [9,10].

S_b est la vitesse de recombinaison à la face arrière des porteurs minoritaires en excès [10].

Densité de photocourant

Le photocourant résulte de la diffusion des porteurs minoritaires à la jonction et son expression est donnée par [11,12] :

$$J_{ph}(S_f, \lambda, T) = qD(T) \left. \frac{\partial \delta(S_f, \lambda, T)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (9)$$

Phototension

La phototension de la photopile est donnée par la relation de Boltzmann.

$$V_{ph}(S_f, \lambda, T) = V_T \ln \left[\frac{N_b}{(n_i(T))^2} \delta(0, S_f, \lambda, T) + 1 \right] \quad (18)$$

Où V_T est la tension thermique, elle est définie comme suit :

$$V_T = \frac{k_b T}{q} \quad (19)$$

N_b est le taux de dopage and n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires [13] exprimée comme suit:

$$n_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (20)$$

E_g est l'énergie de gap, et correspond à la différence entre l'énergie de la bande de conduction E_c et celle de la bande de valence E_v . $E_g = 1,12.1,6.10^{-19}$ J

A est une constante. $A = 3,87.10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$

Etudions la caractéristique I-V qui nous permettra de déterminer les résistances shunt et série.

IV.2 Caractéristique I-V

IV.2.1 Effet de la température sur la caractéristique I-V

La figure 117 représente la densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température.

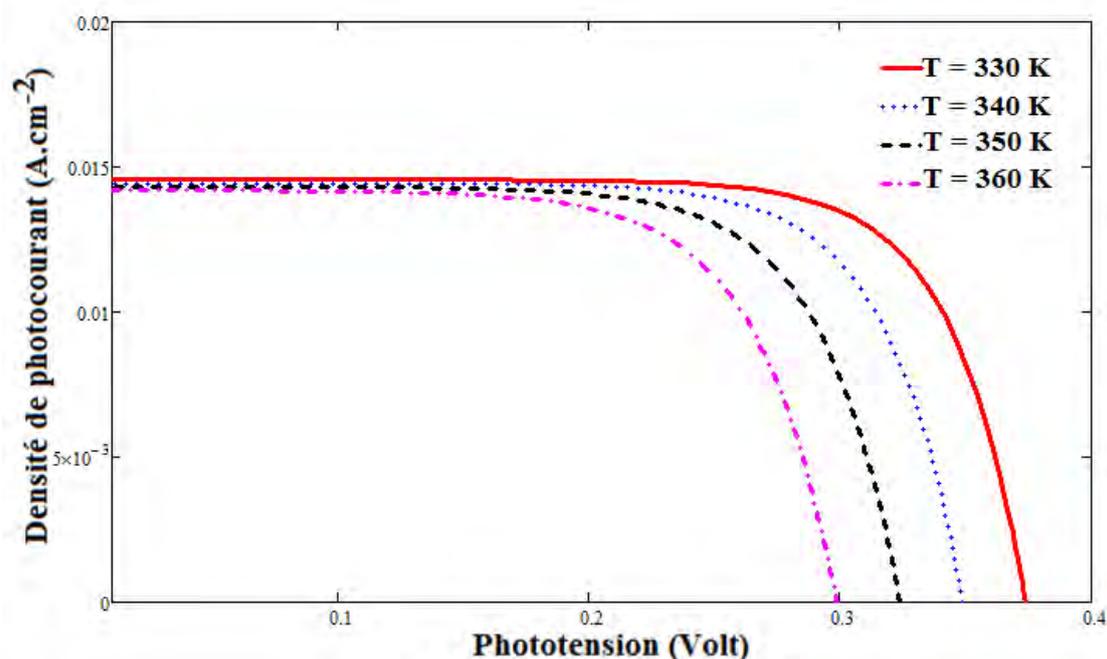


Figure 117: Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,94 \mu\text{m}$).

Nous constatons que lorsque la température augmente, la densité de photocourant et la phototension augmentent. Cependant l'augmentation de la phototension est plus visible (résultats vérifiés par les figures 52 et 58 chapitre II). De même une constance de la densité de photocourant est observée jusqu'au voisinage de 0,2 Volt quel que soit la valeur de la phototension. Cette constance correspond au photocourant de court-circuit noté J_{cc} . À partir de 0,2, une diminution rapide de la densité de photocourant est remarquée. Cette diminution rapide tend vers une valeur maximale de la phototension appelée phototension de circuit ouvert et notée V_{co} .

IV.2.2 Effet de la longueur d'onde sur la caractéristique I-V

Les profils de la caractéristique densité de photocourant-phototension pour différentes longueurs d'onde sont présentés par les figures 118 et 119

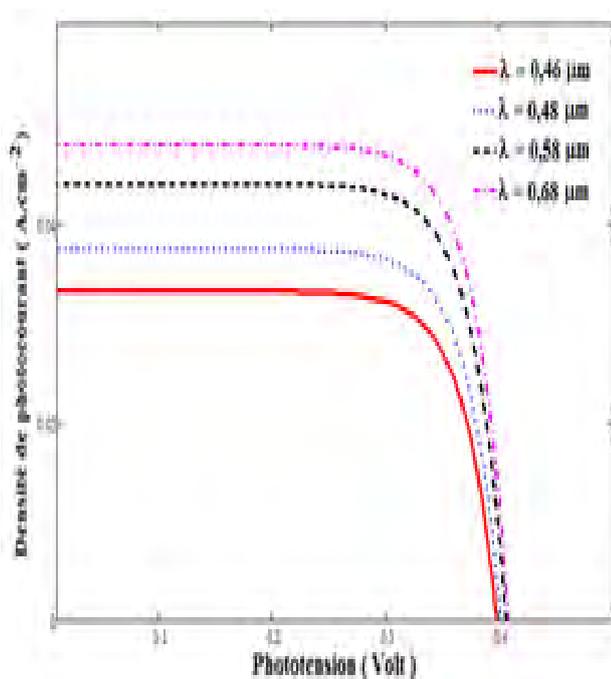


Figure 118: Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes et faibles valeurs de la longueur d'onde (T=330K).

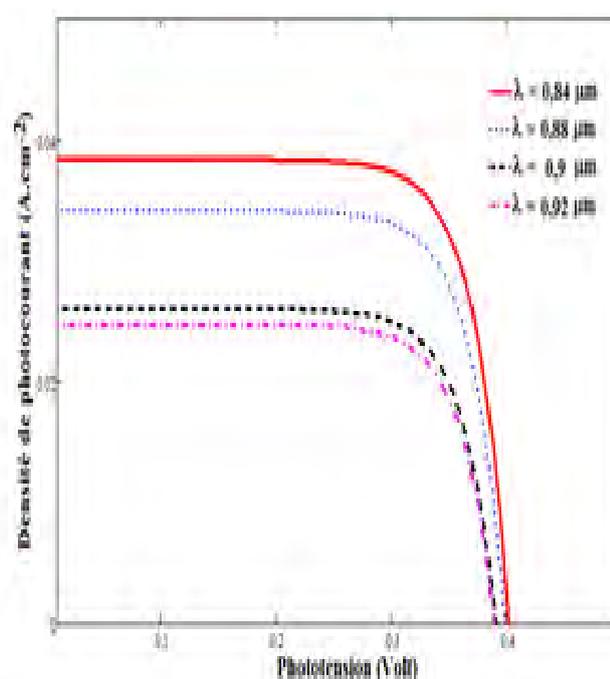


Figure 119: Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes et grandes valeurs de la longueur d'onde (T=330K).

Nous remarquons qu'au niveau de la figure 118 que pour les faibles longueurs, lorsque la longueur d'onde augmente, la densité de photocourant ainsi que la phototension augmentent. Cette augmentation est plus remarquée au niveau de la densité de photocourant (résultats vérifiés aux figures 53 et 56). L'observation de la figure 119 (grandes longueurs d'onde) montre : lorsque la longueur d'onde augmente, la densité de photocourant et la phototension diminuent. Cette diminution est plus visible au niveau de la densité de photocourant (résultats vérifiés aux figures 54 et 57).

Les figures 117, 118 et 119 vont nous permettre d'avoir les résistances shunt et série.

Passons à présent à l'étude de la résistance shunt.

IV.3 Résistance shunt

À partir de la partie horizontale de la caractéristique I-V de la photopile nous pouvons constater qu'au voisinage du court-circuit la photopile se comporte comme un générateur de courant. Le courant produit est concrètement autonome de la tension à ses bornes.

La figure 120 présente le circuit équivalent de la photopile lorsque celle-ci fonctionne effectivement en court-circuit.

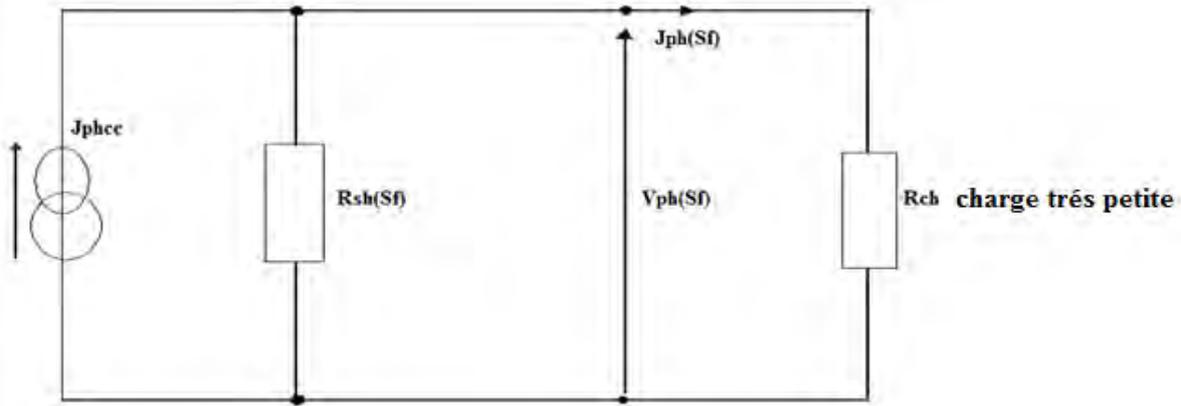


Figure 120: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en court-circuit.

En réalité, pour une photopile non idéal, il existe un courant de fuite généralement faible qui engendre une très petite fluctuation du courant fournit par la photopile quand sa tension aux bornes change, ce qui traduit la présence d'une charge interne à la photopile appelée résistance de fuite ou résistance shunt [14-15]. Ce courant de fuite généralement faible pour les photopiles de bonne qualité se caractérise par la présence d'une charge interne dans la photopile désignée par la résistance de fuite ou résistance shunt [16].

A partir de la figure 120, nous obtenons l'expression de la résistance shunt suivante

$$R_{sh}(S_f, \lambda, T) = \frac{V_{ph}(S_f, \lambda, T)}{J_{phcc}(\lambda, T) - J_{ph}(S_f, \lambda, T)} \quad (59)$$

J_{phcc} : densité de photocourant de court-circuit.

$J_{ph}(S_f)$ et $V_{ph}(S_f)$: densités de photocourant et phototension en un point de fonctionnement dépendant de S_f .

R_{ch} : résistance de charge faible produisant de grandes valeurs de S_f

R_{sh} : résistance shunt par unité de surface

IV.3.1 Effet de la température sur la résistance shunt

A partir de l'équation 59, nous obtenons la figure 121 de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

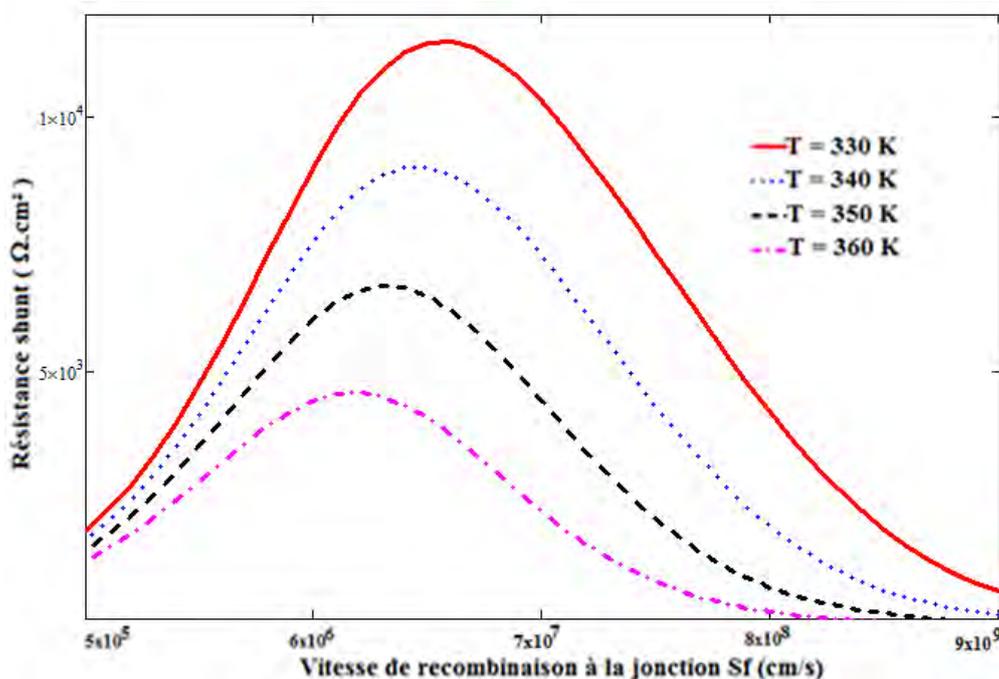


Figure 121: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,94 \mu\text{m}$).

Nous constatons que la résistance shunt R_{sh} augmente lorsque la vitesse de recombinaison à la fonction Sf augmente (cas des valeurs de $Sf \leq 6.10^6$ cm/s). Et cette résistance diminue lorsque la vitesse de recombinaison Sf augmente (cas des valeurs de $Sf > 6.10^6$ cm/s). Par contre elle diminue à l'instant où la température augmente.

En effet, l'augmentation de la température provoque une diminution du coefficient de mobilité des porteurs. Cependant le coefficient de diffusion $D(T)$ est proportionnel au coefficient de mobilité des porteur $\mu(T)$. Donc la diminution de $\mu(T)$ entraîne celle de $D(T)$. Alors les porteurs minoritaires vont demeurer dans la base où ils subiront des recombinaisons au niveau de la jonction. Par conséquent nous aurons une diminution de la résistance shunt.

