UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER)

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

ECOLE DOCTORALE : PCSTUI

Année : 2017 N° d'ordre :.....

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Présentée par :

M. Babou DIONE

Spécialité : Solaire, Matériaux et Systèmes (SOLMATS) En vue d'obtenir le diplôme de Docteur

SUJET: ETUDE DE LA PHOTOPILE AU SILICIUM SOUS ENVIRONNEMENT MATLAB/SIMULINK POUR DIFFERENTS REGIMES ET SOUS DIFFERENTES CONDITIONS EXPERIMENTALES.

Soutenue publiquement le 15/07/2017 devant le Jury :

Président :	FARSI	Sidi	Professeur	ESP / UCAD
Rapporteurs :	TALL	KhaLy	Maître de	ESP / UCAD
	WADE	Mamadou	Maître de	EPT /Thiès
Membres :	DIENG	Moustapha	Professeur	FST / UCAD
	Ly	Ibrahima	Maître de Conférences	EPT/Thiès
	SOW	Ousmane	Maitre-	IUT / Thiès
Co-Directeurs	MBODJI	Senghane	Assistant Maître de Conférences	UADB/Bambey
	SISSOKO	Grégoire	Professeur	FST/UCAD

DEDICACES

Je dédie ce travail :

Aux familles **DIONE ET NDOUR**, pour leur soutien moral, matériel et financier pour la réussite de mes études.

A mon cher Papa **AMATH AUGUSTIN DIONE** et ma Maman **MINGUÉ NDOUR DIONE** trouvez dans ces petits mots tout le mérite qui vous revient. Votre amour, votre oreille attentive et tout le travail que vous faites pour nous. On vous aime tous.

A mes frères MASSA W. DIONE, PAPE L. DIONE, ABDEL K. DIONE, MARÈME C. DIONE, IBRAHIMA DIONE, SIDI M. DIONE.

A mes Oncles WALY NDOUR, NDIACK NDOUR, SONAR NDOUR et mes tantes

A mon homonyme BABOU SARR

A mes grands-pères feu BARKA DIONE et feu SAMBARÉ NDOUR et à mes grandes mères

feu YADIOP NDONG, feu MBAYANG LOUM

A tonton IBRAHIMA SECK

A mes cousins, mes cousines

A mes amis d''enfance

A tous mes enseignants (es) et professeurs tout au long de mes études

A mes camarades de promotion.

REMERCIEMENTS

Je remercie le **Seigneur** de m''avoir accordé les capacités aussi bien mentales, morales que physiques pour la réalisation de ce modeste travail.

A l'issue de la rédaction de cette thèse, je suis convaincu que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de mon travail m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « l''apprenti chercheur ».

En premier lieu, je tiens à remercier vivement mon co-directeur de thèse **Professeur Grégoire SISSOKO**, évidemment, qui a accepté d'encadrer un inconnu surgi du néant avec un genou écorché et qui lui réclamait une signature pour l'avant-veille. Notre collaboration ne fut donc originellement guère plus que le fruit des circonstances, mais le hasard a bien fait les choses et je suis très heureux de la relation, professionnelle comme amicale, qui en a émergé. Sans lui, ce manuscrit n''existerait pas. Je ne saurai dire à quel point j'ai eu plaisir à discuter avec lui et combien j'ai apprécié ses multiples compétences et ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.

J"ai été extrêmement sensible à sa grande disponibilité à chaque fois que de besoin.

Je tiens à remercier vivement aussi mon deuxième co-directeur de thèse **Senghane MBOGJI** de la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de codiriger ce travail de thèse. J'ai été très sensible à ces conseils et ses soutiens aussi bien qu'éducative que sociaux. **Professeur** un très grand merci que Dieu illumine votre chemin.

Je remercie le **Professeur Sidi FARSI** d'avoir accepté sans aucune réserve de présider mon jury, un vif merci professeur pour le déplacement aussi.

Mes remerciements vont aussi à l'encontre des **Professeurs Khaly TALL** et **Mamadou WADE** d'avoir accepté d'être mes rapporteurs, de juger mon travail et de me faire part de vos remarques et suggestions pour une amélioration de ce document et également d'avoir accepté de se déplacer.

Je remercie également le **Professeur Moustapha DIENG**, pour toutes ces années passées à ses côtés, pour ces enseignements, ces conseils, sa disponibilité et d'avoir accepté de juger mon travail un grand merci.

J''exprime ma très grande gratitude à **Docteur Ousmane SOW**, avec qui j''ai beaucoup travaillé durant ce mémoire. Je vous remercie pour votre soutien dans le travail, vos conseils en tant grand frère. Et j''ai été très sensible à votre disponibilité à chaque fois que de besoin. Merci d''avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie **Professeur Ibrahima LY** d'avoir accepté sans aucune réserve d''évaluer ce mémoire et de me faire part de vos remarques et suggestions pour une amélioration de ce document.

Mes remerciements vont à l'éncontre du **Professeur Cheikh SENE** qui depuis mes pas à l'éncontre du miéneur contre de l'éncontre de miéneur sur le côté éducatif, social. Ses encouragements miéneur permis d'éaller de l'éavant surtout dans les périodes un peu difficiles.

Mes reconnaissances vont à l'éncontre de **Monsieur Ibrahima SECK** pour tout ce que vous avez fait pour moi et ma famille mille merci et je prie Dieu de vous accorder de sa grâce.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude à **Monsieur Ibrahima DIAKHATE** pour tous ces conseils envers moi et j'ai été extrêmement sensible à sa grande disponibilité à chaque fois que de besoin.

Ma reconnaissance va à l'encontre de tous les membres du groupe **GIRER** et surtout ceux à qui j'ai eu énormément de plaisir de discuter avec eux sur la science lors de la rédaction de ce mémoire et d'échanger sur les travaux dirigés.

Mes remerciements vont à l'éncontre de tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidé durant toutes ces années d'étude.

Table des matières

DEDICACESi
REMERCIEMENTSii
Table des matièresiv
Glossaireviii
Introduction générale1
Chap.I : Etudes bibliographiques de la photopile
I.1 Introduction
I.2 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire
I.3 Représentation et principe de l'éffet photovoltaïque6
I.3.1 Représentation de la cellule photovoltaïque
I.3.2 Principe de l''effet photovoltaïque7
I.4 Les caractéristiques de la photopile en régime statique
I.4.1/ Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multispectral constant en régime statique [I.6]
 I.4.2/A method to determine the solar cell series resistance from a single I–V. Characteristic curve considering its shunt resistance new approach (Procédé pour déterminer la résistance série de cellule la solaire à partir d'une seule graphe I-V. Caractéristiques compte tenu de sa résistance shunt nouvelle approche) [I.9]
I.5 Les caractéristiques de la photopile en régime dynamique15
1.5.1/Impedance spectroscopy method applied to electrical parameters determination on bifacial silicon solar cell under magnetic field (Détermination des paramètres électriques d'une photopile bifaciale par la méthode spectroscopie d'impédance) [I.10]
recombination velocity by electrical short-circuit delay [I.11]
I.6/ Artificial neural network approach for more accurate solar cell electrical circuit model [I.12]

I.7/ Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment [I.13]
1.8/ Accurate analytical expressions for the parameters of the simple exponential model of the solar cell [I.14]
I.9/ Determination of recombination parameters in the base of a bifacial silicon solar cell under constant multispectral light [I.15]
I.11/ Mise au point d'un dispositif automatique de caractérisation du module solaire à base d'un microcontrôleur PIC16F877 [I.16]
I.12/ "Experimental Device for Acquisition of Properties I-V and V (T) of the Solar By Automatic Change Operating Point" [I.17]
I.13 Conclusion
Chap.II : Etudes des paramètres électriques d'une photopile au silicium sous éclairement polychromatique : Effet de la température et du champ magnétique par matlab/simulink29
II.1/ Introduction
II.2/ Théorie de la photopile
II.3/ Simulation de la photopile
II.3.1/ Le coefficient de diffusion en fonction de la température
II.3.2/ Coefficient de diffusion en fonction du champ magnétique et de la température 32
II.4/ Vitesse de recombinaison en fonction du champ magnétique et de la température 34
II.5/ Densité des porteurs minoritaires du champ magnétique et de la température
II.5.1/ Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs du champ magnétique et de la température en circuit-ouvert
II.5.2/ Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs du champ magnétique et de la température en court-circuit
II.6/ Densité de photocourant Jph
II.7/ Phototension
II.8/ Caractéristique I-V
II.9/ Résistance shunt
II.10/ Résistance série :

II.11/ Capacité	55
II.12/ Puissance	58
Chapitre III : Simulation sous matlab d'une photopile au silicium sous éclaireme monochromatique en régime dynamique fréquentiel : Effet de la température, du coefficie	nt nt
de dommage et de l'énergie d'irradiation.	53
III.1 Introduction	53
III.2 La densité des porteurs minoritaires en excès.	53
III.3 Modèle simulink du coefficient de diffusion6	54
III.4 Modèle simulink de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb6	55
III.5 Modèle simulink de la densité des porteurs6	58
II.5.1/ La densité des porteurs minoritaires en excès en circuit-ouvert	70
III.5.2/ Densité des porteurs minoritaires en excès en court-circuit	73
III.6/ Densité de photocourant	75
III.7 Densité de la phototension	77
III.8 Impédance Z	79
III.9 La phase de l''impédance	32
III.10 Conclusion	34
Chap.IV : Dispositif expérimental pour l'acquisition de la caractéristique I-V et de température d'une photopile en silicium	la 35
IV.1/Introduction	35
IV.2/ Etude théorique	35
IV.2.1/ Dispositif expérimental de la variation résistive de la cellule solaire	35
IV.2.2/ Dispositif expérimental de la variation résistive de la cellule solaire	36
IV.3/ La loi de commande de la résistance à commande numérique	38
IV.4/ Acquisition de la température	39
IV.5/ Le microcontroleur) 2
IV.6/ Conversion analogique/numérique par le PIC 16F877A) 3
IV.7/Algorithme pour la commande par le microcontrôleur PIC 16F8779) 5

IV.8/ Réalisation du dispositif expérimental	100
IV.8.1/ Schémas de réalisation	100
IV.8.2/ Présentation des résultats	103
IV.9/ Conclusion	105
Conclusion générale	106
RESUME :	108
Bibliographies	110