La figure 121 présente pour chaque courbe un maximum de la résistance shunt. Le maximum de chaque courbe nous permet d'avoir la résistance shunt relative en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

La figure 122 présente le profil de la résistance shunt relative en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

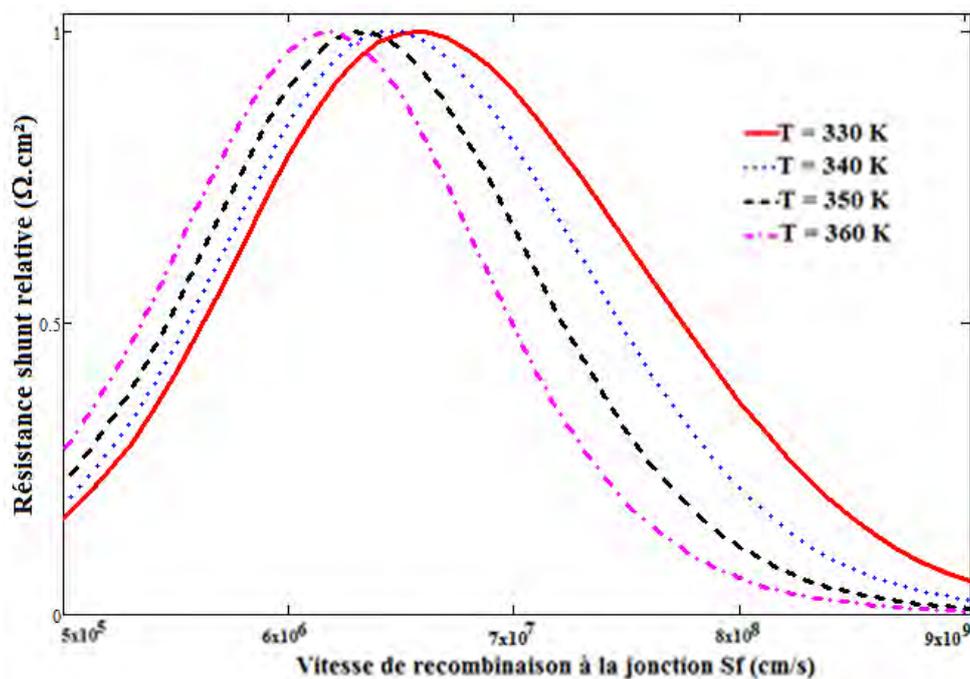


Figure 122: Résistance shunt relative en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,94 \mu\text{m}$).

Nous constatons que le maximum de la résistance shunt se déplace lorsque la température. Nous allons tracer la courbe du maximum de la résistance shunt en fonction de la température à partir du tableau 24 obtenu à partir de la figure 121.

Tableau 24: Valeurs du maximum de la résistance shunt avec leurs températures respectives

T(K)	$R_{shmax} (\Omega.cm^2)$	$\lambda(\mu\text{m})$
330	11475	0,94
340	9014,4	0,94
350	6680	0,94
360	4595,1	0,94

Le tableau 24 permet d'obtenir la figure 123.

La figure 123 est le profil du maximum de la résistance shunt en fonction de la température

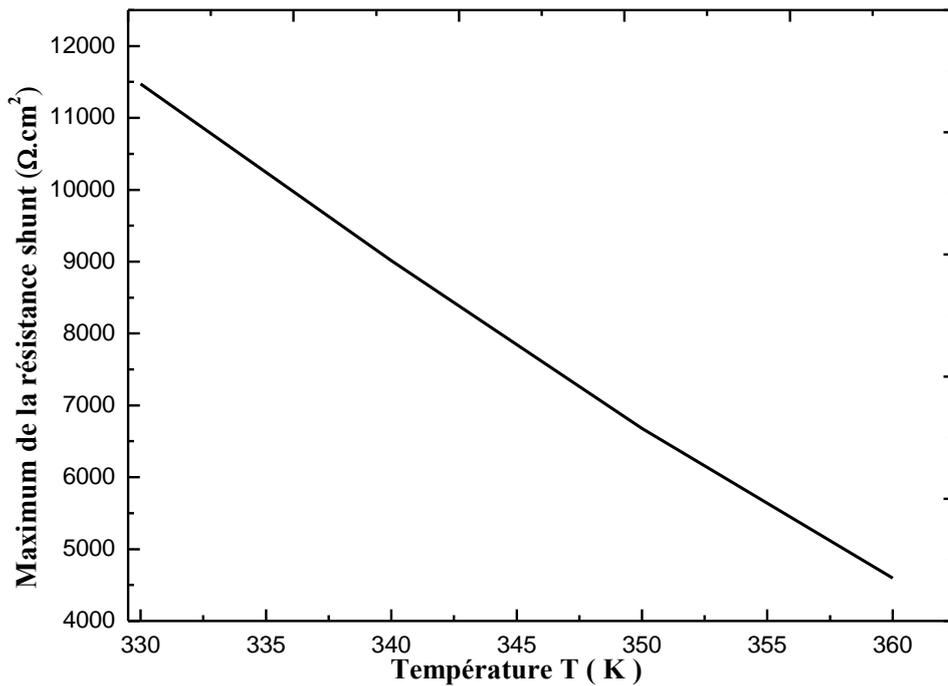


Figure 123: Maximum de la résistance shunt en fonction de la température

Nous observons que le maximum de la résistance shunt augmente quand la température diminue.

Après avoir étudié l'influence de la température sur la résistance shunt, étudions le comportement de cette résistance par rapport à la longueur.

IV.3.2. Effet de la longueur d'onde sur la résistance shunt

Les profils de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour de faibles valeurs et pour de grandes valeurs de la longueur d'onde sont donnés respectivement par les figures 124 et 125.

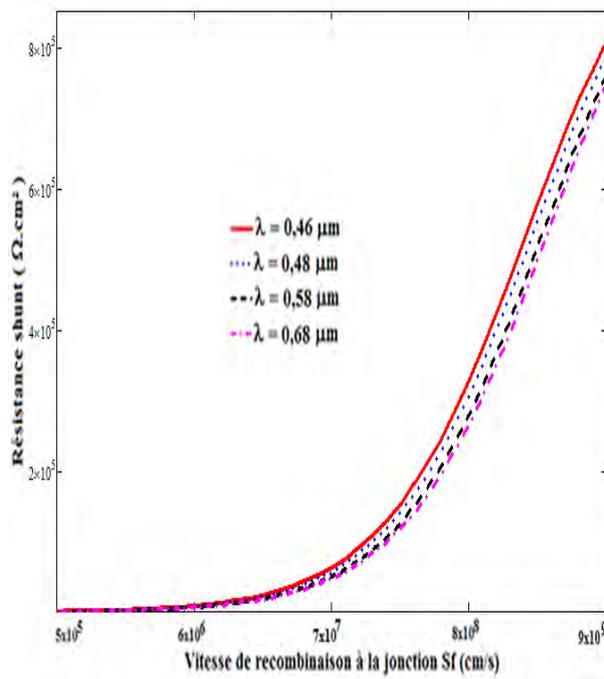


Figure 124: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

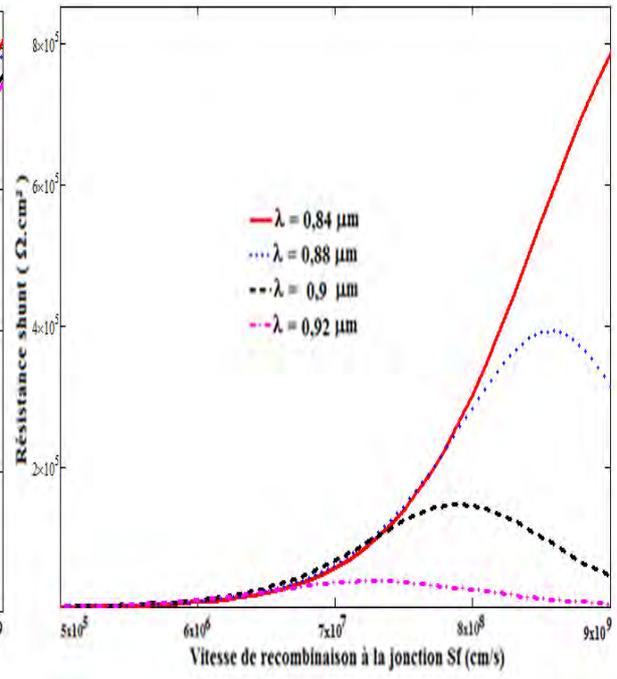


Figure 125: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde (T = 330 K).

Nous constatons au niveau des figures 124 et 125 que lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente, la résistance shunt augmente. Lorsque la longueur d'onde augmente, la résistance shunt diminue. Parce ce pour les faibles longueurs d'onde l'absorption se passe à la surface et le coefficient d'absorption est élevé, la génération des porteurs se fait proche de la jonction. Ces porteurs près de la jonction vont induire des courants de fuites importantes par l'intermédiaire des défauts existant en ce lieu. Alors la résistance shunt induit pour s'opposer aux courants de fuite s'affaibli (figure 124).

Pour les grandes longueurs d'onde (figure 125) : quand la longueur d'onde augmente, la résistance shunt augmente (pour $S_f \leq 7.10^7$ cm/s) et cette résistance diminue lorsque la longueur d'onde augmente (pour $S_f \geq 8.10^8$ cm/s).

Après l'étude de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur, nous allons voir cette résistance en fonction de la température pour différentes valeurs de la longueur aussi.

Les figures 126 et 127 sont respectivement la résistance shunt en fonction de la température pour de faibles valeurs de la longueur d'onde et la résistance shunt en fonction de la température pour de grandes valeurs de la longueur d'onde.

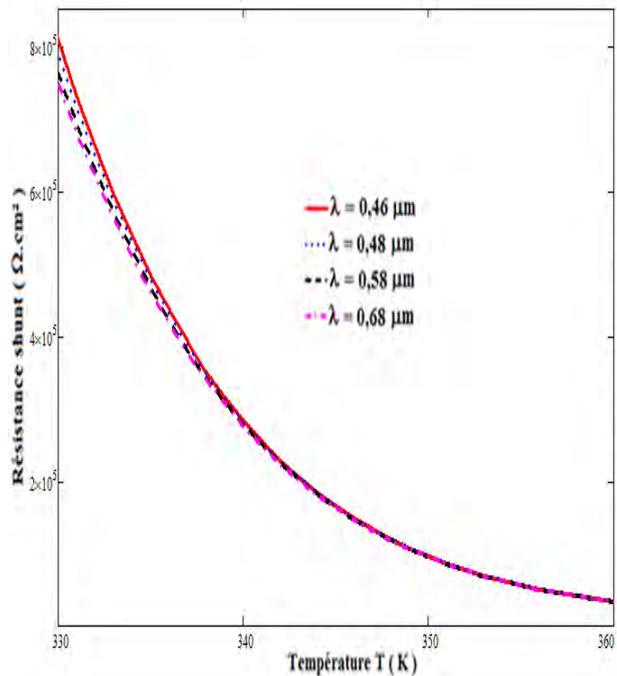


Figure 126: Résistance shunt en fonction de la température pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde (Sf=9.10⁹cm/s).

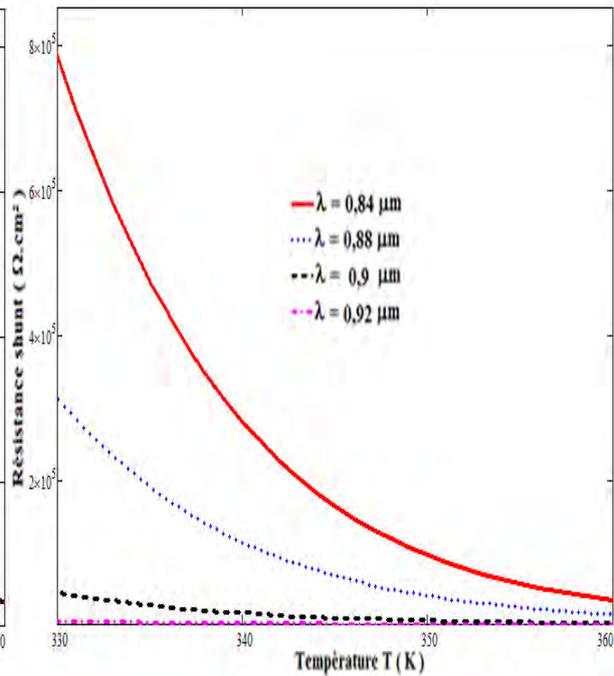


Figure 127: Résistance shunt en fonction de la température pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde (Sf= 9.10⁹ cm/s).

Nous observons que la résistance shunt diminue lorsque la température augmente. C'est le résultat obtenu par plusieurs auteurs [17,18]. Cette résistance diminue lorsque la longueur d'onde augmente (figures 126 et 127). Cette diminution est plus visible au niveau des grandes longueurs d'onde.

En effet comme les grandes longueurs d'onde photocrées des porteurs à l'intérieur de la base. Cependant dans la base il ya les recombinaisons en volume qui dominant. Donc ces porteurs photogénérés peuvent subir des recombinaisons favorisant la resistance série. Alors l'augmentation de la résistance série provoque une diminution de la résistance shunt.

Etudions la résistance série.

IV.4. Résistance série

À partir de la partie verticale de la caractéristique I-V de la photopile, nous remarquons qu'au voisinage du circuit ouvert la tension aux bornes de la photopile est en réalité indépendante du courant débité. La photopile se comporte alors comme un générateur de tension réelle puisque sa caractéristique courant - tension n'est pas identique à une droite verticale. Ce qui explique la présence d'une résistance interne due à la résistivité du matériau polycristallin utilisé et des contacts électriques (grille avant + contact arrière) [19, 20] qui n'est rien d'autre que la résistance série de la photopile. Nous proposons alors la figure 128 comme circuit électrique équivalent de la photopile lorsque celle-ci fonctionne pratiquement en circuit ouvert.

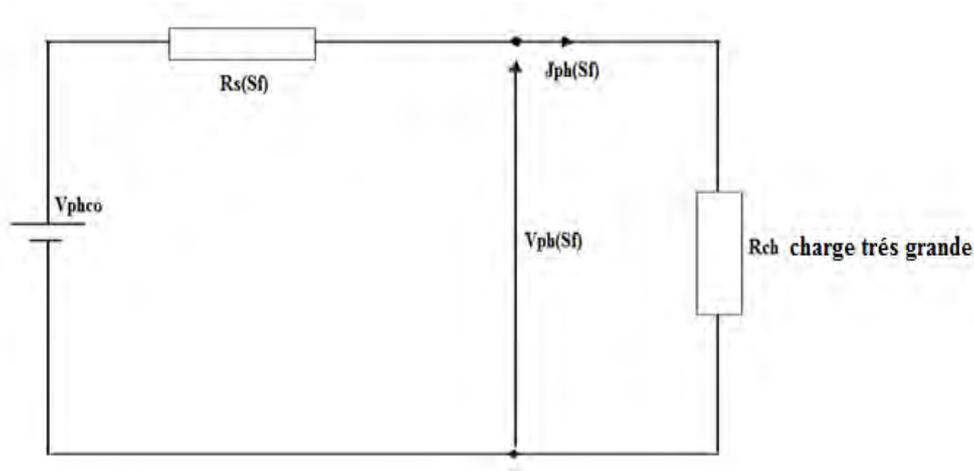


Figure 128: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en circuit ouvert.

A partir de la figure 128, nous obtenons l'expression de la résistance série suivante

$$R_s(S_f, \lambda, T) = \frac{V_{phco}(\lambda, T) - V_{ph}(S_f, \lambda, T)}{J_{ph}(S_f, \lambda, T)} \quad (60)$$

V_{phco} : phototension de circuit ouvert

$R_s(S_f)$: Résistance série par unité de surface

$J_{ph}(S_f)$ et $V_{ph}(S_f)$: Densité de photocourant et Phototension en un point de fonctionnement dépendant de S_f .