Liste des figures

Figure 1 : Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranée (rouge) AMO (hlou) AMI	n,
(Touge) AMO, (Dieu) AMT	.4
Figure 2 : Schéme électrique à une diede	. 0 1 0
Figure 3. Schema electrique à une diode	12
Figure 4. Photophe bilactale à une dimension	15
Figure 5: Circuit equivalent de la photoplie $\frac{1}{2}$	10
Figure 6 :Caracteristique I-V d'une photopile sous éclairement constant	1/
Figure /: circuit generateur d'impulsions R2 evite les effets de reflexion. Le chemin désintégration est par $R_1 = 1$ obm principalement	de 19
Figure 8 : Un modèle de réseau artificiel de neurones	21
Figure 9 : Circuit équivalent de la cellule solaire	21
Figure 10 : Dispositif expérimental pour la variation du point de fonctionnement de	19
nhotopile	74
Figure 11 · Signal carré fourni par le générateur	24
Figure 12 : Schéma bloc du système de caractérisation	26
Figure 13 : Commande câblée du dispositif expérimental automatique pour photonile	20
Figure 14 : Fonctionnement en commutation nour l'étude du régime transitoire	27
Figure 15 : Structure d'une cellule solaire en silicium n^+ -n-n+	29
Figure 16 : Modèle simulink du coefficient de diffusion en fonction de la température	31
Figure 17 : Modèle simulink du coefficient de diffusion en fonction de la température et é	du
champ magnétique	32
Figure 18 · Courbe du coefficient de diffusion en fonction de la température pour différent	ies
valeurs du champ magnétique	33
Figure 19 : Modèle simulink de la vitesse de recombinaison pour $b_1 = 6630 cm^{-1}$	35
Figure 20 : Modèle simulink de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de température et du champ magnétique	la 36
Figure 21 : Courbe de la vitesse de recombinaison en fonction du champ magnétique po))r
différentes températures	36
Figure 22 : Courbe de la vitesse de recombinaison en fonction de la température pour B=	=0
Т	37
Figure 23 : Courbe de la vitesse de recombinaison en fonction de la température po	ur
B=0.001T	38
Figure 24 : Modèle simulink du coefficient A	39
Figure 25 : Modèle simulink du coefficient B	39
Figure 26 : Modèle simulink de la densité des porteurs minoritaires	40
Figure 27 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x pour différent	es
valeurs de la température $B = 10 - 6T$; $Sf = 3 \times 103 \ cm/s$	40
Figure 28 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x pour différent	es
valeurs du champ magnétique T=320K ; $Sf = 3 \times 103 \ cm/s$	41
Figure 29 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x pour différent	es
valeurs de la température. $B = 10 - 6T$; $Sf = 6 \times 106 \ cm/s$	42

Figure 30 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x pour différentes
valeurs du champ magnétique. T=320K ; $Sf = 6 \times 106 \ cm/s$
Figure 31 : Modèle simulink de la densité de photocourant Jph
Figure 32 : Courbe de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à
la jonction Sf avec $B = 10 - 5 T$
Figure 33 : Courbe de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à
la jonction Sf avec T=340K
Figure 34 : Modèle simulink de la phototension
Figure 35 : Courbe de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction
Sf pour différentes valeurs de la température avec $B = 10 - 5 T$
Figure 36 : Courbe de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la
jonction Sf pour différentes valeurs du champ magnétique avec T=330K
Figure 37 : Caractéristique I-V pour différentes valeurs de la température avec $B = 10 - 10^{-10}$
5 <i>T</i>
Figure 38 : Modèle électrique équivalent
Figure 39 : Modèle simulink de la résistance shunt
Figure 40 : Courbe de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la
jonction pour différentes valeurs de la température
Figure 41 : Modèle électrique équivalent
Figure 42 : Modèle simulink de la résistance série
Figure 43 : Courbe de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la
jonction Sf pour différentes valeurs de la température
Figure 44 : Modèle simulink de la capacité
Figure 45 : Courbe de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour
différentes valeurs de la température et pour $B = 10 - 5 T$
Figure 46 : Courbe de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour
différentes valeurs de la température et pour T=300K57
Figure 47 : Modélisation du courant de diode
Figure 48 : Modèle simulink de la puissance
Figure 49 : Courbe de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction
pour différentes valeurs de la température avec $B = 10 - 5 T$
Figure 50 : Courbe de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction
pour différentes valeurs du champ magnétique avec T=300K60
Figure 51 : Courbe de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de la
température avec $B = 10 - 5 T$
Figure 52 : Modèle simulink du coefficient de diffusion
Figure 53 : Modèle simulink de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb
Figure 54 : Courbe de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb en fonction de la
fréquence pour différentes températures avec $kl = 5cm^2 / s$ et $\phi_p = 100 Mev$
Figure 55 : Courbe de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb en fonction de la
fréquence pour différentes températures avec $kl = 5cm^2 / s$ et T=300K
Figure 56 : Modèle simulink du coefficient A
Figure 57 : Modèle simulink du coefficient B

Figure 58 : Modèle simulink de la densité des porteurs minoritaires	70
Figure 59 : Courbe de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de l'épaisse	eur
pour différentes valeurs de la température avec $kl = 10 cm^2 / s$, $\phi_p = 100 M_0$	ev,
$S_f = 3 \times 10^3 cm/s \dots$	71
Figure 60 : Courbe de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de l'épaisse	eur
pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation avec $kl = 10 cm^2 / s$, T=300	K,
$S_f = 3 \times 10^3 cm/s \dots$	72
Figure 61 : Courbe de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de l'épaisse	eur
pour différentes valeurs de la température avec $kl = 10 cm^2 / s$, $\phi = 100 M_{\odot}$	ev.
$S_{\perp} = 6 \times 10^6 cm/s$	73
$S_f = 0 \times 10^{\circ} \text{ cm/s}$	15
Figure 62: Courbe de la densité des porteurs minoritaires en exces en fonction de l'épaisse $\frac{1}{2}$ ($\frac{1}{2}$) $\frac{1}{2}$) $\frac{1}{2}$) $\frac{1}{2}$) $\frac{1}{2}$ ($\frac{1}{2}$) 1	eur
pour differentes valeurs de l'energie d'irradiation avec, $kl = 10cm^2/s$ 1=300	К,
$S_f = 6 \times 10^{\circ} cm/s \dots$	74
Figure 63 : Modèle simulink de la densité de photocourant	75
Figure 64 : Courbe du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison	Sf,
$kl = 10 cm^2 / s , \phi_p = 100 Mev $	76
Figure 65 : Modèle simulink de la densité de phototension	77
Figure 66 : Courbe de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison	Sf,
$kl = 10 cm^2 / s$, $\phi_p = 100 Mev$	78
Figure 67 : Modèle simulink de l'impédance	79
Figure 68 : Courbe du module de l'impédance en fonction de log (w) pour différentes vale	urs
de l'énergie d'irradiation $kl = 10 cm^2 / s$, T=300K	. 80
Figure 69 : Courbe de la partie imaginaire de Z en fonction de sa partie réelle po	our,
$kl = 10 cm^2 / s$, $\phi_p = 100 Mev$ et T=300K	81
Figure 70 : Modèle simulink de la phase de l'impédance Z	83
Figure 71 : Courbe de la phase de l'impédance en fonction de la pulsation $kl = 10 cm^2$	/ s
,T=300K	83
Figure 72 : Schéma de base pour la caractérisation de la photopile	86
Figure 73 : Schéma de base pour la caractérisation automatique	86
Figure 74 : Schéma de principe pour la caractérisation automatique de la photopile	88
Figure 75 : Schéma du capteur de température	90
Figure 76 : Schéma de l'amplificateur	91
Figure 77 : Schéma synoptique d'un Pic 16F877	92
Figure 78 : Câblage du Convertisseur Analogique Numérique	94
Figure 79 : Schéma de principe du dispositif expérimental	96
Figure 80 : Circuit électronique du dispositif expérimental	100
Figure 81 : Circuit electronique du dispositif experimental	101
Figure 82 : Carta álastronique du dispositif expérimental	.02
Figure 84 : Courbos I V de la photonile pour écloirement relychromatique	.03
Figure 64. Courses 1- v de la photophe pour éclanement polychromatique 1	.04

Figure 85 : Courbes I-V de la photopile pour éclairement polychromatique	104
Figure 86 : Courbes I-V de la photopile pour éclairement polychromatique	104
Figure 87 : Courbes I-V de la photopile pour éclairement polychromatique	104

Glossaire

Symbole	Grandeur physique	Unité
ai	Coefficients dans l'expression du taux de génération	$cm^{3}.S^{-1}$
bi	Coefficients dans l'expression du taux de génération	
		cm^{-1}
В	Champ magnétique	Tesla
С	Capacité	F. cm ²
D	Coefficient de diffusion	$cm^2.S^{-1}$
Ga(x)	Taux de génération des porteurs dans la base de la	$cm^{-3}.S^{-1}$
	photopile	
Н	Epaisseur de la base dopée p	cm
Jph	Densité de photocourant	A/cm ²
Jcc	Courant de court-circuit	A/cm^2
Jd	Courant de la diode	A/cm^2
Kl	Coefficient de dommage	$cm^2. S^{-1}$
L	Longueur de diffusion	cm
Nb	Taux de dopage de la base en atomes d'impureté	cm^{-3}
ni	Densité intrinsèque des porteurs minoritaires	cm^{-3}
η	Rendement	%
Р	Puissance	W
q	Charge élémentaire	С
FF	Facteur de forme	sans unité
Ri	Résistance	Ω
Rs	Résistance série	Ω
Rsh	Résistance shunt	Ω
Sb	Vitesse de recombinaison à la face arrière	$cm.S^{-1}$
Sf	Vitesse de recombinaison à la jonction	$cm.S^{-1}$
Т	Température	Kelvin
Ti	Transistor	sans unité
Vcap	Tension du capteur	V
Vco	Tension de circuit ouvert	V
Vph	Phototension	V

Vs	Tension de sortie	V
Ve	Tension d'entrée	V
VT	Tension thermique	V
φ _p	Energie d'irradiation	Mev
Х	Profondeur dans la base	cm
ω	Pulsation	Rad/s
δ(x)	Densité des porteurs de charges dans la base de la photopile	<i>cm</i> ⁻³

Introduction générale

L'exploitation des énergies renouvelables, en particulier celle issue de l'astre solaire, aux fins d'assurer un approvisionnement durable en services énergétiques, s'est considérablement accrue durant ces dernières décennies.

Ces énergies sont obtenues grâce ce qu'on appelle photopile [1]. Les photopiles sont des composants optoélectroniques qui transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique [2].

Historiquement, l'éffet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Antoine César BECQUEREL [3] lorsqu'il découvrit le processus de l'utilisation de l'énsoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide.

Mais jusqu''à la seconde guerre mondiale, le phénomène restait une curiosité de laboratoire et ce n'ést qu''en 1954 que des chercheurs des laboratoires Bell ont développé la première photopile [3].

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellurure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales [4]. La photopile la plus répandue est celle du silicium [5].

Le fonctionnement des cellules repose d'abord sur le matériau dont elles sont constituées : le silicium. Un élément que l'on trouve en abondance sur terre puisqu'il est constitué de la silice contenue dans le sable.

En effet, les chercheurs ont remarqué qu''en ajoutant des "impuretés"" la photosenbilité du silicium pouvait être augmentée. Cette technique est appelée ",,dopage"" utilisé généralement pour les semi-conducteurs [6].

Le silicium est un semi-conducteur composé d'atomes. Quand les panneaux photovoltaïques sont exposés à la lumière, les électrons du silicium s'agitent dans tous les sens ils passent d'un atome à l'autre pourtant ça ne constitue pas un courant électrique.

Pour obtenir un courant électrique, le silicium sera dopé avec un surplus d'électrons et un déficit d'électrons. Sur la couche supérieure exposée au soleil, on va y ajouter du phosphore c'est-à-dire un matériau qui possède un électron de plus que le silicium sur leur couche de valence tout en sachant que le silicium a quatre électrons de valence. Et sur sa couche

inférieure, on va y ajouter du bore qui possède un électron de moins que le silicium sur sa couche de valence [7].

Mais, la cellule photovoltaïque en plus d'être exposée au rayonnement solaire est exposée d'autres paramètres qui influencent directement sur ces paramètres phénoménologiques. Il s'agit entre autre de l'isolation de la cellule, de l'irradiation, de la température etc...[8]

En plus de cela, il y^e certains paramètres électriques qui influencent aussi sur le fonctionnement de la photopile.

Par exemple, dans le cas où la photopile fonctionne en région de source de tension, on a une forte influence de la résistance série alors que dans le cas où la photopile fonctionne en source de courant, on assiste à une influence de la résistance parallèle [9].

L'étude d'une photopile se porte en général sur trois régimes à savoir le régime statique, le régime dynamique fréquentiel et le régime transitoire [10,11,12].

Dans cette thèse il sera question d'aborder sur l'aspect de la température et de ces paramètres phénoménologiques d'un panneau solaire.

Dans le premier chapitre, nous allons faire une étude bibliographique. Nous allons étudier les notions préliminaires du rayonnement solaire dans un premier temps, ensuite les effets photovoltaïques. Dans cette phase nous aborderons la présentation de la cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement. Et enfin de terminer avec les études bibliographiques nous présenterons quelques articles sur le thème.

Dans le deuxième chapitre, nous allons mener une simulation d'une photopile au silicium en régime statique sous l'effet de la température et du champ magnétique. Nous développerons le coefficient de diffusion pour différentes valeurs de la température mais aussi de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la température et du champ magnétique. Une simulation sur les densités de photocourant et de phototension va nous mener sur l'étude de la caractéristique I-V et de la puissance de la photopile sous différentes valeurs de la température. Et nous finirons par la simulation des paramètres électriques sous l''effet de la température et du champ magnétique.

Dans le troisième chapitre une simulation d'une photopile au silicium sous éclairement monochromatique sous l'éffet de la température, de l'énergie d'irradiation, de la fréquence et du coefficient de dommage sera faite.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons un dispositif expérimental pour l'acquisition de la caractéristique I-V et de la température d'une photopile en silicium.

Chapitre I : Etudes bibliographiques de la photopile

I.1 Introduction

L'étude de la cellule photovoltaïque date des siècles mais continue à nous offrir des résultats très intéressants et pourrait dans un futur proche être au-devant de l'économie mondial. Le panneau solaire photovoltaïque est composé de cellule photovoltaïque qui sont des composants électroniques semi-conducteur et lorsqu'îl est exposé à la lumière, produit de l'énergie électrique.

Ces cellules photovoltaïques présentent beaucoup de caractéristiques qui différent selon le régime et le type de cellule.

Des recherches ont été menées sur différents aspects de la cellule photovoltaïque telle que sur les caractéristiques phénoménologiques (vitesse de recombinaison à la face avant comme celle de la face arrière), les caractéristiques électriques (capacité, puissance, résistance série et résistance shunt) et les effets qui influent sur la cellule photovoltaïque (température, champ magnétique, fréquence, coefficient de dommage...).

Il sera question dans ce chapitre de faire un rappel sur la notion préliminaire du rayonnement solaire. Puis, nous présenterons certains types de cellules photovoltaïques et faire une comparaison entre ces cellules. Ensuite, nous allons décrire le principe de conversion de la lumière solaire en électricité. Et enfin, nous étudierons quelques articles sur le thème.

I.2 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Dans ce paragraphe, nous allons étudier quelques notions sur le rayonnement solaire. Pour cela, nous avons repris la courbe d'irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen, (rouge) AM0, (bleu) AM1 sur la figure 1 suivante :



Figure 1 : Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen, (rouge) AM0, (bleu) AM1 [I.1]

Le soleil est situé à une distance de 150 millions de kilomètres de notre planète. Il nous donne de l'énergie sans laquelle toute vie sur terre serait difficile [I.2]. Le soleil est composé de gaz extrêmement chauds, les éléments qui le constitue sont bien présents sur notre planète : hélium, hydrogène, calcium, sodium, magnésium, fer etc en parties différentes.

Le soleil est une étoile parfaitement standard comme les milliards d'autres étoiles dont est constitué l'univers.

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement [I.3] :

- ♦ de lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400 nm et 800 nm ;
- ✤ de rayonnement infrarouge (IR) de longueur d'onde inférieure à 400 nm ;
- ♦ de rayonnement ultraviolet (UV) de longueur d'onde supérieure à 800 nm.

La quantité d''énergie reçue par la terre dépend de l''épaisseur atmosphérique. C'est-à-dire plus on a une grande épaisseur d''atmosphère traversée, plus la quantité d''énergie reçue par la terre sera faible. Ceci s''explique par le fait que sur la terre, l'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les IR et les UV et un peu la lumière visible.

L'énergie solaire est également réduite :

- ✤ par l'alternance des jours et des nuits ;
- ✤ par la couverture nuageuse (celle-ci réduit à 50 % l'énergie solaire) ;
- par la variation saisonnière.

Le rayonnement solaire peut-être absorbé, réfléchi ou bien diffusé. Lorsque celui-ci pénètre dans l'atmosphère, il subit une extinction par absorption et à la diffusion par les constituants atmosphériques.

Ce rayonnement va se subdiviser en deux parties :

Une partie sera transmise directement à la surface terrestre, tout en conservant sa direction après absorption partielle : c'est ce qu'on appelle rayonnement solaire direct parfois notée I.

L'autre partie sera absorbée et diffusée dans toutes les directions. Il faut noter que cette diffusion va elle aussi subir un morcellement dont une partie sera renvoyée dans l'espace ce qu'on appelle rayonnement réfléchi et l'autre partie c'est-à-dire celle qui arrive à la surface terrestre est connu sous le nom de rayonnement diffus noté D que l'on mesure par la résultante des composants verticales.

Pour l''absorption, le coefficient d''absorption noté a_{λ} est sans dimension et dépend essentiellement :

- de la longueur d''onde considérée
- ✤ de la température et de la pression du milieu absorbant
- ✤ de la constitution du milieu absorbant

Ce coefficient est donné par l'équation suivante :

$$a_{\lambda} = a_{\lambda_0} \times \frac{P}{P_0} \times \sqrt{\frac{T_0}{T}}$$
(I.1)

Où a_{λ_0} est le coefficient d'absorption défini dans les conditions normales de température et de pression. (P₀, T₀).

L'absorption du rayonnement solaire est essentiellement le fait des molécules du milieu absorbant.

Les noyaux et les électrons qui composent les molécules ne peuvent qu''occuper un nombre fini d'états énergétiques possibles. Chacun de ces états, est défini par plusieurs nombres quantiques pouvant prendre une suite discrète de valeurs.

Une quantité d'énergie égale à $E = \frac{h.C}{\lambda}$ est mesurée lors du passage d'éun état à un autre qui se fait par une absorption ou une réabsorption.

I.3 Représentation et principe de l'effet photovoltaïque

I.3.1 Représentation de la cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs générations de cellule photovoltaïque. On peut citer :

✓ La 1^{ère} génération qui est constituée des cellules monocristallines et poly cristallines. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents (processus Czochralski (Cz) et de processus Siemens). Les procédés de purifications Cz et Siemens ont des structures d'approvisionnement différentes et sont généralement réalisées par des industries différentes.

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme tandis que les polycristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

Les monocristallines ont un rendement de 13-19% et de (23% en laboratoire) comparé au rendement des polys cristallins qui est de 12-14% et de (18% en laboratoire) [I.4].

Mais les polys cristallins présentent un avantage du côté de la fabrication car le procédé nécessite moins d'énergie et n'est pas difficile à mettre en place alors que pour les monocristallines, il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal et la méthode de fabrication est difficile donc très chère.

✓ La 2^{ème} génération est constituée des cellules au silicium amorphe, les cellules photovoltaïques CIS/CIGS (Copper Indium Gallium Selenide), CdTe (Cadium téluride) et les microcristallins.

Cette 2^{ème} génération a été marquée par les procédés pour la fabrication des cellules. Ces procédés tels que le PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) permettent la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces sur un substrat.

Mais ces technologies étaient réservées aux applications spatiales du fait de leur cherté. Elles sont caractérisées pour des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% pour le silicium amorphe à 5-11% pour le CdTe [I.4].

Il y'a aussi les cellules solaires dont au moins la cellule active est constituée de molécules qui sont appelées cellules solaires organiques. Il en existe principalement deux types : les cellules solaires organiques moléculaires et les cellules organiques en polymères.