R_{ch} : Résistance de charge grande produisant de faibles valeurs de S_f .

IV.4.1. Effet de la température sur la résistance série

A partir de l'équation (60), nous avons la figure 129 la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

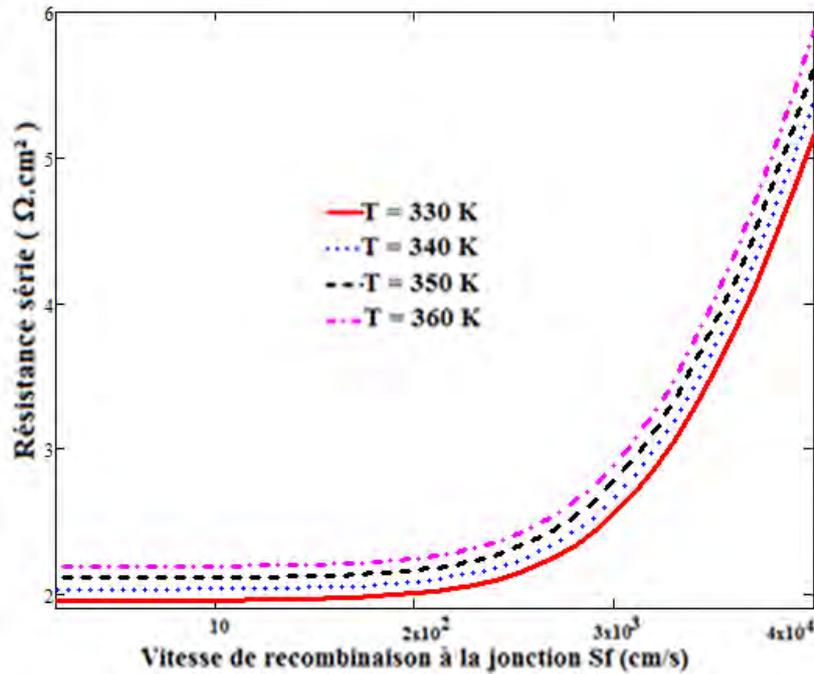


Figure 129: Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température ($\lambda = 0,94 \mu\text{m}$).

La résistance série est constante pour des valeurs de la vitesse de recombinaison S_f inférieur à 10 cm/s. À partir 10 cm/s, cette résistance commence à augmenter avec l'augmentation de S_f .

En d'autres termes, nous observons un palier de la résistance série pour les très faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction. La résistance série augmente exponentiellement lorsque la vitesse de recombinaison augmente. Cependant cette augmentation exponentielle permet de voir que nous sortons de notre d'étude modèle.

Lorsque la température augmente, la résistance série augmente.

En effet l'augmentation entraine une diminution de la mobilité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base. La diminution de la mobilité entraine une diminution de la diffusion des porteurs minoritaires à travers la jonction émetteur-base. Donc les porteurs qui n'ont pas traversé la jonction vont subir des recombinaisons en volume. Les recombinaisons en volume caractérisent la résistance série.

Nous allons étudier maintenant l'influence de la température et de la longueur d'onde sur la résistance série, après l'avoir fait avec la résistance shunt pour les mêmes paramètres.

IV.4.2 Effet de la longueur sur la résistance série

Les figures 130 et 131 représentent la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour de faibles et grandes valeurs de la longueur d'onde.

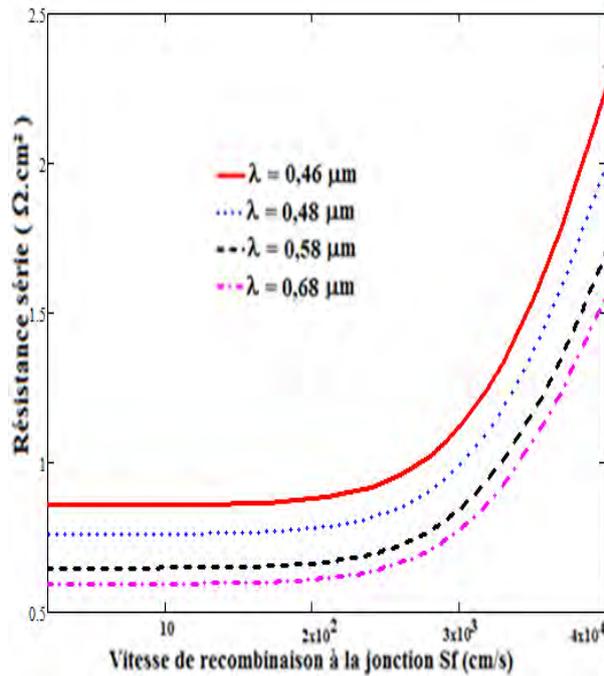


Figure 130: Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et faibles valeurs de la Longueurs d’onde (T= 330 K).

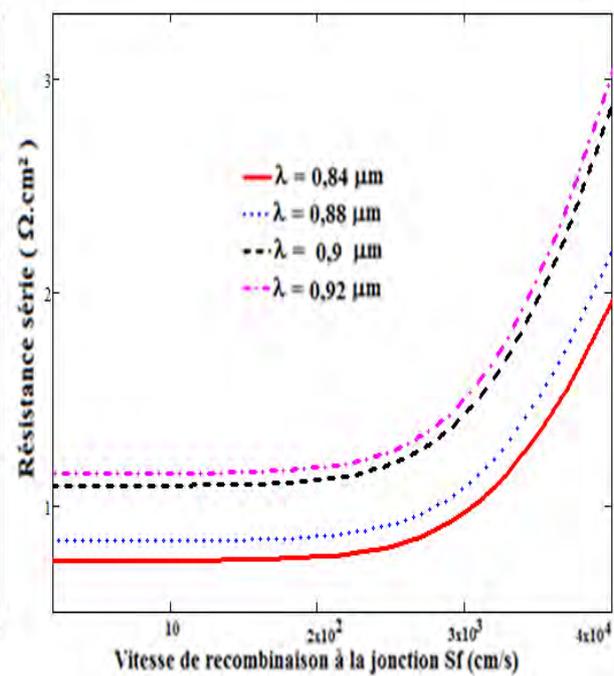


Figure 131: Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes et grandes valeurs de la Longueurs d’onde (T= 330 K).

Les analyses des figures 130 et 131 de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction sont identiques à celle de la figure 129 de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

Nous constatons pour les courbes de la figure 130 (faibles longueurs d’onde) que lorsque la longueur d’onde augmente, la résistance série diminue. Comme la résistance série est provoquée par le mouvement des électrons entre l’émetteur et la base, entre la résistance de contact et le contact du métal, entre le silicium et la résistance des grilles métalliques à l’avant et à l’arrière de la photopile. Et les courtes longueurs d’onde génèrent les porteurs près de la jonction. Donc ces porteurs ne peuvent pas atteindre l’arrière de la photopile. Alors il n’y aura pas de résistance entre le silicium et les grilles métallique à l’arrière [1, 2]. C’est l’explication de la diminution de la résistance série pour les faibles longueurs d’onde.

Nous observons pour les courbes de la figure 131 (grandes longueurs d’onde) que quand la longueur d’onde augmente, la résistance série augmente. Avec les grandes longueurs, les porteurs seront générés à l’intérieur de la base et pourront atteindre la face arrière. Alors la résistance entre le silicium et les grilles métallique à l’arrière subsisteront. C’est l’explication de l’augmentation de la résistance série pour les grandes longueurs d’onde.

Etudions la résistance shunt en fonction de la température pour différents longueurs d’onde, après l’avoir étudié en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes longueurs d’onde.

Les figures 132 et 133 représentent la résistance shunt en fonction de la température respectivement pour de faibles longueurs d'onde et de grandes longueurs d'onde.

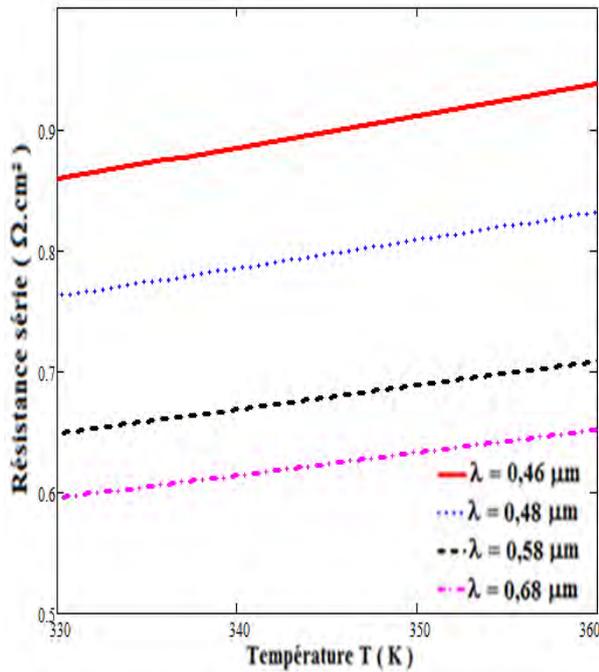


Figure 132: Résistance série en fonction de la température pour de petites et différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f = 10 \text{ cm/s}$).

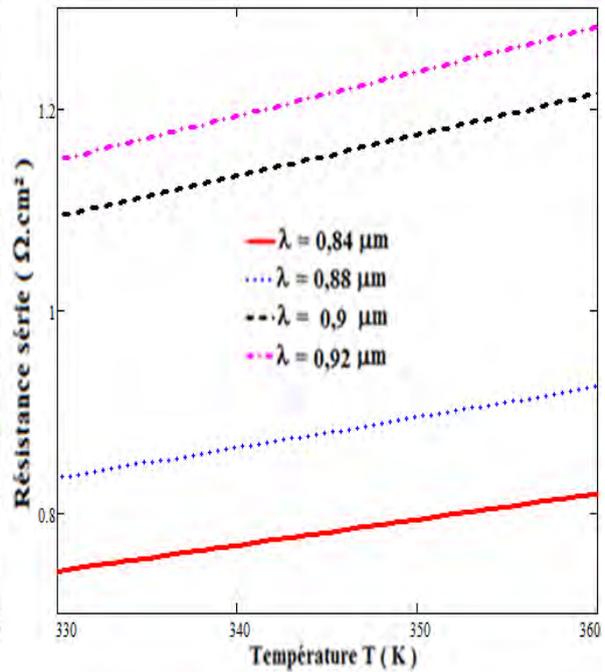


Figure 133: Résistance série en fonction de la température pour de grandes et différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f = 10 \text{ cm/s}$).

A ce niveau nous observons qu'au moment où la température augmente, la résistance série augmente également. C'est le résultat obtenu par plusieurs auteurs [17, 18, 21]. Lorsque la longueur d'onde augmente (petites valeurs de la longueur d'onde), la résistance série diminue. Quand la longueur d'onde augmente (grandes longueurs d'onde), la résistance série augmente.

Les figures 132 et 133 nous permettent d'obtenir l'équation 61

$$R_{s\lambda}(T) = \beta T + \xi \quad (61)$$

Avec,

β la pente et ξ considéré comme une résistance série.

Les valeurs de β et de ξ sont données par les tableaux 25 et 26

Le tableau 25 est celui des valeurs de β et de ξ pour les faibles longueurs d'onde

Tableau 25: Valeurs de β et de ξ pour les faibles longueurs d'onde

$\lambda(\mu\text{m})$	$\beta(\Omega.\text{cm}^2)$	ξ
0,46	$2,61.10^{-3}$	$-2,61.10^{-3}$
0,48	$2,32.10^{-3}$	$-3,55.10^{-3}$
0,58	$2,01.10^{-3}$	-0,055
0,58	$1,37.10^{-3}$	0,158

Le tableau 26 est le tableau des valeurs de β et de ξ pour les grandes longueurs d'onde

Tableau 26: Valeurs de β et de ξ pour les grandes longueurs d'onde

$\lambda(\mu\text{m})$	$\beta(\Omega.\text{cm}^2)$	ξ
0,84	$2,55.10^{-3}$	-0,10
0,88	$3,01.10^{-3}$	-0,160
0,9	$4,06.10^{-3}$	-0,247
0,92	$4,22.10^{-3}$	-0,238

Nous allons maintenant étudier la méthode de détermination expérimentale des résistances shunt et série.

IV.5. Détermination expérimentale des résistances shunt et série

Les expressions de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit S_{fcc} [22] et la vitesse de recombinaison limitant le circuit ouvert S_{fco} [22] sont déterminées respectivement à partir des expressions 62 et 63

$$J_{ph}(S_f, \lambda, T) - J_{phcc}(\lambda, T) = 0 \quad (62)$$

Et

$$V_{ph}(S_f, \lambda, T) - V_{phcc}(\lambda, T) = 0 \quad (63)$$

La résolution des équations 62 et 63, nous obtenons les expressions de S_{fcc} et S_{fco} suivantes

$$S_{fcc}(\lambda, T) = \frac{L(T)K(\lambda, T)[L(T)E(\lambda, T) - M(T)\alpha(\lambda)D(T)] - \gamma_a(\lambda, T)D(T)M(T)}{L(T)[\gamma_a(\lambda, T)M_1(T) + K(\lambda, T)M(T)]}$$

$$S_{fco}(\lambda, T) = \frac{D(T)L(T)[\beta(\lambda, T)S_b + K(\lambda, T)D(T)\alpha(\lambda)] \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + [D(T)^2\beta(\lambda, T) - L(T)K(\lambda, T)\alpha(\lambda)S_b D(T)]}{L(T)D(T)[K(\lambda, T) - \beta(\lambda, T)] \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + L(T)S_b[K(\lambda, T) - L(T)\beta(\lambda, T)] \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)}$$

Avec,

$$K(\lambda, T) = \frac{\phi(\lambda)\alpha(\lambda)L(T)^2[1-R(\lambda)]}{D(T)[L(T)^2\alpha(\lambda)^2 - 1]}$$

$$\beta(\lambda, T) = \frac{n_i(T)^2}{N_b} \left[e^{\left(\frac{V_{co}(\lambda, T)}{V(T)}\right)} - 1 \right] K(\lambda, T)$$

$$E(\lambda, T) = L(T)[S_b - \alpha(\lambda)D(T)]e^{-\alpha(\lambda)H}$$

$$M(T) = L(T)S_b \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + D(T) \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

$$M_1(T) = L(T)S_b \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + D(T) \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

$$\gamma_a(\lambda, T) = L(T) \left(\frac{Jphcc(\lambda, T)}{qD(T)} - \alpha(\lambda)K(\lambda, T) \right)$$

Différentes valeurs de la température introduites dans les expressions de de Sf_{cc} et de Sf_{co} permet d'avoir des valeurs de Sf_{cc} et Sf_{co} correspondantes. La projection de ces valeurs de Sf_{cc} et Sf_{co} au niveau des courbes de la résistance shunt R_{sh} (figure 121) et de la résistance série R_s (figure 129) permet d'obtenir des valeurs de R_{sh} et R_s expérimentales. Ces valeurs expérimentales de R_{sh} et R_s sont données par le tableau 23

Tableau 27: Valeurs de Sf_{cc}, Sf_{co}, R_{sh} et R_s expérimentales avec leurs températures respectives.