Ces deux types de cellules apparues dans les années 1990 ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication.

I.3.2 Principe de l'effet photovoltaïque

L'éffet photovoltaïque s''articule autour de trois grands principes dont l''action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l''énergie solaire en énergie électrique. Ces trois grands principes sont :

- ✓ L'absorption des photons
- ✓ La convection de l''énergie absorbée en charge électriques libres
- ✓ La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

Dans ce cas de figure, un dispositif photovoltaïque doit être constitué d'un matériau qui absorbe dans la gamme du spectre solaire et qui possède au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergies ; une résistance de collecte, de résistance électrique la plus faible possible.

La création de paires électron-trou obtenue par l'absorption des photons est appelée conversion de l'énergie.

Un champ électrique E permanent, empêche le déplacement libre des électrons et des trous. Ceci pour éviter les phénomènes de recombinaison de ces porteurs. Ce champ électrique est généré de diverses manières dont on peut citer deux :

- La jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents qu'on appelle hétérojonction ;
- L''interface de zones d'un même semi-conducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes qu''on appelle homojonction.

Pour terminer avec le fonctionnement de l'éffet photovoltaïque, il faut coupler le dispositif avec des électrodes collectrices ou grilles, en face avant et arrière qui vont permettre la connexion de la cellule à un circuit électrique externe.

Ces électrodes collectrices doivent présenter une résistance de contact petite en comparaison avec les différentes résistances du dispositif (résistance de base et de front). Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré par les deux figures ci-dessous où la première représente l'émission stimulée et la deuxième représente le diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.



Figure 2 : Emission stimulée et diagramme en bande d'une cellule solaire

I.4 Les caractéristiques de la photopile en régime statique

I.4.1/ Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multispectral constant en régime statique [I.6]

Le transfert des porteurs minoritaires de charges photogénérées est le principe fondamental de la photopile. C'est pourquoi dans cet article, les auteurs sont parvenus grâce à la résolution de l'équation de continuité qui régit ces porteurs minoritaires de charges à déterminer la densité de ces porteurs et autres paramètres tels que les densités de courants et donc en arriver la détermination des paramètres de recombinaison.

L'équation de continuité de ces porteurs à une dimension est donnée par l'équation suivante :

$$D \bullet \frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} + G(x) - U(x) = \frac{\partial \delta(x,t)}{\partial t}$$
(I.2)

 $\delta(x)$ densité des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base

U(x) taux de recombinaison des porteurs minoritaires

D coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base

G(x) taux de génération des porteurs minoritaires

Le taux de génération G(x) est donné en fonction de la profondeur x d'absorption de la lumière dans la base et peut prendre trois formes selon le cas étudié :

Soit on est en face avant et G(x) est égale à :

$$G_{av}(x) = n \times \sum_{i=1}^{3} a_i \times e^{-b_i \times x}$$
(I.3)

Soit on est en face arrière et G(x) est égale à :

$$G_{ar}(x) = n \times \sum_{i=1}^{3} a_i \times e^{-b_i \times (H-x)}$$
(I.4)

Soit simultanément dans les deux sens et dans ce cas G(x) est égale à :

$$G_{SM}(x) = n \times \sum_{i=1}^{3} a_i \times \left(e^{-b_i \times x} + e^{-b_i \times (H-x)} \right)$$
(I.5)

Divisons l'équation (I.1) par le coefficient de diffusion on aboutit à l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{U(x)}{D} - \frac{\partial \delta(x,t)}{D \partial t} = -\frac{G(x)}{D}$$
(I.6)

en régime statique
$$\frac{\partial \delta(x,t)}{\partial t} = 0$$
 et en posant $U(x) = \frac{\partial(x,t)}{\tau}$ [I.7]

donc l''équation I.6 devient donc
$$\frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x,t)}{D.\tau} = -\frac{G(x)}{D}$$
(I.7)

En remarquant $L^2 = D\tau$ l''équation (I.6) devient

$$\frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x,t)}{L^2} = -\frac{G(x)}{D}$$
(I.8)

La résolution de l'équation (I.8) donne les solutions selon la face éclairée Face avant

$$\delta_{av}(x) = A \cdot \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - n \times \sum_{i=1}^{3} a_i \times e^{(-b_i \times x)}$$
(I.9)

Face arrière

$$\delta_{ar}(x) = A \cdot \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - n \times \sum_{i=1}^{3} a_i \times e^{-b_i \times (H-x)}$$
(I.10)

Simultanément les deux faces

$$\delta_{av}(x) = A \cdot \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - n \times \sum_{i=1}^{3} a_i \times \left(e^{(-b_i \times x)} + e^{-b_i \times (H-x)}\right)$$
(I.11)

Les coefficients A et B sont obtenus à la jonction et à la face arrière à partir des conditions aux limites [I.8].

• A la jonction (x=0)

$$\frac{\partial(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0} = \frac{S_f}{D} \times \delta(x=0)$$
(I.12)

• A la face arrière (x=H)

$$\frac{\partial(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=H} = \frac{S_b}{D} \times \delta(x=H)$$
(I.13)

Les expressions des densités des porteurs minoritaires de charge, leur permis de déterminer les densités de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction suivant l''éclairement par la face avant, arrière et simultanément les deux faces.

$$J_{ph\alpha} = A_{\alpha} \times D \times q \times \frac{\partial(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0}$$
(I.14)

Avec des vitesses de recombinaison très élevées, les densités de courant deviennent des densités de courant de court-circuit. Ces densités de courant de court-circuit sont fonction des paramètres de la vitesse de recombinaison S_b et de la longueur de diffusion L des porteurs minoritaires de charges.

$$J_{cc1} = D \times q \times \sum_{i=1}^{3} K_i \frac{L(b_i \times D - b_i) \cosh\left(\frac{H}{L}\right) - (D - b_i \times L^2 + Sb_1) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) - L(b_i \cdot D - Sb_1) \times \exp\left(-b_i \times H\right)}{D.L.\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + Sb_1 \cdot L^2 \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right)}$$
(I.15)

$$Sb_{l} = D \cdot \sum_{i=1}^{3} b_{i} \times \frac{\exp(-b_{i} \times H) - \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + \frac{1}{L} \times \sinh\left(\frac{H}{L}\right)}{L \times b_{i} \times \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + \exp(-b_{i} \times H) - \cosh\left(\frac{H}{L}\right)}$$
(I.16)

$$J_{cc2} = D \times q \times \sum_{i=1}^{3} K_i \frac{-\left[L(b_i \times D + Sb_2)\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D - b_i \times L^2 + Sb_2)\sinh\left(\frac{H}{L}\right)\right] \times \exp(-b_i \times H)}{D.L.\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + Sb_2.L^2.\sinh\left(\frac{H}{L}\right)}$$
(I.17)

$$Sb_{2} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{i=1}^{3} b_{i} \times \frac{\exp(-b_{i} \times H) \cdot \left[b_{i} \cdot L \times \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right] - b_{i} \cdot L}{1 - \left[L \times b_{i} \times \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \cdot \exp(-b_{i} \times H)}$$
(I.18)

$$J_{cc3} = D \cdot q \sum_{i=1}^{3} K_{i} \frac{L(b_{i} \cdot D + Sb_{3}) - \left[L(b_{i} \cdot D + Sb_{3})\cosh\left(\frac{H}{L}\right) + \left(D - b_{i} \cdot L^{2} + Sb_{3}\right).\sinh\left(\frac{H}{L}\right)\right] \exp\left(-b_{i} \cdot H\right) + L(b_{i} \cdot D - Sb_{3})\cosh\left(\frac{H}{L}\right) - \left(D - b_{i} \cdot L^{2} \cdot Sb_{3}\right).\sinh\left(\frac{H}{L}\right) - \left(D - b_{i} \cdot L^{2} \cdot Sb_{3}\right).$$

$$Sb_{3} = \frac{D}{L} \cdot \sum_{i=1}^{3} \frac{\exp(-b_{i} \times H) \cdot \left[b_{i} \cdot L \times \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + Lb_{i} + \sinh\left(\frac{H}{L}\right)\right] - \left[b_{i} \cdot L + b_{i} \cdot L \times \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + \sinh\left(\frac{H}{L}\right)\right]}{1 - \left[L \times b_{i} \times \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + \cosh\left(\frac{H}{L}\right)\right] \cdot \exp(-b_{i} \times H) + 1 - \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L^{2} \times b_{i} \times \sinh\left(\frac{H}{L}\right)}$$
(I.20)

En conclusion, les auteurs ont pu déterminer la longueur effective par trois techniques, les vitesses de recombinaison à la jonction Sf et celle à la face arrière Sb grâce aux études théoriques et expérimentales. Les auteurs ont pu aussi aboutir à un résultat important car ils ont montré que la limite d'applicabilité de ces techniques de caractérisation des photopiles par l'étude des incertitudes sur la détermination de la longueur de diffusion effective.

I.4.2/A method to determine the solar cell series resistance from a single I– V. Characteristic curve considering its shunt resistance new approach (Procédé pour déterminer la résistance série de cellule la solaire à partir d'une seule graphe I-V. Caractéristiques compte tenu de sa résistance shunt nouvelle approche) [I.9]

Dans cet article, les auteurs ont étudié une méthode de détermination de la résistance série en utilisant une seule courbe du courant I en fonction de la tension V tout en négligeant le courant dans la résistance shunt. Voici la figure suivante qui représente le schéma équivalent à une diode :



Figure 3 : Schéma électrique à une diode

Comparée à deux autres méthodes, cette méthode est la plus utilisée vue que si :

- Nous prenons la méthode des courbes introduites par Loup [I.8], les deux courbes sont considérées à différents niveaux d'intensité de la lumière, ce qui signifie différentes conditions de fonctionnement.
- La méthode de Rauschenbach, le terme exprimant le courant à travers la résistance shunt est donnée par l'équation (I.12)

$$I = \frac{V}{R_{Sh}} \tag{I.21}$$

 $I = \frac{V + I \cdot R_{Sh}}{R_{Sh}} \tag{I.22}$

plutôt que par

ce qui peut affecter le résultat final.

Dans la cellule solaire, concernant les caractéristiques de régime permanent I-V, la densité de courant est donnée par l'équation I.2 suivante sous éclairement uniforme de la lumière solaire

$$I = I_{Ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\lambda \left(V + I \cdot R_{Sh}\right) - 1\right) \right] - \frac{V + I \cdot R_{Sh}}{R_{Sh}}$$
(I.23)

 $I_{\mbox{\scriptsize ph}}$ représente la densité de courant générée par la lumière

I₀ représente la densité de courant de saturation inverse

 R_{Sh} et R_S sont respectivement la résistance shunt et la résistance série

 λ est donné en fonction de la tension thermique $\lambda = \frac{q}{A \times K \times T}$ (I.24)

où A est le facteur d''idéalité d''une diode.

V et I sont des constantes à déterminer.

Les conditions aux limites nous imposent I=0 et V= V_{oc} la résistante shunt est donnée par l''équation (I.25)

$$R_{Sh} = \frac{V_{OC}}{I_{Ph} - I_0 (\exp(\lambda \times V_{OC} - 1))}$$
(I.25)

De l''équation (I.21) on peut avoir l''équation (I.23) suivante

$$R_{Sh}(I - I_{Ph} - I_0) + R_S \cdot I = -R_{Sh} \times I_0 \times \exp(\lambda(V + R_S \cdot I) - V)$$
(I.26)

En négligeant la tension V devant le terme $R_{Sh} \times I_0 \times \exp(\lambda (V + R_S \cdot I)) \rightarrow V$ l'équation (I.23) devient

$$R_{Sh}(I - I_{Ph} - I_0) + R_S \cdot I = -R_{Sh} \times I_0 \times \exp(\lambda (V + R_S \cdot I))$$
(I.27)

Appliquons le logarithme pour trouver V

$$V = \frac{1}{\lambda} \times \ln \left[\frac{R_{Sh} (I - I_{Ph} - I_0)}{R_{Sh} \times I_0} - R_S \cdot I \right] - R_S \cdot I$$
(I.28)

En retournant aux conditions aux limites on obtient Voc

$$V_{oc} = \frac{1}{\lambda} \times \ln \left[\frac{I_{Ph}}{I_0} + 1 \right]$$
(I.29)

La puissance p est donnée par P=IV et la condition pour la puissance maximale possible est donnée par

$$\frac{dP}{dv} = 0 \tag{I.30}$$

qui est aussi une condition équivalente pour

$$\left(\frac{dI}{dv}\right)_{\max P} = -\left(\frac{I}{V}\right)_{\max P} \tag{I.31}$$

La dérivée de la puissance par rapport à l'intensité pour une puissance maximale est donnée par

$$\frac{dp}{dI} = 0 \tag{I.32}$$

qui est équivalente pour

$$\left(\frac{dV}{dI}\right)_{\max P} = -\left(\frac{V}{I}\right)_{\max P} \tag{I.33}$$

Si on applique l''équation (I.28) dans l''équation (I.26) et en tenant compte de l''expression de l''équation (I.24) on obtient à l''équation (I.30) qui s''écrit comme suit :

$$R_{S} \times I_{m} = V_{m} - \frac{I_{m}}{\lambda} \times \left[\frac{\left(R_{s} + R_{Sh}\right)}{R_{Sh} \times \left(I_{ph} + I_{0} - I_{m}\right) - R_{s} \times I_{m}} \right]$$
(I.34)

D''où
$$R_{S} = \frac{V_{m}}{I_{m}} - \frac{1}{\lambda} \times \left[\frac{\left(R_{s} + R_{Sh}\right)}{R_{Sh} \times \left(I_{ph} + I_{0} - I_{m}\right) - R_{s} \times I_{m}} \right]$$
(I.35)

Si on fait tendre R_{Sh} vers l''infini l''équation (I.31) devient alors

$$\lim_{R_{sh\to+\infty}} R_{sh\to+\infty} \frac{V_m}{I_m} - \frac{1}{\lambda} \times \left[\frac{\left(R_s + R_{sh}\right)}{R_{sh\to+\infty}\left(I_{ph} + I_0 - I_m\right) - R_s \times I_m} \right]$$
(I.36)

$$\lim_{\substack{R_{sh} \to +\infty}} R_{sh} = \frac{V_m}{I_m} - \frac{1}{\lambda} \times \left[\frac{R_s}{\left(I_{ph} + I_0 - I_m\right)} \right]$$
(I.37)

I.5 Les caractéristiques de la photopile en régime dynamique

1.5.1/Impedance spectroscopy method applied to electrical parameters determination on bifacial silicon solar cell under magnetic field (Détermination des paramètres électriques d'une photopile bifaciale par la méthode spectroscopie d'impédance) [I.10]

Dans cet article, l'étude s'est portée sur une photopile bifaciale au silicium en régime dynamique fréquentiel.

La photopile présentée dans cet article est une photopile de type n+-p-p+ soumise à un éclairement multispectral sur les deux faces et à l'action d'un champ magnétique constant. Voire figure ci-après :



Figure 4 : Photopile bifaciale à une dimension [I.10]

Pour maintenant déterminer les expressions des paramètres électriques un circuit équivalent est représenté afin de donner la résistance et l'impédance du modèle. Voire figure ci-dessous :



Figure 5 : Circuit équivalent de la photopile [I.10]

 $C = C_D + C_T$ où C_D représente la capacité de diffusion et C_T la capacité de transmission due aux porteurs minoritaires.

 R_P représente la résistance parallèle entre la résistance shunt et la résistance dynamique.

Elle est donnée par
$$R_p = \frac{R_{Sh} \times R_D}{R_{Sh} + R_D}$$
(I.38)

R_S représente la résistance série.

L"impédance dynamique est donnée par la relation suivante

$$Z = R_{PV} + jX_{PV} \tag{I.39}$$

Avec
$$R_{PV} = R_S + \frac{\left(R_{Sh} \times R_D\right)^2}{\left(R_{Sh} \times R_D\right)^2 + \left(\omega \times C \times \left(R_{Sh} \times R_D\right)^2\right)}$$
(I.40)

Et
$$X_{PV} = -\frac{C \times (R_{Sh} \times R_D)^2}{(R_{Sh} \times R_D)^2 + (\omega \times C \times (R_{Sh} + R_D)^2)}$$
(I.41)

L''impédance caractéristique peut être donnée par cette formule suivante où V_{CC} est la phototension en circuit ouvert et J_{CC} le photocourant de court circuit qui dépende de la fréquence f avec ($f = \frac{\omega}{2\pi}$) et du champ magnétique B.

$$Z = \frac{V_{CC}(\omega, B)}{J_{CC}(\omega, B)}$$
(I.42)

Deux cas sont généralement en régime transitoire qui sont :

- le régime transitoire du courant de court-circuit I_{CC}(t)
- le régime transitoire de la tension en circuit-ouvert $V_{CO}(t)$.

Théorie de la méthode de variation de la charge.

La figure suivante représente la caractéristique du courant I en fonction de la tension V d'une photopile sous éclairement constant. Elle décrit l''évolution libre des porteurs de charges minoritaires entre deux états stationnaires de tension respectives V_1 et V_2 . Le régime transitoire sera observé entre les points F_1 et F_2 qui est donnée par la variation de charges externes.



Figure 6 :Caractéristique I-V d'une photopile sous éclairement constant

L'expression de la tension est obtenue grâce à la relation de Boltzman :

$$V(t) = V_T \times \log\left(\frac{\delta(0, t)}{n_0} + 1\right) \tag{I.43}$$

$$V_T$$
 est la tension thermique $n(x,t) = n_0(x,t) + \delta(x,t)$ (I.44)

Posons

$$q_0 = \frac{\delta(0,0)}{n_0} = \exp\left(\frac{V_1 - V_2}{V_T}\right) - 1$$
(I.45)

En remplaçant dans l''équation précédente (I.40) on obtient :

$$V(t) = V_T \log \left(q_0 \times \frac{\delta(0, t)}{\delta(0, 0)} + 1 \right)$$
(I.46)

$$F_{C}(\omega) = \sum_{n} \frac{A^{2}_{n} \times T_{n}(0)}{\delta(0,0)}$$
(I.47)

Incluons la fonction

L'équation (I.43) devient :

$$V(t) = V_T \log \left[q_0 \times F_C(\omega) \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_C}\right) + 1 \right]$$
(I.48)

 $V_2 - V_1 \gg V_T$ et si on effectue un développement limité d'ordre 1 on obtient une fonction exponentielle décroissante du temps.

$$V(t) = V_T \left[q_0 \times F_C(\omega) \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_C}\right) \right]$$
(I.49)

 $V_2 - V_1 \ll V_T$ on obtient une fonction exponentielle linéaire du temps

$$V(t) = V_T \log \left[q_0 \times F_C(\omega) \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_C}\right) \right]$$
(I.50)

I.5.2/ Measurement circuits for silicon-diode and solar cell lifetime and surface recombination velocity by electrical short-circuit delay [I.11]

Dans cet article, les auteurs ont présenté une méthode de détermination plus précise de la durée de vie des porteurs minoritaires dans la base et la vitesse de recombinaison à la face arrière des cellules solaires. Pour cela ils ont utilisé deux circuits de commutations.

Dans le premier circuit, ils ont intégré un transistor de type métal oxyde à la place d'un transistor bipolaire. Et dans le deuxième circuit, ils ont remplacé le commutateur par un générateur d''impulsions.

La figure 7 suivante illustre un circuit alterné qui compte sur le transistor d'effet de terrain de semi-conducteur métallique-oxyde comme un commutateur contrôlé. Ce circuit est plus simple et plus rapidement.



Figure 7 : circuit générateur d'impulsions R2 évite les effets de réflexion. Le chemin de désintégration est par R1 = 10hm principalement [I.11]

Ce circuit comporte quatre éléments : la cellule solaire ou diode, une petite résistance R_1 pour mesurer le courant de passage i(t), un générateur d'impulsion capable de délivrer des impulsions de 50V et une résistance R_2 pour terminer la production du générateur.

Un relais de mercure mouillé semblable aux relais généralement utilisés pour la commutation de rétablissement inverse pourrait probablement marcher comme un remplaçant pour le générateur d'impulsion. La présence de R_2 empêche la sonnerie dans le circuit, mais nécessite des impulsions dans la gamme 20-50V à commuter la tension initiale V(t₀), dans la gamme 500-600 mV, à un près de la condition de court-circuit.