T(K)	Sf _{cc} (cm/s)	Sf _{co} (cm/s)	R _{sh} _{exp} (Ω.cm ²)	R _s _{exp} (Ω.cm ²)	λ(μm)
330	3,128.10 ⁷	6,349.10 ³	7311,9	3	0,94
340	3,253.10 ⁷	6,048.10 ³	6952,5	3,1	0,94
350	3,376.10 ⁷	5,772.10 ³	6041,2	3,3	0,94
360	3,495.10 ⁷	5,519.10 ³	4569,3	3,4	0,94

A partir du tableau 27, les figures 134 et 135 ont été obtenues.

La figure 134 représente le profil de la résistance shunt expérimentale en fonction de la température.

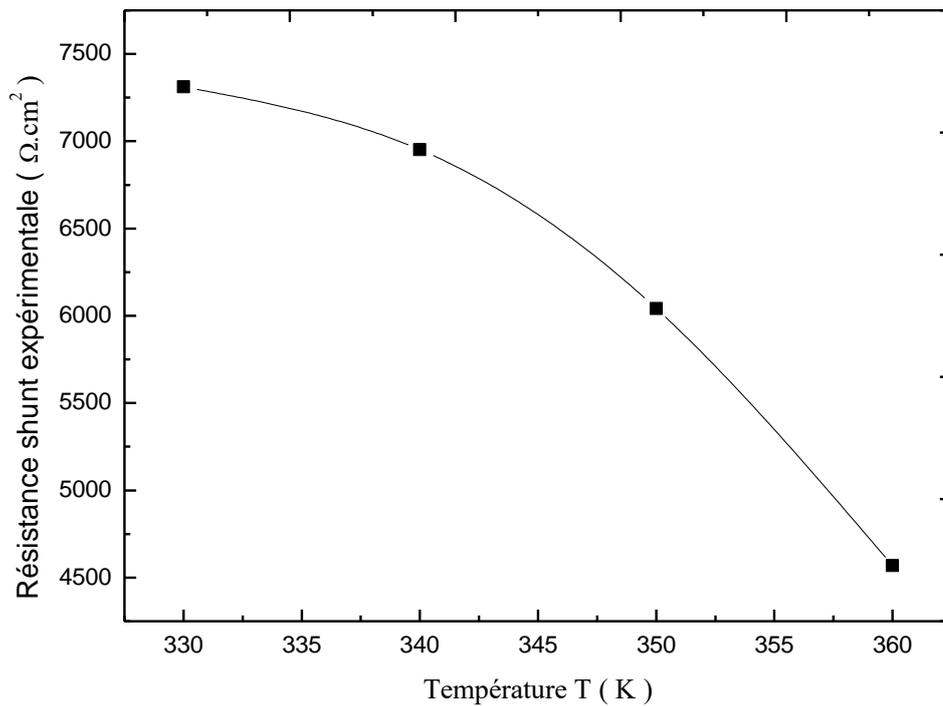


Figure 134: Profil de la résistance shunt expérimentale en fonction de la température.

Nous remarquons une diminution de la résistance shunt expérimentale lorsque la température augmente

Le profil de la résistance série expérimentale en fonction de la température est montré par la figure 135

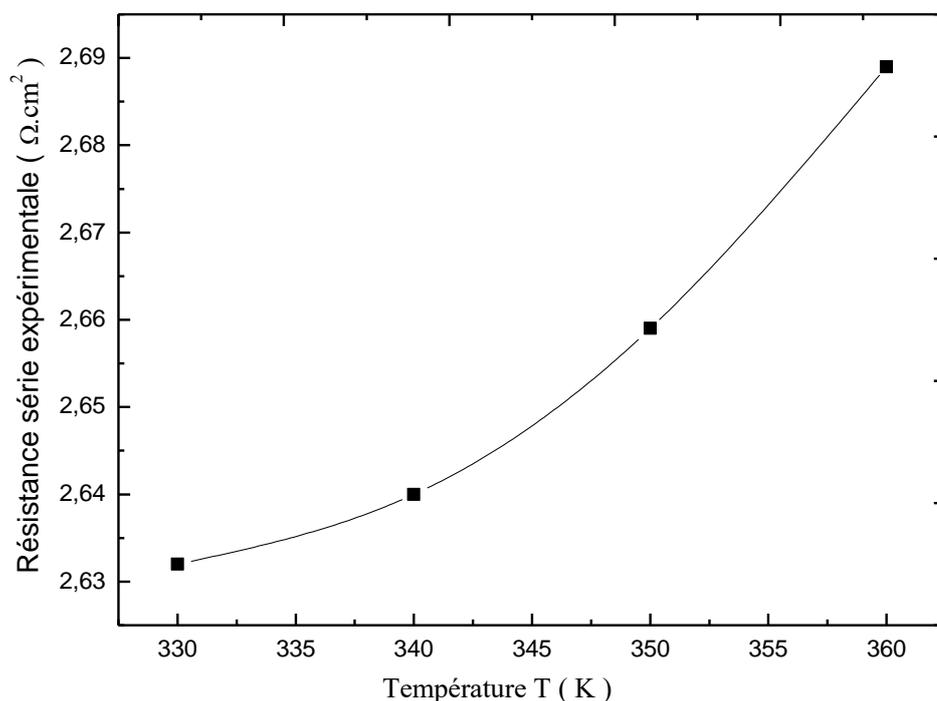


Figure 135: Profil de la résistance série expérimentale en fonction de la température.

Nous observons une augmentation de la résistance série expérimentale quand la température augmente.

IV.6. Conclusion :

L'influence de la température sur les résistances parasites shunt et série d'une photopile bifaciale au silicium sous éclairage monochromatique par la face avant en régime statique, nous a permis de connaître le comportement de la caractéristique I-V, et des résistances shunt et série vis-à-vis de la température et de la longueur d'onde :

- i) Quand la température augmente, la caractéristique I-V diminue. Cette diminution de cette caractéristique est plus constatée sur la phototension.
- ii) Pour les faibles longueurs d'onde, l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation de la caractéristique I-V. Cette augmentation est plus visible sur la densité de photocourant. Pour les grandes longueurs d'onde, l'augmentation de la longueur d'onde provoque une diminution de la caractéristique I-V. Ainsi cette diminution est plus observée de la densité de photocourant.
- iii) Lorsque la température augmente, la résistance shunt diminue alors que la résistance série augmente.
- iv) Pour les faibles longueurs d'onde lorsque la longueur d'onde augmente, les résistances shunt et série diminuent. Pour les grandes longueurs d'onde, l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation des résistances shunt et série.

Concernant les vitesses de recombinaison à la jonction respectives initiant le circuit ouvert S_{fco} et limitant le court-circuit S_{fcc} :

- v) Lorsque la température augmente, la vitesse de recombinaison limitant le circuit ouvert S_{fco} diminue et la résistance série expérimentale R_{sexp} augmente.
- vi) L'augmentation de la température provoque l'augmentation de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit S_{fcc} et la diminution de la résistance shunt expérimentale.

IV.6. Référence

- [1] M. Bashahu and A. Habyarimana, “Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance”, *Renewable Energy*, 6(2): pp: 127-138, 1995.
- [2] El- Adawi, M.K. and I.A. Al-Nuaim, “A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V characteristic curve considering its shunt resistance-new approach”, *Vacuum*, 64: pp: 33-36, 2002.
- [3] K. Bouzidi, M. Chegaar and A. Bouhemadou, “Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance”, *Solar Energ. Mater. Solar Cells*, 91: pp: 1647-1651, 2007.
- [4] S. Mbodji, I. Ly, H. L. Diallo, M.M. Dione, O. Diassé and G. Sissoko “Modeling Study of N⁺/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (S_f)” *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(1): 1-7, 2012.
- [5] J. Lauwaert, K. Decock, S. Khelifi, M. Burgelman “A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94, pp: 966–970, 2010.
- [6] H. Bayhan, A. S. Kavasglu, « admittance and impedance spectroscopy on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells », *Turk. J. Phys.*, 27, pp : 529-535, 2003.
- [7] J. H. Scofield, « effets of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37 (2), pp : 217-233, May 1995.
- [8] M. Kunst and A. Sanders, “Transport of excess carriers in silicon wafers, *Semicond*”, *Sci. Technol.* 7, pp: 51-59, 1992. in the UK.
- [9] G. Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot, P. Mialhe, “Constant illumination-induced open circuit voltage decay (CIOCV) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk and back surface characterization”, 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, poster 1B, pp: 352-54, 12-16 October, 1992. Montreux, Switzerland.
- [10] H.L. Diallo, A. Seïdou. Maïga, A. Wereme, and G.Sissoko, “New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell” *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 42, pp: 203–211, 2008.
- [11] G. Sissoko, C. Museruka, A. Correa, I. Gaye and A.L. Ndiaye., ‘Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell’, *Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Denver, USA, Part III*, pp. 1487- 1490, 15 - 21 June 1996.

- [12] G.Sissoko, E. Nanema, A. Correa, P. M. Bitèye, M. Adj, A. L. Ndiaye., “Silicon Solar Cell Recombination Parameters Determination using the Illuminated I-V Characteristic”, Proceedings of the World Renewable Energy Conference Florence-Italy, pp : 1848-1851, 1998.
- [13] C. D. Thurmond, « The standard thermodynamic functions for the formation of electron and hole in Ge, Si, GaAs and GaP », J. Electrochem. Soc, vol. 122, pp 133-41, Aug 1975.
- [14] G. Sissoko, C. Museruka, A. Correa, I.Gaye, A.L. Ndiaye, “Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell”, In Proceedings World Renewable Energy Congress, 15-21 June, Denver, USA, part 3, pp. 1487-1490, 1996.
- [15] G. Sissoko, E. Nanema, A. Correa, P. M. Bitèye, M. Adj, A. L. Ndiaye, “Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic”, World Renewable Energy Congress, pp.1848-1851, 1998
- [16] J. P. Charles, A. Haddi, A. Maouad, H. Bakhtiar, A. Zerga, A. Hoffmann, P. Mialhe. La Jonction, du Solaire à la Microélectronique Revue des Energies Renouvelables, Vol.3, pp : 1-16, 2000.
- [17] J. Ding, X. Cheng and T. Fu, “Analysis of Series Resistance and P-T Characteristics of the Solar Cell”, Vacuum, Vol. 77, N°2, pp. 163-167, 2005.
- [18] P. Singh, S. N. Singh, M. Lal, and M. Husain, “Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell,” Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 92, no. 12, pp. 1611–1616, 2008.
- [19] E. Cánovas, A. Martí and A. Luque “Design of circular symmetry metal grid patterns for concentration solar cells” Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 389-395, 2006.
- [20] K. kotsovos and K. Misiakos “Evaluation of series resistance losses in the base of single and double junction rear point contact silicon solar cells through simulation and experiment” Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp.328 – 331, 2006.
- [21] E. Radziemska, “Dark I-U-T Measurements of Single Crystalline Silicon Solar Cells, «Energy Conversion Management, Vol. 46, pp. 1485-1494, 2005.
- [22] M.M. Dione, H. L. Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F.Toure, A. Gueye Camara, N. Diémé, Z. N. Bako, S. Mbodji, F.I. Barro and G. Sissoko, “Determination of the Shunt and Series Resistances of a Vertical Multijunction Solar Cell under Constant Multispectral Light”, Proceedings of the 26 th European Photovoltaic Solar Energy Conference pp: 250-

254, 2011. DOI: 10.4229/26thEUPVSEC20111CV.3.6, Retrieved from: <http://www.eupvsec.proceedings.com>

Chapitre V : Influence de la température sur les résistances parasites shunt et série d'une photopile monofaciale au silicium sous éclairage polychromatique

V.1. Introduction

La résistance série est provoquée par le mouvement des électrons à travers l'émetteur et la base de la cellule solaire, la résistance de contact entre le contact métallique et le silicium et la résistance des grilles métalliques à l'avant et l'arrière de la cellule solaire [1, 2, 3].

La résistance de shunt est due à des défauts de fabrication et aussi à la légère conception de cellules solaires. Elle correspond à un chemin de courant alternatif pour le photocourant [1, 2, 3].

Ces résistances shunt et série peuvent être étudiées : en régime statique [4], en régime dynamique fréquentiel [5, 6, 7].

Dans ce chapitre, l'influence de la température sur les résistances shunt et série d'une photopile au silicium en régime statique sous éclairage monochromatique sera étudiée. Pour la détermination des paramètres électriques comme les résistances shunt et série, plusieurs méthodes peuvent être utilisées [1, 2, 3]. Nous allons utiliser la méthode de la caractéristique courant-tension (I-V) pour la détermination de la résistance shunt et de la résistance série. Nous allons déterminer l'expression de la vitesse de recombinaison limitant le circuit ouvert S_{fco} et l'expression de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit S_{fcc} . En utilisant les courbes de la résistance shunt et de la série en fonction de la vitesse de recombinaison à la fonction S_f , les valeurs de la résistance shunt et de la résistance série expérimentales seront aussi déterminées.

ETUDE THEORIQUE

La photopile considérée est de type $n^+ - p - p^+$ et sa structure est présentée à la figure 136.

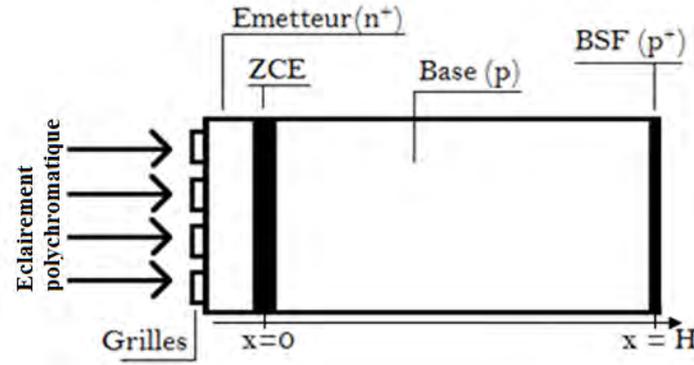


Figure 136: Structure d'une photopile de type n+-p-p+.