La vitesse effective de recombinaison de surface peut être calculée à partir de

$$S = \left(\frac{D}{\tau_d}\right)^{1/2} \left| \cot\left[X / \left(D \cdot \tau_d^{-1/2} \right) \right] \right|$$
(I.51)

Avec D est la diffusivité des porteurs minoritaires de base ;

Cette solution nécessite également la condition initiale pour la répartition spatiale des opérateurs minoritaires dans la base quasi neutre qui dépend de exp (eV (t <0) / Kt). Ainsi, la

détermination de la tension avant initiale V (t <0) à travers la jonction, ainsi que de td et i (0) doit être précise.

En conclusion, les auteurs ont montré que : Si la durée de vie de la porteuse minoritaire et la vitesse de recombinaison de surface doivent être déterminées en mesurant les deux paramètres i (0) et t caractérisant la décomposition exponentielle simple, alors plusieurs exigences doivent être satisfaites. Tout d'abord, pour une introduction négligeable d'erreur, le temps de commutation global incluant la constante de temps RC du chemin de décroissance doit être un ordre de grandeur inférieur à la constante de temps de décroissance ESCCD.

Deuxièmement, il faut prendre soin de dériver V (t <0) avec précision car exp (eV / KT) influe sur la dépendance spatiale initiale de la densité de porteuse minoritaire. La constante de temps de décroissance courte, souvent observée dans les cellules solaires ou les diodes à faible résistivité en raison des petites durées de vie des porteuses minoritaires, peut être mesurée avec des circuits simples utilisant le MOSEFT. Mais les contributions indésirables aux transitoires observés résultent des capacités de drain de grille à travers le courant, à moins que | dvg / dt | est diminuée.

Cette diminution limite la vitesse à laquelle la condition de court-circuit est forcée à travers la diode ou la cellule solaire étudiée. Si une précision élevée est nécessaire, un générateur d'impulsions avec terminaison appropriée peut être utilisé dans une configuration de circuit.

I.6/ Artificial neural network approach for more accurate solar cell electrical circuit model [I.12].

Dans cet article, les autres ont mis en œuvre un réseau de neurones artificiels comme modèle pour pouvoir étudier les effets de la température et de l''irradiation d''une cellule solaire. En fait un modèle plus précis pour améliorer la précision des paramètres électriques du circuit équivalent d'une cellule solaire a été réalisé.

Les auteurs ont utilisé le modèle à une diode en faisant varier les paramètres de la cellule en fonction de la température et de l'irradiation.

Pour cela, ils sont résolu l'équation suivante (I.48) en utilisant la méthode de la région de confiance qui est la plus utilisée. En général, cette méthode est plus rapide que la méthode de gradient et garantie la stabilité quelque soient les conditions initiales.

Les auteurs ont dû s''appuyer sur de valeurs initiales importantes pour résoudre les équations du système non linéaire qui est donnée par :

$$F_{i} = -I_{i} + X_{1} - X_{2} \times \left[\exp\left(\frac{q \times \left(V_{i} + I_{i} \times X_{4}\right)}{X_{3} \times N_{S} \times K_{b} \times T}\right) - 1 \right] + \frac{\left(V_{i} + I_{i} X_{4}\right)}{X_{5}}$$
(I.52)

Les valeurs initiales sont données par les équations suivantes (I.49), (I.50) et (I.51):

$$I_{PH0} = I_{SC} \tag{I.53}$$

$$R_{S0} = \frac{V_{CO} + V_{XX}}{I_{XX}}$$
(I.54)

$$R_{po} = \frac{V_X}{I_{SC} - I_X} \tag{I.55}$$

Les valeurs initiales du photocourant, de la résistance série et de la résistance parallèle sont déterminées à partir de leur courbe I-V correspondant pour chaque état de fonctionnement de la cellule. La figure 8 représente le modèle ANN qu'ils ont mis en place :



Figure 8 : Un modèle de réseau artificiel de neurones [I.12]

La sélection d'un réseau se base sur le choix entre deux réseaux : soit un grand réseau est mis en place et dans ce cas les nœuds ou connexions inutiles seront supprimés progressivement, soit un petit réseau et d'ajouter des nœuds en cas de besoin.

En conclusion, les auteurs ont observé que le modèle proposé pour une cellule solaire réduit considérablement l'erreur dans les études de simulation et offre également une solution incluant la dépendance des paramètres de circuit équivalents sur l'irradiation solaire et la température. Les auteurs ont parvenu à mettre à évidence un modèle qui tient compte de la température cellulaire et de l''irradiance solaire pour tout type de conception, de simulation et d''application de modules photovolataïques dans diverses études énergétiques. Car, Les données du modèle I-V proposé se chevauchent étroitement avec celles des données expérimentales et des données mesurées indiquant la plus grande exactitude de ce modèle basé sur ANN que celui du conventionnel.

I.7/ Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment [I.13]

Dans cet article, les auteurs ont modélisé mathématiquement et simulé un panneau solaire sous l'environnement Matlab-Similunk. Le modèle mis en place utilise des équations de circuit de base des cellules solaires photovoltaïques y compris les effets de l'irradiation et les changements de température solaires. Leur objectif principal est de trouver les paramètres de l'équation non linéaire de la caractéristique I-V en ajustant sa courbe en trois points que sont : le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et la puissance maximale.

La figure 7 suivante reprend exactement le circuit équivalent de la cellule solaire à une diode :



Figure 9 : Circuit équivalent de la cellule solaire

Pour cela l'équation caractéristique a été étudiée :

$$I = I_{pv} - I_0[exp(\frac{q.V}{A.K.T}) - 1]$$
(I.56)

Les auteurs sont parvenus à monter que les cellules solaires ne fonctionnent dans la courbe caractéristique courant tension qu''au niveau du point de fonctionnement. A ce point, la température et le courant sont maximales. Ceci leur permet de supposer que dans la plupart que le système fonctionne avec une meilleure efficacité. Cela signifie que pour la
modélisation de cellules photovoltaïques, ils doivent utiliser des constantes près du point de fonctionnement, pour un type spécifique de cellules.

1.8/ Accurate analytical expressions for the parameters of the simple exponential model of the solar cell [I.14]

Dans cet article, l''auteur a pu déterminer les résistances série et shunt d'une cellule solaire en partant d'un modèle électrique équivalent à une diode. L''auteur établit l''équation relative au courant à travers la charge en fonction de la tension et des paramètres de la cellule solaire :

$$I = I_{ph} - I_s \left[exp\left(\frac{V + I.R_s}{V_T.\eta}\right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}}$$
(I.57)

où Rs : résistance série

Rsh : résistance shunt

Iph : photocourant

Is : courant de saturation

V : tension aux bornes de la charge

η: facteur d'idéalité

VT : tension thermique.

De cette équation découle la caractéristique courant-tension de la cellule solaire puis deux points de fonctionnement sont considérés :

• le premier lorsque la cellule solaire est en situation de circuit ouvert pour déterminer la résistance série par l'expression suivante :

$$R_{s} = -(\frac{\partial V}{\partial I})_{V=V_{CO}}$$
(I.58)

• le second lorsque la cellule est en situation de court-circuit pour la détermination de la résistance shunt par la relation :

$$R_{\rm sh} = -(\frac{\partial V}{\partial I})_{I-I_{\rm cc}} \tag{I.59}$$

Ces deux considérations ont permis à l'auteur d'arriver aux résultats suivant. C'est-à-dire, il a des valeurs de résistances shunt et série qui sont similaires aux valeurs trouvées par d'autres méthodes.

I.9/ Determination of recombination parameters in the base of a bifacial silicon solar cell under constant multispectral light [I.15]

Les auteurs utilisent un dispositif expérimental pour obtenir le régime transitoire par variation du point de fonctionnement de la photopile bifaciale.

Ce dispositif est constitué par un générateur de signaux carrés (BRI8500) qui pilote un transistor Mosfet de type RFP50N06, deux résistances ajustables R1 et R2, une photopile bifaciale au silicium, un oscilloscope numérique, un micro-ordinateur de même que deux sources lumineuses multispectrales (lampes de 100W) comme le montre la figure I.10 ci-dessous :



Figure 10 : Dispositif expérimental pour la variation du point de fonctionnement de la photopile [I.15]

Sur la figure 11 suivante est représentée la forme du signal fourni par le générateur et la caractéristique courant-tension de la photopile sous éclairement multispectral constant.



Figure 11 : Signal carré fourni par le générateur [I.15]

On remarque lorsque t < 0, seule la résistance R_1 charge la photopile par l'ouverture du transistor mosfet T sous éclairement multispectral constant. Ce qui représente le point de fonctionnement F1 en régime stationnaire.

A t=0, commence la fermeture du transistor mosfet T et après un temps très bref (600-800ns) le mosfet est totalement fermé et la résistance R_1 se trouve en parallèle avec $R_2+R_{DS.on}$. $R_{DS.on}$ étant la résistance à l'état passant de la jonction 'drain(D) – source(S)' du transistor mosfet T. lorsqu'on observe une tension de polarisation de la grille (G) suffisante c'est-à-dire comprise entre 8-12V, on remarque une valeur de $R_{DS.on}$ est très faible inférieure à 1 Ω et peut être négligée devant celle de R_2 qui est comprise entre 10 Ω à 4,7k Ω . On se trouve au point de fonctionnement F2 en régime stationnaire.

Entre les deux points de fonctionnement en régime stationnaire F1 et F2 se trouve le régime dynamique transitoire. La tension transitoire aux bornes de la photopile est enregistrée par un oscilloscope numérique(Tektronics) qui la transmet ensuite à un micro-ordinateur pour traitement et analyse.

Lorsqu''on fait varier R_1 et R_2 , les deux points de fonctionnement en régime stationnaire F1 et F2 se déplacent sur la caractéristique courant-tension de la photopile ce qui a permet á l'auteur d'effectuer l'expérience en tout point de cette caractéristique depuis le circuit ouvert jusqu''au court-circuit et d''enregistrer la réponse en tension ou en courant de la photopile bifaciale sous éclairement multispectral constant.

I.11/ Mise au point d'un dispositif automatique de caractérisation du module solaire à base d'un microcontrôleur PIC16F877 [I.16]

Dans cet article, les auteurs ont mis en évidence un dispositif automatique pour la caractérisation d'un module solaire grâce un microprocesseur 16F877 et ils l'ont appliqué au module solaire hybride en a-Si :H.