Lorsque la photopile est éclairée, il y a création de paires électron-trou dans la base. La densité de porteurs minoritaires en excès dans la base est modélisée par l'équation de continuité suivante:

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{G(x)}{D} \quad (31)$$

Avec

$\delta(x)$ est la densité des électrons générés dans la base à la position x ,

$G(x)$ est le taux de génération des porteurs minoritaires à la position x de la base [8] donné par :

$$G(x) = \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i x} \quad (32)$$

Les coefficients a_i et b_i sont obtenus à partir des valeurs tabulées du rayonnement sous A.M1,5 [9]. Ces coefficients sont donnés par :

$$a_1=6,13 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad a_2=0,54 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad a_3=0,0991 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad b_1=6630 \text{ cm}^{-1}; \quad b_2=1000 \text{ cm}^{-1}; \quad b_3=130 \text{ cm}^{-1},$$

$$(L(T))^2 = \tau D(T) \quad (33)$$

L est la longueur de diffusion des électrons dans la base, elle dépend de la température,

τ est la durée de vie des électrons dans la base,

$$D(T) = \mu(T) \frac{k_b T}{q} \quad (34)$$

$D(T)$ est le coefficient de diffusion des électrons dans la base donné par la relation Einstein.

$$\mu(T) = 1,43.10^9 T^{-2,42} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (35)$$

$\mu(T)$ est le coefficient de mobilité des électrons [10],

k_b est la constante de Boltzmann,

q est la charge élémentaire de l'électron

L'équation (31) a pour solution générale

$$\delta(x, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i (L(T))^2}{D(T) [(L(T))^2 (b_i)^2 - 1]} e^{-b_i x} \quad (36)$$

Les expressions de A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes:

i) At the junction ($x = 0$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(T)} \delta(x, T) \Big|_{x=0} \quad (37)$$

ii) At the back surface ($x = H$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(T)} \delta(x, T) \Big|_{x=H} \quad (38)$$

S_f est la vitesse de recombinaison à la jonction des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, elle caractérise aussi le point de fonctionnement de la photopile [11,12].

S_b est la vitesse de recombinaison à l'arrière des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base [12].

Densité de photocourant

Le photocourant découle de la diffusion des porteurs minoritaires à la jonction et son expression est donnée par :

$$J_{ph}(S_f, T) = qD(T) \left. \frac{\partial \delta(x, S_f, T)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (40)$$

Phototension

La phototension de la photopile est donnée par la relation de Boltzmann.

$$V_{ph}(S_f, T) = V_T \ln \left[\frac{N_b}{(n_i(T))^2} \delta(0, S_f, T) + 1 \right] \quad (45)$$

Où V_T est la tension thermique, elle est définie comme suit :

$$V_T = \frac{k_b T}{q} \quad (46)$$

N_b est le taux de dopage et n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires [13] exprimé comme suit:

$$n_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (47)$$

E_g est l'énergie de gap, et correspond à la différence entre l'énergie de la bande de conduction E_c et celle de la bande de valence E_v . $E_g = 1,12.1,6.10^{-19}$ J

A est une constante. $A = 3,87.10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$

V.2. Caractéristique I-V

V.2.1. Effet de la température sur la caractéristique I-V

La figure 137 représente le profil de la caractéristique densité de photocourant- phototension pour différentes valeurs de la température.

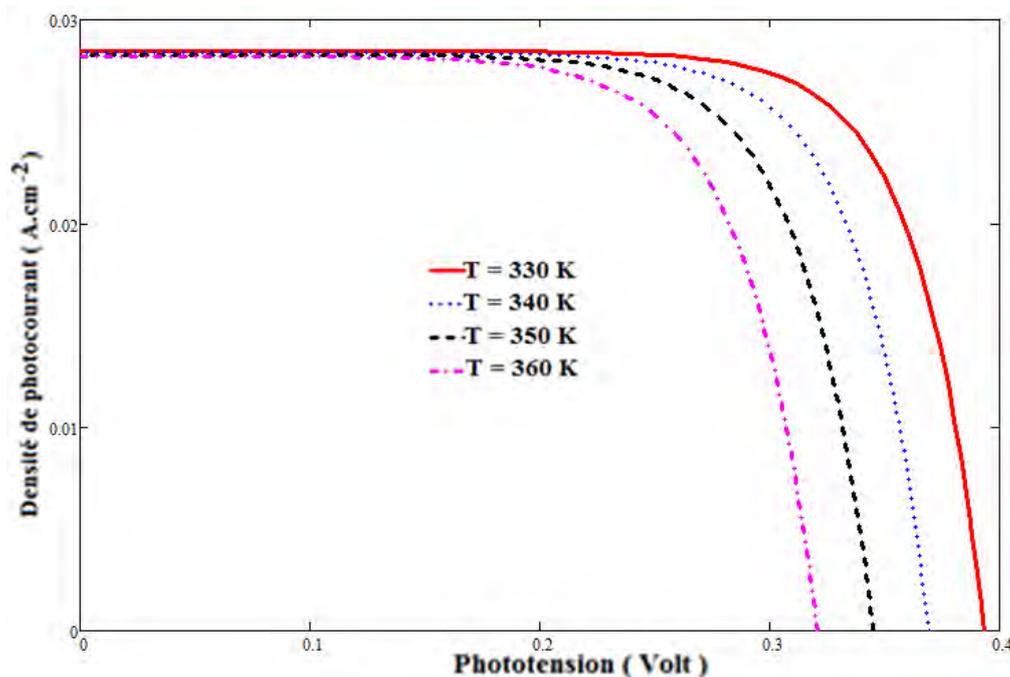


Figure 137: Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température.

Nous constatons que jusqu'au voisinage 0,2 Volt que quel que soit la valeur de la phototension, la densité de photocourant reste maximale et constante. Cette valeur maximale et constante est la densité de photocourant de court-circuit notée J_{phcc} . À partir de cette valeur de la phototension (0,2 Volt), la densité de photocourant diminue très rapidement pour devenir nulle. Cette nullité de la densité de photocourant correspond à une valeur maximale de la phototension. Cette valeur maximale de la phototension est appelée phototension de circuit ouvert et est notée V_{phco} .

Nous remarquons aussi que lorsque la température augmente, densité de photocourant et la phototension diminuent. Cette diminution est plus constatée sur la phototension (résultats vérifiés par les figures 98 et 102 du chapitre III).

Étudions l'influence de la température sur la résistance shunt.

V.3. Résistance shunt

À partir de la partie horizontale de la caractéristique I-V de la photopile nous pouvons constater qu'au voisinage du court-circuit la photopile se comporte comme un générateur de courant [14]. Cependant le courant produit est concrètement autonome de la tension à ses bornes.

La résistance shunt [15] dérive de la recombinaison des porteurs minoritaires de charge en volume, en surface et aux interfaces d'une photopile. Les courants de Foucault d'une cellule est également indicative de bon ou mauvaise qualité d'une photopile. En effet lorsqu'ils

augmentent, le courant de fuite au niveau de la photopile est faible et vice versa. Dans cette étude, pour déterminer la résistance shunt R_{sh} , nous proposons le modèle électrique d'une photopile fonctionnant en court-circuit. Cette situation de court-circuit est présentée avec un générateur de courant parallèle à la résistance shunt et en série avec une charge externe R_{ch} [16]. La figure 138 présente le circuit équivalent de la photopile correspondant [17, 18, 19, 20].

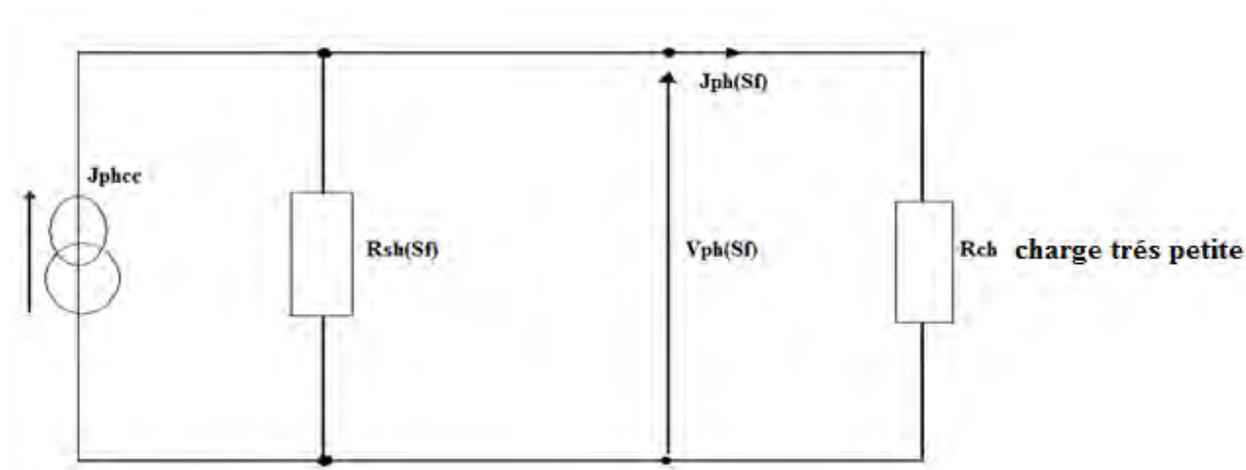


Figure 138: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en court-circuit.

A partir de la figure 138, nous obtenons l'expression de la résistance shunt suivante

$$R_{sh}(S_f, T) = \frac{V_{ph}(S_f, T)}{J_{phcc}(T) - J_{ph}(S_f, T)} \quad (64)$$

J_{phcc} : densité de photocourant de court-circuit.

$J_{ph}(S_f, T)$ et $V_{ph}(S_f, T)$: densités de photocourant et phototension en un point de fonctionnement dépendant de S_f .

R_{ch} : résistance de charge faible produisant de grandes valeurs de S_f

$R_{sh}(S_f, T)$: résistance shunt par unité de surface

V.3.1. Effet de la température sur la résistance shunt

La figure 139 est le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

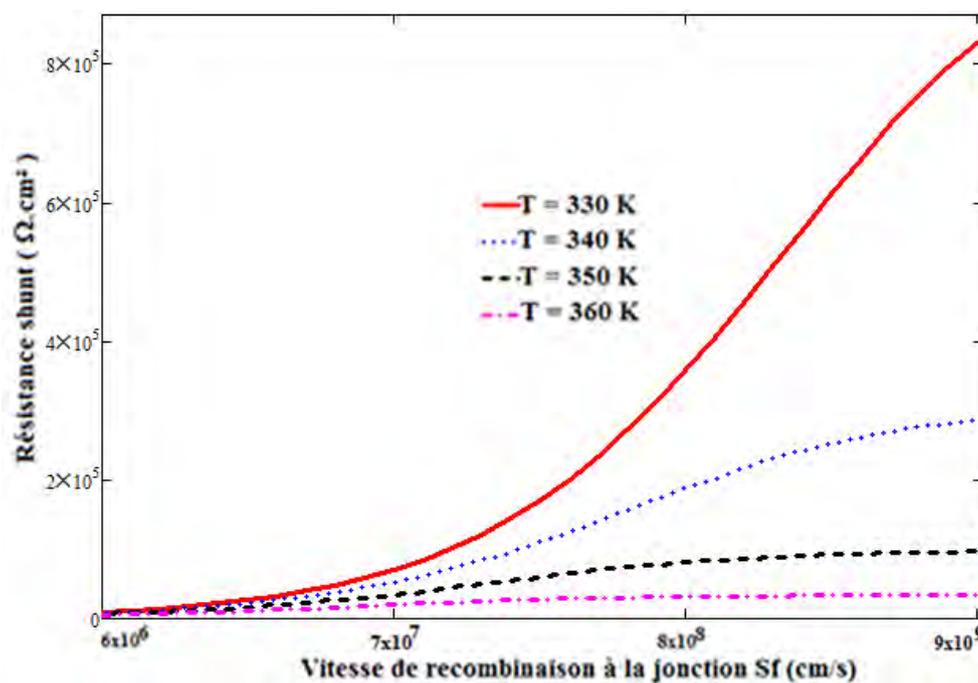


Figure 139: Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

Nous remarquons que lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente, la résistance shunt augmente. En effet la résistance shunt est introduite pour réduire au maximum les courants de fuite pour favoriser l'augmentation du photocourant. Et l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction entraîne la traversée au maximum des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base vers l'émetteur pour être collectés et pour produire du courant. C'est pour cela l'augmentation de la vitesse de recombinaison entraîne l'augmentation de la résistance shunt. De même nous remarquons que l'augmentation de la température provoque une diminution de la résistance shunt.

Après l'étude de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, étudions cette résistance en fonction de la température.

Le profil de la résistance shunt en fonction de la température est représenté par la figure 140.

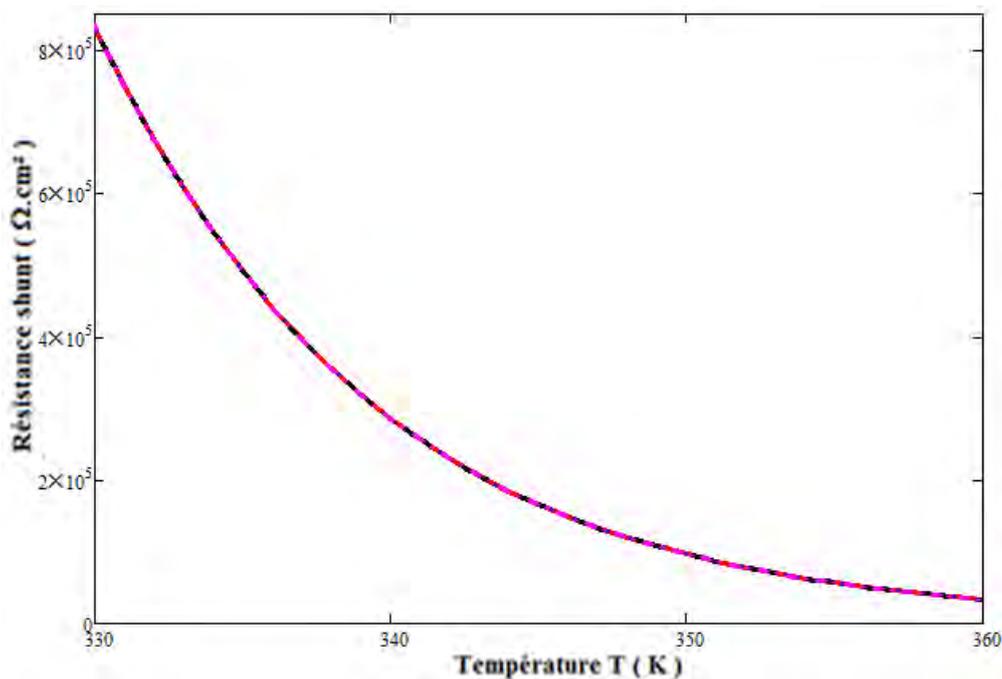


Figure 140: Résistance shunt en fonction de la température.

Nous observons que quand la température augmente, la résistance shunt R_{sh} diminue.

En effet, le coefficient de mobilité diminue quand la température augmente. Cette diminution du coefficient de mobilité provoque celle du coefficient de diffusion. Lorsque le coefficient de diffusion diminue les porteurs minoritaires de charge restent dans la base. Ces porteurs vont subir des recombinaisons au niveau de la jonction d'où la diminution de R_{sh} .

Ce résultat obtenu a été confirmé par ces auteurs [21,22].

Dans une photopile non idéale (vrai cas avec des pertes à la jonction), il y a un courant très petit traversant la jonction, ce qui signifie qu'une charge interne existe dans cette photopile : c'est la résistance shunt R_{sh} [4]. Cette résistance shunt doit être très grande pour éviter les pertes de courant [3]

Nous allons à présent faire l'étude sur la résistance série.

V.4. Résistance série

À partir de la partie verticale de la caractéristique I-V de la photopile, nous remarquons qu'au voisinage du circuit ouvert la tension aux bornes de la photopile est en réalité indépendante du courant débité. La photopile se comporte alors comme un générateur de tension réelle puisque sa caractéristique courant - tension n'est pas identique à une droite verticale. Ce qui explique la présence d'une résistance interne due à la résistivité du matériau polycristallin qui n'est rien d'autre que la résistance série de la photopile. La résistance série [1, 2, 3] est provoquée par le

mouvement des électrons entre, l'émetteur et la base, la résistance de contact et le contact métallique, le silicium et la grille métallique à l'avant et arrière de la photopile.

Dans cette étude, pour déterminer la résistance série R_s , nous proposons le modèle électrique équivalent de la photopile en circuit ouvert [23]. Nous proposons alors la figure 141 comme circuit électrique équivalent correspondant [17, 18, 19, 20].

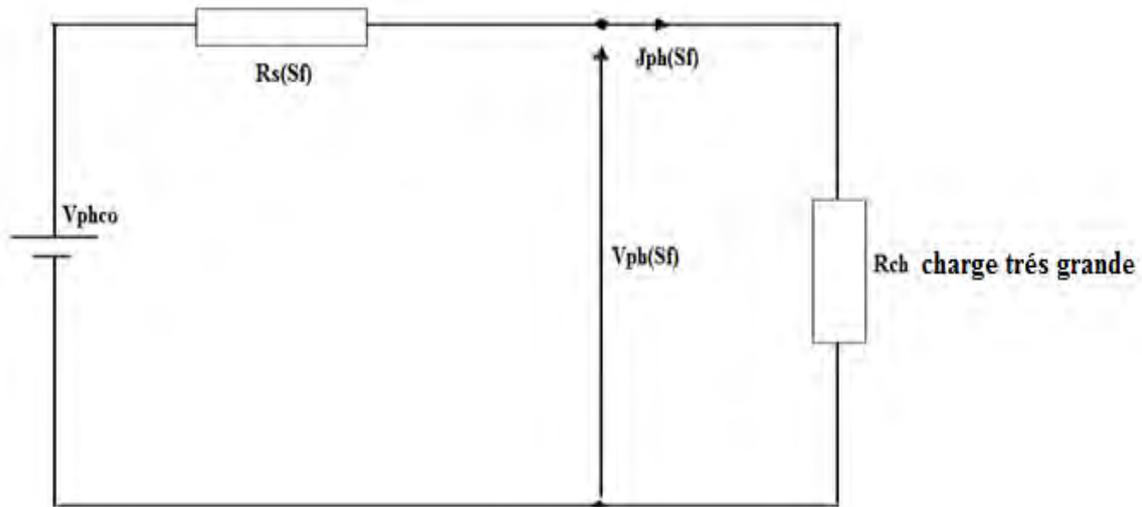


Figure 141: Circuit électrique équivalent de la photopile lorsqu'elle fonctionne pratiquement en circuit ouvert.

A partir de la figure 141, nous obtenons l'expression de la résistance série suivante

$$R_s(S_f, \lambda, T) = \frac{V_{phco}(\lambda, T) - V_{ph}(S_f, \lambda, T)}{J_{ph}(S_f, \lambda, T)} \quad (65)$$

V_{phco} : phototension de circuit ouvert

$R_s(S_f)$: Résistance série par unité de surface

$J_{ph}(S_f)$ et $V_{ph}(S_f)$: Densité de photocourant et Phototension en un point de fonctionnement dépendant de S_f .

R_{ch} : Résistance de charge grande produisant de faibles valeurs de S_f .

V.4.1 Effet de la température sur la résistance série

La figure 142 représente le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.

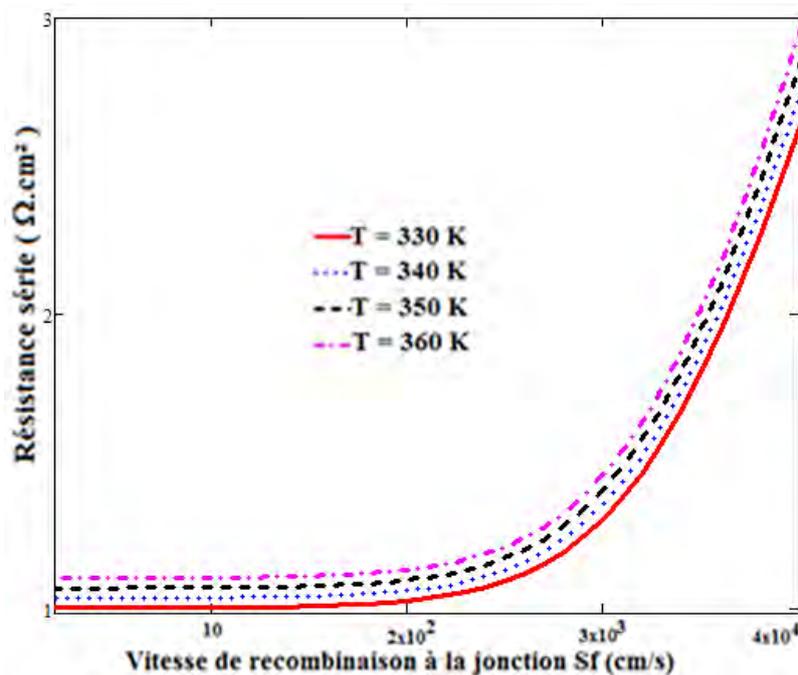


Figure 142: Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes ($T= 330 \text{ K}$).

Nous remarquons que lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction est inférieure à la valeur avoisinant 10 cm/s , la résistance série est constant. À partir de 10 cm/s cette résistance série augmente très rapidement. Nous observons aussi que lorsque la température augmente, la résistance série augmente. En effet, l'augmentation de la température provoque une agitation qui entraîne échauffement des grilles avant et arrière de la photopile. Cette échauffement signifie qu'il ya la présence d'une résistivité du matériau.

Etudions la résistance série en fonction de la température après avoir étudié cette résistance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.

La figure 143 donne le profil de la résistance série en fonction de la température.

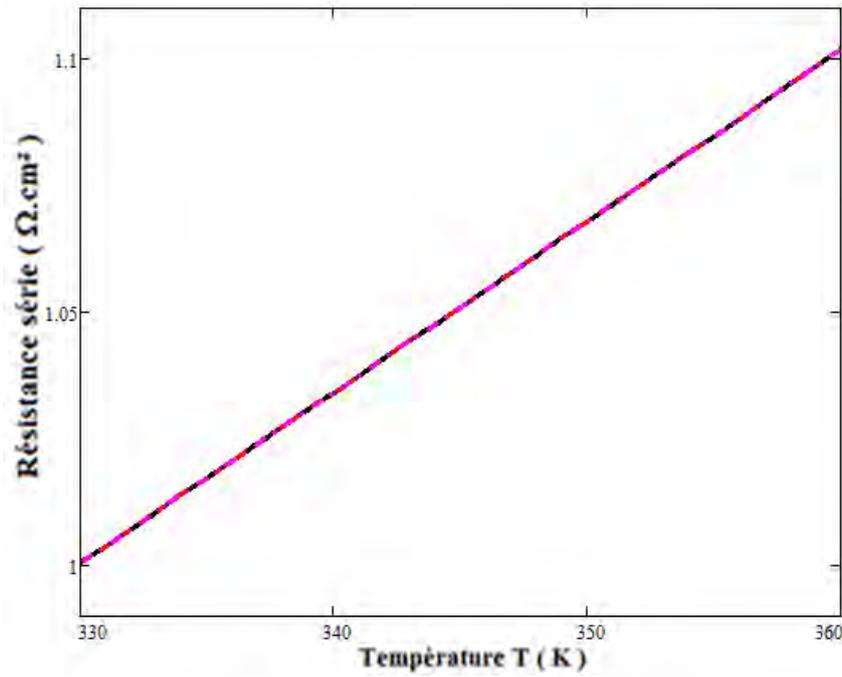


Figure 143: Résistance série en fonction de la température.

Nous remarquons que l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la résistance série. Ce résultat a déjà été confirmé par plusieurs auteurs [21, 22, 24].

La figure 143 nous permet d'avoir l'équation 66

$$R_s(T) = \beta T + \xi \quad (66)$$

Avec,

$\beta = 3,37.10^{-3}$ est la pente, $\xi = -0,111\Omega.cm^2$ est l'ordonnée à l'origine assimilable à une résistance série

V.5. Détermination expérimentale des résistances shunt et série

$$Sfco(T) = \frac{E(T) + L(T) \sum_{i=1}^3 K(T) B_3(T) + L(T) D(T) A_4(T) \sum_{i=1}^3 K(T) b_i}{E_1(T) - E_2(T) - L(T) A_4(T) \sum_{i=1}^3 K(T)} \quad (67)$$

$$A_3(T) = \frac{[n_i(T)]^2}{N_b} \left[e^{\left(\frac{V_{fco}(T)}{V(T)} \right)} - 1 \right] - \sum_{i=1}^3 K(T)$$

$$E(T) = A_3(T)D(T)L(T)S_b \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + A_3(T)(D(T))^2 \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

$$K(T) = \frac{a_i(T)(L(T))^2}{D(T)[1-(L(T)b_i)^2]}$$

$$A_4(T) = L(T)S_b \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + D(T)\cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

$$E_1(T) = -A_3(T)(L(T))^2 \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

$$E_2(T) = A_3(T)L(T)A_4(T) \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

$$S_{fcc}(T) = \frac{L(T) \sum_{i=1}^3 K(T) [L(T)E(T) - M(T)b_i D(T)] - \gamma_a(T)D(T)M(T)}{L(T) \left[\gamma_a(T)M_1(T) + \sum_{i=1}^3 K(T)M(T) \right]} \quad (68)$$

$$E(T) = L(T) \left[S_b - \sum_{i=1}^3 b_i D(T) \right] e^{-bH}$$

$$M(T) = L(T)S_b \cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + D(T) \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

$$\gamma_a(T) = L(T) \left[\frac{J_{phcc}(T)}{qD(T)} - \sum_{i=1}^3 K(T)b_i \right]$$

$$M_1(T) = L(T)S_b \sinh\left(\frac{H}{L(T)}\right) + D(T)\cosh\left(\frac{H}{L(T)}\right)$$

Les valeurs de la température ont permis d'avoir après leur introduction dans les expressions de de Sfcc et de Sfco, les valeurs de Sfcc et Sfco. Les valeurs de Sfcc et Sfco ont été projeté au niveau des courbes de la résistance shunt Rsh (figure 50) et de la résistance série Rs (figure 52). Cette projection permet d'obtenir les valeurs de Rsh et Rs expérimentales. Ces valeurs expérimentales de Rsh et Rs sont données par le tableau 24

Tableau 28: Valeurs de Sfcc, Sfco, Rsh et Rs expérimentales avec leurs températures respectives.

T(K)	Sfcc(cm/s)	Sfco(cm/s)	Rsh_{exp}(Ω.cm²)	Rs_{exp}(Ω.cm²)
330	$3,115.10^7$	$8,783.10^3$	7250,9	1,67
340	$3,210.10^7$	$8,459.10^3$	6730,5	1,73
350	$3,322.10^7$	$8,204.10^3$	6012,2	1,80
360	$3,452.10^7$	$8,021.10^3$	4502,3	1,87

Le tableau 24 a permis d'avoir les figures 144 et 145.

La figure 144 est le profil de la résistance shunt expérimentale en fonction de la température.

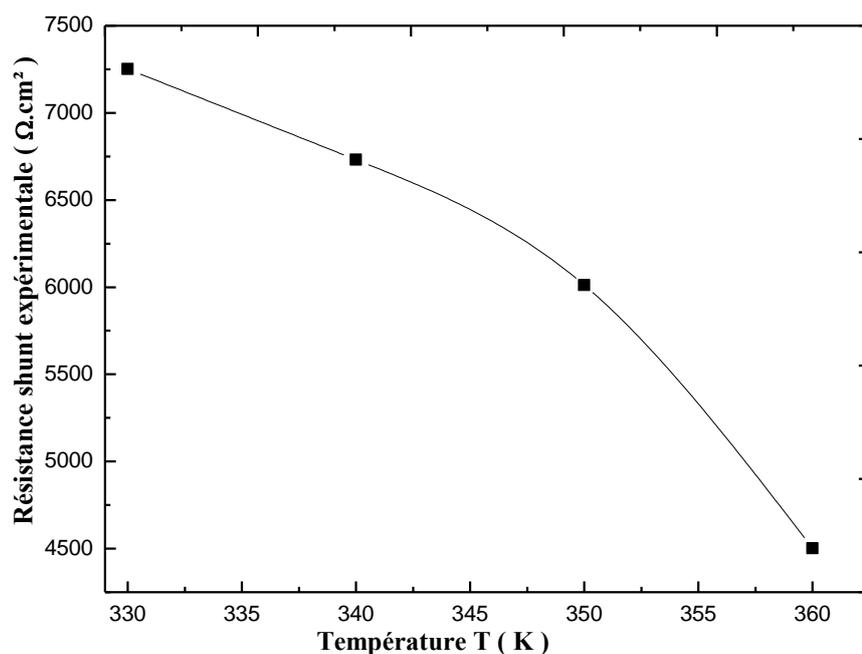


Figure 144: Résistance shunt expérimentale en fonction de la température.

Nous remarquons que lorsque la température augmente, la résistance shunt expérimentale diminue.

Le profil de la résistance série expérimentale est donné par la figure 145.

La figure 145 est le profil de la résistance série expérimentale en fonction de la température.

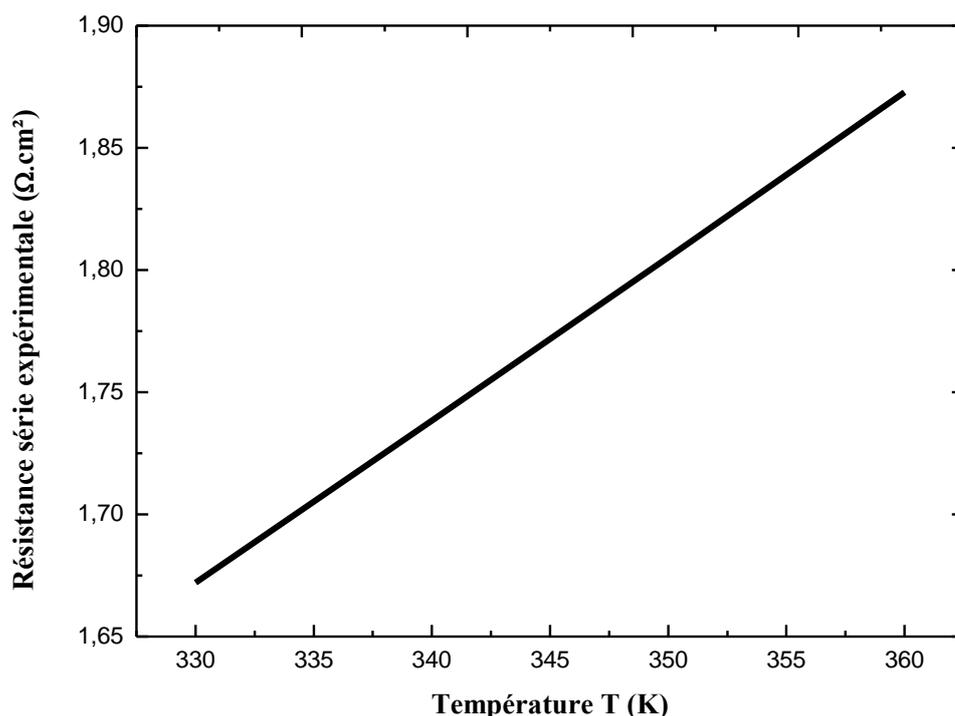


Figure 145: Résistance série expérimentale en fonction de la température.