Le dispositif de mesure qu''ils ont mis est composé d'un élément central qui est le microcontrôleur (16F877) et d'un ensemble de capteurs, soit deux capteurs d''éclairement respectivement une photorésistante LDR05, ainsi qu''une photodiode BPW21. Un capteur de température analogique le LM35, et enfin, un pont diviseur et une résistance shunt de très faible valeur sont utilisés pour le relevé de la tension et du courant du module photovoltaïque voir figure 12 suivante

•



Figure 12 : Schéma bloc du système de caractérisation [I.16]

Pour mesurer la température, les auteurs ont choisis le capteur de température analogique LM35. Cette sonde convertit la température en faible tension, elle est calibrée en usine de telle façon à avoir 0 V à 0 °C avec une pente de 10 mV/°C.

I.12/ "Experimental Device for Acquisition of Properties I-V and V (T) of the Solar By Automatic Change Operating Point" [I.17]

Dans cet article, les auteurs mettent en évidence un dispositif d'automatisation des variations de la charge résistive alimentée par photopile. Ce dispositif est assuré par un PIC16F877 qui exécute un programme informatique qu'ils ont conçu sur la base d'un algorithme conforme au fonctionnement qu'ils se sont fixés.

Pour cela, les auteurs ont repris un dispositif qui reprend la caractéristique statique de la photopile.

Pour la commande de la résistance, ils ont élaboré un premier séquenceur câblé avec des bascule D ; puis un deuxième séquenceur programmable avec un microprocesseur.

Pour le séquenceur câblé de la résistance à commande numérique, ils ont câblé n bascules D, comme le montre la figure ci-après, pour réaliser un compteur binaire asynchrone dont le nombre de valeurs est égale au nombre de points de fonctionnement de la photopile à savoir 2^{n} .

Un générateur de fonctions (GBF) délivre le signal d'horloge du compteur. Ainsi, en fixant la fréquence de l''horloge ils ont fixé également la durée entre deux points de fonctionnement consécutif sur la caractéristique statique de la photopile comme le montre la figure I.13 cidessous :



Figure 13 : Commande câblée du dispositif expérimental automatique pour photopile [I.17]

Pour le séquenceur programmable de la résistance à commande numérique. Ils ont présenté deux cas :

- ✓ Pour l'étude du régime statique, la fonction comptage est programmée et appliquée au PORT pour faire passer la photopile d'un point de fonctionnement à l'autre ; et ceci de façon continu.
- ✓ Pour l'étude du régime dynamique transitoire, le programme fait passer l'état du PORT en commutation entre deux valeurs D' et D' qui correspondent aux deux points de fonctionnement choisit, comme le montre la figure I.13 ci-dessous :





I.13 Conclusion

Au cours de ce chapitre, un rappel sur le fonctionnement de la photopile et sur le rayonnement solaire a été abordé. Nous avons mis en exergue la présentation de différentes générations de la photopile.

L'étude bibliographique nous a permis de passer en revue les méthodes et les techniques de caractérisation des photopiles aussi bien que les outils mathématiques permettant de les modéliser. Ce chapitre nous a permis de voire malgré les résultats de certains, ils n'ont pas pris en compte dans leurs études et simulations les paramètres phénoménologiques de la photopile telles que les vitesses de recombinaison à la face (Sf) avant et à la face arrière(Sf). Ceci nous mènera au cours de nos études à injecter ses paramètres qui sont essentielles pour une meilleure vue de la photopile et de voir comment le comportement de celle-ci sous différentes conditions expérimentales.

Chapitre II : Etudes des paramètres électriques d'une photopile au silicium sous éclairement polychromatique : Effet de la température et du champ magnétique par matlab/simulink.

II.1/ Introduction

On peut définir l''optimisation et la qualité d''une photopile par la mesure des paramètres phénoménologiques impliqués dans le processus de recombinaison des porteurs minoritaires [II.1]. Ces paramètres sont d''ordre interne optique et d''ordre interne électronique. Dans ce travail on s''intéressera aux paramètres d''ordre électronique. Parmi ces paramètres on peut citer la vitesse de recombinaison à la jonction Sf, celle à la face arrière Sb [II.2,3,4]. A ces paramètres on peut associer les paramètres macroscopiques tels que la résistance shunt Rsh, la résistance série Rs, le courant, la tension, la puissance.

Les caractéristiques de performance de la photopile dépendent principalement de ces paramètres mais aussi des conditions d'exploitations. Ces conditions d'exploitation sont dépendantes de l'irradiation, de la température, du champ magnétique etc... [II.5].

Ces deux derniers sont des paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. L'étude de l'influence de ces différents paramètres et sur le fonctionnement des photopiles solaires en fonction de la température et du champ magnétique sous environnement matlab/simulink s''avère intéressant pour mieux optimiser ces dernières.

II.2/ Théorie de la photopile

La photopile considérée est de type n⁺-p-p+ et sa structure est présentée à la figure 1 [II.3].



Figure 15 : Structure d'une cellule solaire en silicium 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 :

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\partial \delta(x)}{L^2} = -\frac{G(x)}{D^*}$$
(II.1)

Avec δ (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 [II.4,5] donné par :

$$G(x) = \sum_{i=1}^{3} a_i \times \exp(-b_i \times x)$$
(II.2)

Les coefficients a_i et b_i sont obtenues à partir des valeurs tabulées du rayonnement sous A.M1, 5 [II.6]. Ces coefficients sont donnés par : $a_1=6$, 13.1020 cm⁻³/s; $a_2=0$, 54.1020 cm⁻³/s; $a_3=0,0991.1020$ cm⁻³/s; $b_1=6630$ cm⁻¹; $b_2=1000$ cm⁻¹; $b_3=130$ cm⁻¹,

$$L^{2}(T,B) = \tau \times D^{*}(T,B)$$
(II.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,

$$D^{*}(T,B) = \frac{D(T)}{1 + \mu^{2}(T).B^{2}}$$
(II.4)

Avec
$$D(T) = \mu(T) \times \frac{K_b \times T}{q}$$
 (II.5)

D est le coefficient de diffusion des électrons dans la base [II.7].

$$\mu(T) = 1,43.10^9 \times T^{-2,42} \quad \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \tag{II.6}$$

 $\mu(T)$ est le coefficient de mobilité des électrons [II.8],

 k_b est la constante de Boltzmann,

q est la charge élémentaire de l'électron

L'équation (II.1) a pour solution générale :

$$\delta(x,T,B) = A(T,B) \cosh\left(\frac{x}{L(T,B)}\right) + B(T,B) \sinh\left(\frac{x}{L(T,B)}\right) + \sum_{i=1}^{3} \frac{a_i \times L^2(T,B) \times \exp(-b_i \times x)}{D^*(T,B) \bullet \left[L^2(T,B) \bullet b^2 i - 1\right]}$$
(II.7)

Les expressions de A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes [II.9] :

i) A la jonction (x = 0):

$$\frac{\partial \delta(x,T,B)}{\partial x}\Big|_{x=0} = \frac{S_f}{D^*(T,B)} \times \delta(x,T,B)\Big|_{x=0}$$
(II.8)

ii) A l''arrière (x = H):

$$\frac{\partial \delta(x,T,B)}{\partial x}\Big|_{x=H} = -\frac{S_b}{D^*(T,B)} \times \delta(x,T,B)\Big|_{x=H}$$
(II.9)

 S_f désigne la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction de la base et indique aussi le point de fonctionnement de la photopile [II.10,11] et S_b désigne la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la face arrière de la base [II.12].

II.3/ Simulation de la photopile

II.3.1/ Le coefficient de diffusion en fonction de la température

Le coefficient de diffusion donné par l'équation (II.5) est modélisé comme suit sur cette figure 15 :



Figure 16 : Modèle simulink du coefficient de diffusion en fonction de la température

II.3.2/ Coefficient de diffusion en fonction du champ magnétique et de la température

Le coefficient de diffusion donné par l'équation (II.4) est modélisé comme suit :



Figure 17 : Modèle simulink du coefficient de diffusion en fonction de la température et du champ magnétique