Nous constatons que la résistance expérimentale augmente lorsque la température augmente.

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre l'effet de l'influence de la température sur la résistance série et shunt d'une photopile bifaciale au silicium sous éclairage polychromatique de la face avant en régime statique a été. À partir de l'expression de la densité de photocourant et de l'expression de la phototension, la caractéristique densité de photocourant-phototension (I-V) a été obtenue. Cette caractéristique a permis d'obtenir les résistances shunt et série. Cependant l'influence de la température sur la caractéristique I-V, sur les résistances shunt et série a permis d'avoir les résultats suivants :

- i) Lorsque la température diminue, la caractéristique I-V augmente. L'augmentation de la caractéristique est plus visible sur la phototension.
- ii) La diminution de la température entraîne une augmentation de la résistance shunt ainsi qu'une diminution de la résistance série.
Avec les vitesses de recombinaison à la jonction respectives initiant le circuit ouvert S_{fco} et limitant le court-circuit S_{fcc} nous avons :
- iii) La diminution de la température provoque, une augmentation de la vitesse de recombinaison limitant le circuit ouvert S_{fco} et une diminution de la résistance série expérimentale R_{sexp} .

- iv) Lorsque la température augmente, la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit S_{foc} augmente et la résistance shunt expérimentale diminue.

V.7 Références

- [1] M. Bashahu and A. Habyarimana, “Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance”, *Renewable Energy*, 6(2): pp: 127-138, 1995.
- [2] El- Adawi, M.K. and I.A. Al-Nuaim, “A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V characteristic curve considering its shunt resistance-new approach”, *Vacuum*, 64: pp: 33-36, 2002.
- [3] K. Bouzidi, M. Chegaar and A. Bouhemadou, “Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance”, *Solar Energ. Mater. Solar Cells*, 91: pp: 1647-1651, 2007.
- [4] S. Mbodji, I. Ly, H. L. Diallo, M.M. Dione, O. Diassé and G. Sissoko “Modeling Study of N⁺/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (Sf)” *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(1): 1-7, 2012.
- [5] J. Lauwaert, K. Decock, S. Khelifi, M. Burgelman “A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94, pp: 966–970, 2010.
- [6] H. Bayhan, A. S. Kavasglu, « admittance and impedance spectroscopy on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells », *Turk. J. Phys.*, 27, pp : 529-535, 2003.
- [7] J. H. Scofield, « effets of series resistance and inductance on solar cell admittance measurements », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 37 (2), pp : 217-233, May 1995.
- [8] J. Furlan, and S. Amon, « Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon. *Solid State Electron* », 28, pp. 1241–43, 1985.
- [9] S. N. Mohammad, « An alternative method for the performance analysis of silicon solar cells. » *J. Appl. Phys.* 61(2), pp. 767-777, 1987.
- [10] M. Kunst and A. Sanders, “Transport of excess carriers in silicon wafers, *Semicond*”, *Sci. Technol.* 7, pp: 51-59, 1992. in the UK.
- [11] G. Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot, P. Mialhe, “Constant illumination-induced open circuit voltage decay (CIOCVD) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk and back surface characterization”, 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, poster 1B, pp: 352-54, 12-16 October, 1992. Montreux, Switzerland.

- [12] H.L. Diallo, A. Seïdou. Maiga, A. Wereme, and G.Sissoko, "New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell" *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 42, pp: 203–211, 2008.
- [13] C. D. Thurmond, « The standard thermodynamic functions for the formation of electron and hole in Ge, Si, GaAs and GaP », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 122, pp 133-41, Aug 1975.
- [14] M. L. Samb, M. Zoungrana, R. Sam, M.M. Dione, M.M. Deme and G. Sissoko, "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. Des Sci.*, 10(4), pp: 23-38, 2010.
- [15] J. P. Charles, A. Haddi, A. Maouad, H. Bakhtiar, A. Zerga, A. Hoffmann, P. Mialhe, "La Jonction, du Solaire à la Microélectronique", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol.3, pp : 1-16, 2000.
- [16] G. Sissoko, C. Museruka, A. Correa, I. Gaye and A.L. Ndiaye., 'Light Spectral Effect on Recombinaison Parameters of Silicon Solar Cell', *Proceedings of the World Renewable Energy Congress, Denver, USA, Part III*, pp. 1487- 1490, 15 - 21 June 1996.
- [17] Th. Flohr and R. Helbig, "Determination of minority-carrier lifetime and surface recombination velocity by Optical-Beam-Induced- Current measurements at different light wavelengths", *J. Appl. Phys.* Vol.66 (7), pp 3060 – 3065, 1989.
- [18] A. Dieng, A. Diao, A.S. Maiga, A. Dioum, I. Ly, G. Sissoko, "A Bifacial Silicon Solar Cell Parameters Determination by Impedance Spectroscopy", *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2007)*, pp.436-440.
- [19] M.L.Samb, S.Sarr, S.Mbodji, S.Gueye, M. Dieng And G.Sissoko, "Etude en modélisation à 3-D d'une photopile au silicium en régime statique sous éclairage multispectrale : détermination des paramètres électriques", *J. Sci.*Vol. 9, N° 4, pp: 36 – 50, 2009. <http://www.cadjds.org>.
- [20] S. Mbodji, H. L. Diallo, I. Ly, A. Dioum, I. F. Barro and G. Sissoko, "Equivalent Electric circuit of a bifacial solar cell in transient state under Constant magnetic field", *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (2006)*, pp. 447 – 450.
- [21] W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", *Solar Energy* 80, pp: 78–88, 2006.
- [22] J. Ding, X. Cheng and T. Fu, "Analysis of Series Resistance and P-T Characteristics of the Solar Cell", *Vacuum*, Vol. 77, N°2, pp. 163-167, 2005.

[23] G.Sissoko, C. Museruka, A. Corrêa, I. Gaye, A. L. Ndiaye, "Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell", World Renewable Energy Congress, part III, pp.1487-1490, 1996.

[24] E. Radziemska, "Dark I-U-T Measurements of Single Crystalline Silicon Solar Cells,"Energy Conversion Management, Vol. 46, pp: 1485-1494, 2005.

VI. Conclusion générale et perspectives

Notre étude était portée sur l'influence de la température sur les paramètres électriques à savoir la capacité, les résistances shunt et série d'une photopile au silicium sous l'éclairement monochromatique ou polychromatique en régime statique.

Ce travail a été constitué essentiellement de cinq parties ou chapitres :

Le **premier chapitre** portait sur l'étude bibliographique. Cette étude bibliographique était sous trois régimes : statique, dynamique fréquentiel et transitoire.

Le **second chapitre** était consacré à l'étude théorique de l'influence de la température sur la capacité d'une photopile au silicium respectivement sous éclairage monochromatique en régime statique.

Le **troisième chapitre** était destiné à l'étude théorique de l'influence de la température sur la capacité d'une photopile au silicium respectivement sous éclairage polychromatique en régime statique.

Le **quatrième chapitre** était basé sur l'étude théorique de l'influence de la température sur les résistances shunt et série d'une photopile au silicium sous éclairage monochromatique en régime statique.

Le **cinquième et dernier chapitre**, avait mis l'accent sur l'étude théorique de l'influence de la température sur les résistances shunt et série d'une photopile au silicium polychromatique en régime statique.

Nous avons constaté qu'en monochromatique de même qu'en polychromatique :

Le taux de génération des porteurs diminue avec l'augmentation de la profondeur dans la base ;

La génération des porteurs a lieu près de la jonction pour les faibles longueurs d'onde et dans la base pour les grandes longueurs d'onde ;

Le coefficient de mobilité des porteurs, le coefficient de diffusion et la longueur de diffusion augmentent lorsque la température diminue ;

En circuit ouvert : pour les faibles valeurs de la profondeur dans la base lorsque la température augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base augmente. Par contre la densité des porteurs minoritaires diminue quand la température augmente pour les grandes valeurs de la profondeur dans la base. En court-circuit, lorsque la température augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base augmente ;

Conclusion et perspectives

En circuit ouvert : concernant les faibles longueurs, l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation de la densité des porteurs minoritaires de charge. Et pour les grandes longueurs d'onde, l'augmentation de la longueur d'onde provoque une diminution de la densité des porteurs minoritaires de charge ;

En court-circuit : nous remarquons que les gradients positif et nul sont plus proche de la jonction émetteur-base pour les faibles longueurs d'onde que pour les grandes longueurs ;

Densité relative des porteurs minoritaires de charge en excès permet de définir l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile en circuit ouvert et en court-circuit. Nous remarquons que pour une température donnée, l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile en court-circuit est plus importante que celui de la photopile en circuit ouvert. Cela veut dire qu'il ya extension de la zone de charge d'espace de la photopile du circuit ouvert au court-circuit ;

En court-circuit pour une température donné, l'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile est moins importante pour une faible que pour une grande longueur d'onde.

De l'éclairement monochromatique comme de l'éclairement polychromatique :

En situation de circuit ouvert de la photopile, lorsque la température augmente, l'épaisseur de la zone de charge d'espace augmente. L'épaisseur de la zone de charge d'espace de la photopile en court-circuit diminue quand la température augmente ;

En circuit ouvert comme en court-circuit, L'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de l'épaisseur de la zone de charge d'espace ;

En circuit ouvert lorsque la température augmente, la densité de photocourant augmente. Par contre en court-circuit l'augmentation de la température provoque la diminution de la densité de photocourant ;

La diminution de la température provoque une augmentation de la phototension et vitesse de recombinaison à la face arrière ;

Lorsque la longueur d'onde (faibles longueurs d'onde) augmente, la densité de photocourant augmente, l'influence de la longueur d'onde sur la vitesse de recombinaison à la face arrière n'est pas visible et la phototension augmente. Lorsque la longueur d'onde (grandes longueurs d'onde) augmente, la densité de photocourant diminue, la vitesse de recombinaison à la face arrière augmente et la phototension diminue ;

L'étude de la capacité en éclairage monochromatique ou polychromatique a permis de montrer :

La capacité de la photopile est composé de la capacité de court-circuit $C_0(T)$ et de la capacité de diffusion de $C_d(T, S_f, \lambda)$ ou $C_d(T, S_f)$.

Le rendement de la capacité de la photopile dépend de $X_{cc}(T,\lambda)$ ou de $X_{cc}(T)$. Le rendement de la capacité de la photopile augmente lorsque la température diminue. La variation de la capacité de la photopile en fonction de la température a permis d'obtenir une température optimale T_{opt} . La température optimale offre un grand rendement de la capacité. A la limite d'une valeur minimale $X_{cc}(T,\lambda)$ ou $X_{cc}(T)$ d'abscisse T_{opt} et d'une valeur minimale $X_{co}(T,\lambda)$ ou $X_{co}(T)$, la capacité de la photopile admet une diminution linéaire avec la température. Cette diminution a lieu à des températures inférieures à T_{opt} . L'extension de la zone de charges d'espace est identique à la diminution de la capacité de la photopile. Toutefois l'augmentation linéaire de la capacité en fonction de la température est observée. Cette augmentation a lieu à des températures supérieures à T_{opt} . Cette augmentation correspond au rétrécissement des épaisseurs $X_{cc}(T,\lambda)$ ou $X_{cc}(T)$ et $X_{co}(T,\lambda)$ ou $X_{co}(T)$.

L'étude des résistances parasites (résistances shunt et série) en éclairissement monochromatique ou polychromatique sur **les chapitres quatre et cinq** a permis de montré:

- i) La diminution de la longueur d'onde provoque une diminution de la caractéristique I-V pour les faibles longueurs d'onde. Cette diminution est plus visible sur la densité de photocourant. La diminution de la longueur d'onde provoque une augmentation de la caractéristique I-V pour les grandes longueurs d'onde,. Ainsi cette augmentation est plus observée de la densité de photocourant.
- ii) La diminution de la température provoque une augmentation de la caractéristique I-V. L'augmentation de cette caractéristique est plus constatée sur la phototension.
- iii) La diminution et l'augmentation respective de la résistance shunt et de la résistance série sont provoqués par l'augmentation de la température.
- iv) la diminution de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit S_{fcc} et l'augmentation de la résistance shunt expérimentale est causé la diminution de la température.
- v) la résistance série expérimentale R_{sexp} et la vitesse de recombinaison limitant le circuit ouvert S_{fco} respectivement diminue et augmente quand la température diminue
- vi) Les résistances parasites (série et shunt) augmentent quand la longueur d'onde augmente (pour les faibles longueurs d'onde). Les résistances série et shunt diminuent lorsque la longueur d'onde diminue (pour les grandes longueurs d'onde).

Nous pouvons élargir le travail sous plusieurs angles, à savoir :

a) **En régime statique,**

a-1-1) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile monofaciale** au silicium sous éclairissements monochromatique et polychromatique ;

a-1-2) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile monofaciale** au silicium sous éclairissements monochromatique et polychromatique ;

a-1-3) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile monofaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-1-4) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile bifaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-1-5) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile bifaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-1-6) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile bifaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-2-1) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à jonction verticale (parallèle ou série)** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-2-2) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à jonction verticale (parallèle ou série)** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-2-3) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à jonction verticale (parallèle ou série)** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-3-1) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à trois dimensions** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-3-2) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile** au silicium **à trois dimensions** sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

a-3-3) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une** au silicium **photopile à trois dimensions** sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b) **En régime dynamique fréquentiel,**

b-1-1) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile monofaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-1-2) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile monofaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-1-3) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile monofaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-1-4) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile bifaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-1-5) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile bifaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-1-6) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile bifaciale** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-2-1) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à jonction verticale (parallèle ou série)** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-2-2) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à jonction verticale (parallèle ou série)** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-2-3) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à jonction verticale (parallèle ou série)** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-3-1) Effet de la température et de l'irradiation sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile à trois dimensions** au silicium sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-3-2) Effet de la température, de l'irradiation et du champ électrique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une photopile** au silicium **à trois dimensions** sous éclairements monochromatique et polychromatique ;

b-3-3) Effet de la température, de l'irradiation, du champ électrique et du champ magnétique sur les paramètres électriques (capacité, résistances shunt et série) **d'une** au silicium **photopile à trois dimensions** sous éclairements monochromatique et polychromatique.

VII. Annexe mathématiques

A-Equation de diffusion de porteurs de charges minoritaires en excès :

Cette équation qui traduit la conservation de charges se met sous la forme:

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{g(x)}{D} \quad (1)$$

C'est une équation différentielle du second ordre avec second membre OÙ,

$g(x)$ est le taux de génération à la profondeur de pénétration (x) qui se met sous les formes 2), monochromatique et 3), polychromatique :

$$g(x) = \alpha(\lambda)\phi(\lambda)[1-R(\lambda)]e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2)$$

$$g(x) = \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i x} \quad (3)$$

Avec

$\phi(\lambda)$ est le flux incident monochromatique de la lumière,

$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ ,

$R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ ,

Les coefficients a_i et b_i sont obtenues à partir des valeurs tabulées du rayonnement sous A.M1,5.

Ces coefficients sont donnés par :

$$a_1=6,13.10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad a_2=0,54.10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad a_3=0,0991.10^{20} \text{ cm}^{-3}/\text{s}; \quad b_1=6630 \text{ cm}^{-1}; \quad b_2=100 \text{ cm}^{-1}; \quad b_3=130 \text{ cm}^{-1}$$

- $\delta(x)$: La densité de porteurs minoritaires de charge en excès de la base

$$(L(T))^2 = \tau D(T) \quad (4)$$

L est la longueur de diffusion des électrons dans la base, elle dépend de la température,

τ est la durée de vie des électrons dans la base,

$$D(T) = \mu(T) \frac{k_b T}{q} \quad (5)$$

$D(T)$ est le coefficient de diffusion des électrons dans la base donné par la relation Einstein.

$$\mu(T) = 1,43 \cdot 10^9 T^{-2,42} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Pour déterminer la solution de l'équation (1) nous résolverons d'abord l'équation différentielle sans second membre suivante:

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = 0 \quad (6)$$

Les solutions en monochromatique (7) et polychromatique (8) de cette équation sont:

$$\delta_1(x, \lambda, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) - \frac{\phi(\lambda) \alpha(\lambda) (L(T))^2 (1 - R(\lambda)) e^{(-\alpha(\lambda)x)}}{D(T) [(L(T))^2 (\alpha(\lambda))^2 - 1]} \quad (7)$$

$$\delta_1(x, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i (L(T))^2}{D(T) [(L(T))^2 (b_i)^2 - 1]} e^{-b_i x} \quad (8)$$

A et B sont des constantes à déterminer.

Les solutions particulières en monochromatique (9) et polychromatique (10) sont de la forme:

$$\delta_2(x) = K e^{(-\alpha(\lambda)x)} \quad (9)$$

$$\delta_2(x) = K e^{-b_i x} \quad (10)$$

K sont des constantes à déterminer.

En introduisant les constantes K dans les équations (9) et (10) nous avons:

$$\delta_2(x) = \frac{\phi(\lambda) \alpha(\lambda) (L(T))^2 (1 - R(\lambda)) e^{(-\alpha(\lambda)x)}}{D(T) [(L(T))^2 (\alpha(\lambda))^2 - 1]} \quad (11)$$

$$\delta_2(x) = - \sum_{i=1}^3 \frac{a_i (L(T))^2}{D(T) [(L(T))^2 (b_i)^2 - 1]} e^{-b_i x} \quad (12)$$

Les solutions générales en monochromatique (14) et polychromatique (15) de la densité de porteurs minoritaires en excès de la base est:

$$\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x) \quad (13)$$

$$\delta(x, \lambda, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) - \frac{\phi(\lambda)\alpha(\lambda)(L(T))^2(1-R(\lambda))e^{(-\alpha(\lambda)x)}}{D(T)[(L(T))^2(\alpha(\lambda))^2-1]} \quad (14)$$

$$\delta(x, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i(L(T))^2}{D(T)[(L(T))^2(b_i)^2-1]} e^{-b_i x} \quad (15)$$

Les constantes A et B en monochromatique (16, 17) et polychromatique (18, 19) sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes :

i) À la jonction ($x = 0$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, T)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(T)} \delta(x, \lambda, T) \Big|_{x=0} \quad (16)$$

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(T)} \delta(x, T) \Big|_{x=0} \quad (17)$$

ii) À la face arrière ($x = H$)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, T)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(T)} \delta(x, \lambda, T) \Big|_{x=H} \quad (18)$$

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(T)} \delta(x, T) \Big|_{x=H} \quad (19)$$

Les expressions de A dépendent : en monochromatique de la profondeur x, de la longueur λ et de la température T ; en polychromatique de la profondeur x et de la température.

De même que les expressions du coefficient B dépendent : en monochromatique de la profondeur x, de la longueur λ et de la température T ; en polychromatique de la profondeur x et de la température.

B : Calcul des expressions des densités de photocourant :

Les procédures de calcul des densités de photocourant sont données par les équations (20) en monochromatique et (21) en polychromatique.

$$J_{ph}(S_f, \lambda, T) = qD(T) \left. \frac{\partial \delta(x, S_f, \lambda, T)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (20)$$

$$J_{ph}(S_f, T) = qD(T) \left. \frac{\partial \delta(x, S_f, T)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (21)$$

Les résolutions des équations (20) et (21) ont donné les équations (22) et (23) suivantes

$$J_{ph}(S_f, \lambda, T) = qD(T) \left[\frac{B(S_f, \lambda, T)}{L(T)} - \frac{\phi(\lambda)[L(T)]^2}{D(T)[L(T)]^2 b_i^2 - 1} [\alpha(\lambda)]^2 [1 - R(\lambda)] \right] \quad (22)$$

$$J_{ph}(S_f, T) = qD(T) \left[\frac{B(S_f, T)}{L(T)} - \sum_{i=1}^3 \frac{a_i [L(T)]^2}{D(T)[L(T)]^2 b_i^2 - 1} b_i \right] \quad (23)$$

C : Calcul des expressions de la phototension:

Les procédures de calcul des densités de photocourant sont données par les équations (24) en monochromatique et (25) en polychromatique.

$$V_{ph}(S_f, \lambda, T) = \frac{k_b T}{q} \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \delta(0, S_f, \lambda, T) \right] \quad (24)$$

$$V_{ph}(S_f, T) = \frac{k_b T}{q} \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \delta(0, S_f, T) \right] \quad (25)$$

Les résolutions des équations (24) et (25) ont donné les équations (26) et (27) suivantes

$$V_{ph}(S_f, \lambda, T) = \frac{k_b T}{q} \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \left[A(S_f, \lambda, T) - \frac{\phi(\lambda)\alpha(\lambda)[1 - R(\lambda)]}{D[L(T)]^2 b_i^2 - 1} \right] \right] \quad (26)$$

$$V_{ph}(S_f, T) = \frac{k_b T}{q} \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \left[A(S_f, T) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i [L(T)]^2}{D[L(T)]^2 b_i^2 - 1} \right] \right] \quad (27)$$

C: Calcul des expressions des capacités :

Les démarches de calcul des expressions de capacité en monochromatique comme en polychromatique ont été bien détaillés dans les chapitres II et III.

D : Calcul des résistances série et shunt:

Les expressions initiales des résistances shunt et série monochromatique et polychromatique données par les équations (28), (29), (30) et (31) :

$$R_{sh}(S_f, \lambda, T) = \frac{V_{ph}(S_f, \lambda, T)}{J_{phcc}(\lambda, T) - J_{ph}(S_f, \lambda, T)} \quad (28)$$

Ou bien

$$R_{sh}(S_f, \lambda, T) = \frac{\frac{k_b T}{q} \ln \left| 1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \left[A(S_f, \lambda, T) - \frac{\phi(\lambda) \alpha(\lambda) [1 - R(\lambda)]}{D [L(T)]^2 b_i^2 - 1} \right] \right|}{J_{ph}(S_f, \lambda, T) - qD(T) \left[\frac{B(S_f, \lambda, T)}{L(T)} - \frac{\phi(\lambda) [L(T)]^2}{D(T) [L(T)]^2 b_i^2 - 1} [\alpha(\lambda)]^2 [1 - R(\lambda)] \right]}$$

$$R_{sh}(S_f, T) = \frac{V_{ph}(S_f, T)}{J_{phcc}(T) - J_{ph}(S_f, T)} \quad (29)$$

Ou bien

$$R_{sh}(S_f, T) = \frac{\frac{k_b T}{q} \ln \left| 1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \left[A(S_f, T) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i [L(T)]^2}{D [L(T)]^2 b_i^2 - 1} \right] \right|}{J_{ph}(S_f, T) - qD(T) \left[\frac{B(S_f, T)}{L(T)} - \sum_{i=1}^3 \frac{a_i [L(T)]^2}{D(T) [L(T)]^2 b_i^2 - 1} b_i \right]}$$

$$R_s(S_f, \lambda, T) = \frac{V_{phco}(\lambda, T) - V_{ph}(S_f, \lambda, T)}{J_{ph}(S_f, \lambda, T)} \quad (30)$$

Ou bien

$$R_s(S_f, \lambda, T) = \frac{V_{ph}(S_f, \lambda, T) - \frac{k_b T}{q} \ln \left| 1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \left[A(S_f, \lambda, T) - \frac{\phi(\lambda) \alpha(\lambda) [1 - R(\lambda)]}{D [L(T)]^2 b_i^2 - 1} \right] \right|}{qD(T) \left[\frac{B(S_f, \lambda, T)}{L(T)} - \frac{\phi(\lambda) [L(T)]^2}{D(T) [L(T)]^2 b_i^2 - 1} [\alpha(\lambda)]^2 [1 - R(\lambda)] \right]}$$

$$R_s(S_f, T) = \frac{V_{phco}(T) - V_{ph}(S_f, T)}{J_{ph}(S_f, T)} \quad (31)$$

Ou bien

$$R_s(S_f, T) = \frac{V_{ph}(S_f, T) - \frac{k_b T}{q} \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_i(T)^2} \left[A(S_f, T) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i [L(T)]^2}{D [L(T)]^2 b_i^2 - 1} \right] \right]}{qD(T) \left[\frac{B(S_f, T)}{L(T)} - \sum_{i=1}^3 \frac{a_i [L(T)]^2}{D(T) [L(T)]^2 b_i^2 - 1} \right] b_i}$$

PUBLICATIONS INTERNATIONALES

Ibrahima Diatta, Issa Diagne, Cheikh Sarr, Khady Faye, Mor Ndiaye, and Grégoire Sissoko, “**Silicon Solar Cell Capacitance: Influence of Both Temperature and Wavelength**”, **IPASJ International Journal of Computer Science (IJCS)**, <http://www.ipasj.org/IJCS/IJCS.htm>, Volume 3, Issue 12, pp: 1-8, December 2015.

Ibrahima Diatta , Ibrahima Ly , Mamadou Wade , Marcel Sitor Diouf , Senghane Mbodji , Grégoire Sissoko, “**Temperature Effect on Capacitance of a Silicon Solar Cell under Constant White Biased Light**”, **World Journal of Condensed Matter Physics (WJCMP)**, <http://www.scirp.org/journal/wjcmp>, Volume 6, Issue 12, pp: 261-268, August 2016.

Ibrahima Diatta, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, Marcel Sitor Diouf, Youssou Traoré, Mor Ndiaye, and Grégoire Sissoko, “**Series resistance both temperature and wavelength dependent in Silicon solar cell under steady state**” **International Journal of Emerging Research in Management and Technology (IJERMT)**. <http://ermt.net>, Volume 6, Issue 1 pp: 21- 26, 2017.

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE, CHIMIE, SCIENCES DE LA TERRE, DE L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR (ED-PCSTUI)

Année : 2017 N° d'ordre :

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : ENERGIE SOLAIRE, MATERIAUX ET SYSTEME

Présentée par

M. Ibrahima DIATTA

Titre : « INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES PARAMETRES ELECTRIQUES (CAPACITE, RESISTANCES SHUNT ET SERIE) DE LA PHOTOPILE AU SILICIUM SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE ET POLYCHROMATIQUE EN REGIME STATIQUE.»

Soutenue publiquement le 15/ 07/ 2017 devant le jury composé de :

Président :	Grégoire	SISSOKO	Professeur titulaire	FST/ UCAD
Rapporteurs :	Emmanuel Birame	NANEMA DIENG	Maître de Recherche Maître de Conférences	CNRST/ Burkina Faso UADB
Examineurs :	Ibrahima LY Mamadou Mor	WADE NDIAYE	Maître de conférences Maître de Conférences Assistant	EPT/ Thiès EPT/ Thiès FST/ UCAD
Directeur :	Senghane	MBODJI	Maître de Conférences	UADB

RESUME :

Une étude bibliographique portant sur les paramètres électriques (Capacité, résistance shunt et série) d'une photopile bifaciale au silicium sous éclairage monochromatique et polychromatique est présentée au chapitre I. Cette étude bibliographique est faite en régime statique, en régime dynamique fréquentiel et en régime dynamique transitoire. Une étude théorique portant sur l'effet de la température sur les paramètres électriques (Capacité, résistances shunt et série) d'une photopile monofaciale au silicium en régime statique sous éclairage monochromatique et polychromatique est présentée. Cette étude théorique est divisée en quatre chapitres (II, III, IV et V). Dans les quatre chapitres les expressions de la densité des porteurs minoritaires, de la densité de photocourant, de la phototension, de la capacité de la photopile ainsi que des résistances shunt et série sont déterminées. Dans le chapitre II qui concerne l'étude la capacité de la photopile sous éclairage monochromatique, la capacité $C_{0\lambda}(T)$ de la photopile en court-circuit, la largeur de la zone de charges d'espace lorsque la photopile est en circuit ouvert $X_{Co\lambda}(T)$ et la largeur de la zone de charges d'espace lorsque la photopile est en court-circuit $X_{Cc\lambda}(T)$ sont déterminées. Le rendement $\eta_{\lambda}(T)$ de la capacité de la photopile est déterminé à partir de $X_{Co\lambda}(T)$ et $X_{Cc\lambda}(T)$. Dans le troisième chapitre qui est l'étude de la photopile sous éclairage polychromatique, la capacité $C_0(T)$ de la photopile en court-circuit, la largeur de la zone de charges d'espace quand la photopile est en circuit ouvert $X_{Co}(T)$ et la largeur de la zone de charges d'espace quand la photopile est en court-circuit $X_{Cc}(T)$ sont déterminées. Le rendement $\eta(T)$ de la capacité de la photopile est déterminé en utilisant $X_{Co}(T)$ et $X_{Cc\lambda}(T)$. Le chapitre quatre concerne l'étude des résistances shunt et série de la photopile sous éclairage monochromatique. Les vitesses de recombinaison limitant le circuit ouvert $S_{fco}(\lambda, T)$ et initiant le court-circuit $S_{fcc}(\lambda, T)$ y sont déterminées. Le cinquième chapitre est l'étude des résistances shunt et série de la photopile sous éclairage polychromatique. Les vitesses de recombinaison limitant le circuit ouvert $S_{fco}(T)$ et initiant le court-circuit $S_{fcc}(T)$ sont déterminées sur ce dernier chapitre. Toute cette étude théorique est basée

sur l'expression du coefficient de diffusion $D(T) = \mu(T) \frac{k_b T}{q}$.

Mots clés: photopile monofaciale, capacité, température, longueur d'onde, résistances série et shunt.