Après modélisation, nous avons simulé et obtenu le résultat représenté sur la figure 17 avec les paramètres suivants :

~~~	conno (m	nels) (link)						
Plot	scope. (m	ask) (link)	ainct firct	innut (Y) a	t each time	e sten to		
creation	ate an X-Y I, x-max, y	plot. Ignor -min, y-ma	es data ou ix.	tside the ra	anges spec	ified by x-		
Par	ameters							
x-n	nin:							
77	1							
x-n	nax:							
50	0						_	
v-n	nin:							
0							_	
v-n	nax:							
36	36							
Sai	mnle time							
-1	inpie unie.	8					_	
		ОК		ancel	Help	App	aiy	
		ОК		ancel	Help	App	iy )	
		ОК		ancel	Help	App		
		ОК		ancel	Help	App	B=3.10	
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10	
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	-4 T -4 T -4 T -4 T
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	⁷⁴ T ⁷⁴ T ⁷⁴ T
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	74 T 74 T 74 T 74 T
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	⁷⁴ T ⁷⁴ T ⁷⁴ T ⁷⁴ T
		ОК		ancel	Help		B=3.10 B=4.10 B=5.10 B=6.10	T4 T T4 T T4 T

Figure 18 : Courbe du coefficient de diffusion en fonction de la température pour différentes valeurs du champ magnétique

On constate que cette courbe représente deux zones. Dans la première zone on constate que le coefficient de diffusion augmente pour de faibles températures jusqu''à atteindre un maximum et dans la deuxième zone, on constate une diminution du coefficient de diffusion.

Ce qui veut dire que les porteurs seront diffusés de la base vers l'émetteur pour de faibles températures et seront peu diffusés pour des températures élevées. La température diminue la diffusion des porteurs et par conséquent le rendement de la photopile.

On constate aussi que le coefficient de diffusion diminue avec l'augmentation du champ magnétique.

# II.4/ Vitesse de recombinaison en fonction du champ magnétique et de la température

 $S_b$  désigne la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la face arrière de la base. Elle est donnée par l'équation 10 suivante :

$$S_{b}(T,B) = \frac{D^{*}(T,B)}{L(T,B)} \times \sum \frac{b_{i} \cdot L(T,B) \cdot \exp(-b_{i} \times H) + \sinh\left(\frac{H}{L(T,B)}\right) - b_{i} \cdot L(T,B) \cdot \cosh\left(\frac{H}{L(T,B)}\right)}{\exp(-b_{i} \times H) - \cosh\left(\frac{H}{L(T,B)}\right) + b_{i} \cdot L(T,B) \cdot \sinh\left(\frac{H}{L(T,B)}\right)}$$
(II.10)

Nous avons modélisé la vitesse de recombinaison pour chaque valeur tabulée de b_i qui sont regroupés sur le tableau suivant :

b ₁	b ₂	b ₃
6630 cm ⁻¹	$1000 \text{ cm}^{-1}$	130 cm ⁻¹



Figure 19 : Modèle simulink de la vitesse de recombinaison pour  $b_1 = 6630 \, cm^{-1}$ 

Pour chaque valeur tabulée, nous avons un modèle identique. Il suffira de remplacer  $b_1$  par  $b_2$  et  $b_3$ . Puis, nous les avons mis en subsystem pour avoir une modélisation effective de la vitesse de recombinaison à la face arrière représentée sur la figure 19 :



Figure 20 : Modèle simulink de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la température et du champ magnétique.

La simulation de ce modèle en fonction du champ magnétique en faisant varier la température est donnée à la figure suivante :



Figure 21 : Courbe de la vitesse de recombinaison en fonction du champ magnétique pour différentes températures

Nous remarquons une diminution de la vitesse de recombinaison à la face arrière quand le champ magnétique augmente et tend aussi vers une valeur limite pour des valeurs du champ

de plus en plus grandes. Quand le champ magnétique augmente, les porteurs de charge ne sont quasiment pas présents à la face arrière pouvant être recombinés car le champ magnétique dévie les porteurs.

Nous pouvons dire que le champ magnétique défavorise la recombinaison des porteurs à la face arrière et les porteurs déviés vont participer à la collecte des porteurs pour participer à la photogénération du photocourant.

Sur la figure suivante, nous avons tracé la vitesse de recombinaison en fonction de la température et avons fixé le champ magnétique.



Figure 22 : Courbe de la vitesse de recombinaison en fonction de la température pour B=0 T

Nous remarquons que la vitesse de recombinaison diminue quand la température augmente à l'absence du champ magnétique.

Quand la température augmente il y"a agitation au niveau de la face arrière et les porteurs n'auront pas le temps de se recombiner.

Sur la figure suivante, nous avons tracé la vitesse de recombinaison en fonction de la température et fixé le champ magnétique.



Figure 23 : Courbe de la vitesse de recombinaison en fonction de la température pour B=0.001T

Sur cette figure nous remarquons que la vitesse de recombinaison à la face arrière augmente jusqu''à un certain niveau pour des valeurs de températures faibles puis présente un petit palier pour des valeurs de températures assez grandes. En présence du champ magnétique, la vitesse de recombinaison augmente avec l''augmentation de la température car les porteurs photogénérés ont plus de chance de se recombiner à ce niveau.

# II.5/ Densité des porteurs minoritaires du champ magnétique et de la température.

L''expression de la densité des porteurs minoritaires en excès  $\delta(x)$  est donnée par l''équation (II.7) où les coefficients A et B sont en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf et celle de la face arrière Sb, de la longueur de diffusion L, du coefficient de diffusion D des porteurs minoritaires, du champ magnétique B et enfin de la température T.

Le coefficient A es t modélisé comme suit sur la figure 24 :



Figure 24 : Modèle simulink du coefficient A

Le coefficient B est modélisé comme suit sur la figure 25 :



Figure 25 : Modèle simulink du coefficient B

Après avoir modélisé les coefficients A et B ceci nous mène donc à modéliser la densité des porteurs minoritaires en excès. Le modèle est donné par la figure 26 suivante



Figure 26 : Modèle simulink de la densité des porteurs minoritaires

### II.5.1/ Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs du champ magnétique et de la température en circuitouvert.

Après simulation, nous avons obtenu la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la température en circuit-ouvert. Ainsi, la figure cidessous reprend les résultats de la simulation :



Figure 27 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x pour différentes valeurs de la température  $B = 10^{-6} T$ ;  $S_f = 3 \times 10^3 cm/s$ 

Sur cette figure 27, nous remarquons que les courbes ont toutes des pentes négatives. Ce phénomène s''explique par le fait qu''on est en circuit ouvert et que dans ce cas de figure aucun porteur ne peut traverser la jonction pour participer au photocourant.

La baisse des maximas des densités des porteurs avec la température dans la situation de circuit ouvert caractérise soit une baisse de la photogénération, soit une augmentation des recombinaisons en volume, soit une plus grande diffusion des porteurs à travers la jonction et parfois même l'ensemble de ces phénomènes à la fois avec l'éffet de la température. Ce phénomène traduit également une baisse de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit avec la température.

Cette étude de la densité de porteurs minoritaires de charge va nous mener à faire une étude de la densité de photocourant, de la densité phototension et de la caractéristique I-V mais aussi de la résistance série et de la résistance shunt.

Nous avons aussi simulé pour différentes valeurs du champ magnétique la densité des porteurs minoritaires. Le résultat est représenté sur la figure 28 suivante :



Figure 28 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l''épaisseur x pour différentes valeurs du champ magnétique T=320K ;  $S_f = 3 \times 10^3 \ cm/s$ .

La photopile en circuit-ouvert, présente un module de la densité des porteurs minoritaires qui est maximal au voisinage de la jonction émetteur base à l'absence de champ magnétique. La charge totale emmagasinée est très importante, d'où la capacité de la zone de charge d'espace est maximale. Mais si on applique le champ magnétique, le module de la densité décroit en fonction de la profondeur. Le champ magnétique diminue la densité des porteurs minoritaires en excès à la face arrière.

### II.5.2/ Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs du champ magnétique et de la température en courtcircuit

Cette partie reproduit les courbes de simulations de la densité des porteurs minoritaires en court-circuit pour différentes valeurs du champ magnétique et pour différentes valeurs de la température.

En premier lieu, nous reproduisons la densité des porteurs en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la température sur la figure 29 :



Figure 29 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x pour différentes valeurs de la température.  $B = 10^{-6} T$ ;  $S_f = 6 \times 10^6 cm/s$ 

D'après la figure 29, nous remarquons trois zones :

 une première zone au voisinage très proche de la jonction et pour une plage très faible de x où le gradient de la densité des porteurs de charges est positif traduisant une forte diffusion des porteurs photogénérés au voisinage de la zone de charge d'espace vers l'émetteur. Les porteurs situés dans cette zone peuvent traverser la jonction et contribuer ainsi à la production d'un photocourant. L'allure de la courbe montre qu'il n'y a pas d'accumulation de charges à la jonction, ce qui est normal pour une situation en court-circuit caractérisée par les grandes valeurs de Sf.

- Ensuite on note une deuxième zone correspondante au maximum de la courbe où le gradient des porteurs est nul.
- Et enfin on observe une troisième zone où la densité des porteurs de charge présente un gradient négatif. Dans cette zone la génération des porteurs de charges diminue avec la profondeur dans la base. Les porteurs situés dans cette partie n'ont pas assez d'énergie pour parvenir à la jonction et contribuer à la production du photocourant. Ils se recombinent alors en volume et au niveau de la face arrière. Cet état de fait est un facteur limitant le rendement de la photopile.

Nous avons aussi comme résultat pour la densité des porteurs en court-circuit en fonction de la température pour différentes valeurs du champ magnétique reproduit à la figure 30 cidessous :



Figure 30 : Densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x pour différentes valeurs du champ magnétique. T=320K ;  $S_f = 6 \times 10^6 \ cm/s$ 

Nous observons trois types de gradients :

- les gradients positifs : tous les porteurs qui y sont présents au niveau de cette zone traversent la jonction.
- les gradients nuls au niveau de cette zone, nous notons le maximum de la densité de porteurs de charge, à ce niveau les porteurs sont bloqués ; elle correspond à une position de circuit ouvert.

 les gradients négatifs : à ce niveau, il y"a recombinaison en volume de tous les porteurs. Cette décroissance de la densité de porteurs est également due à la loi de Beer Lambert.

Nous remarquons aussi que lorsque l'intensité du champ magnétique augmente, le maximum de densité de porteurs minoritaires augmente ce maximum se déplaçant vers la jonction. Nous interprétons cette observation par le fait que plus l'intensité du champ magnétique augmente plus est important le nombre de porteurs de charge stockés à la jonction. Ceci étant dû à la diminution du coefficient et de la longueur de diffusion quand le champ magnétique augmente.

### II.6/ Densité de photocourant Jph

L''expression du photocourant est obtenue [II.13]

$$J_{Ph}(S_f, T, B) = q \cdot D^*(T, B) \frac{\partial \delta(x, S_f, T, B)}{\partial x} \bigg|_{x=0}$$
(II.11)

Nous représentons le modèle simulink de la densité de photocourant sur la figure 31 suivante :



Figure 31 : Modèle simulink de la densité de photocourant Jph

Le résultat de cette simulation est repris sur la figure 32 ci-dessous qui représente la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température.



Figure 32 : Courbe de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf avec  $B = 10^{-5} T$ 

La figure 32 montre que la densité de photocourant est faible pour les valeurs faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) et qu'elle tend vers une valeur maximale constante pour des valeurs élevées de Sf. Lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction est voisine de zéro, le photocourant est faible on est en position de circuit ouvert. Ensuite le photocourant croît avec la vitesse de recombinaison et devient constant pour des valeurs de Sf très élevées. Le photocourant correspond alors au courant de court-circuit. La densité de photocourant diminue quand la température augmente. Ce résultat peut être expliqué par le fait que quand la température augmente, la photopile n'aura du temps pour se reposer du coup, les porteurs ne pourront pas participer à la création paire électron trou ce qui va diminuer le photocourant.

Sur la figure suivante, nous représentons la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs du champ magnétique.



Figure 33 : Courbe de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf avec T=340K

La figure 33 montre que la densité de photocourant est quasi nulle pour les valeurs faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) et qu'elle tend vers une valeur maximale constante pour des valeurs élevées de Sf. Ces deux situations traduisent deux états de fonctionnement particuliers de la photopile, respectivement en circuit ouvert et en courtcircuit. Autre aussi, nous remarquons que la densité de photocourant augmente quand le champ magnétique augmente. Ce résultat découle de la notion que le champ magnétique dévie les porteurs.

Nous voyons que pour de très faibles valeurs de Sf, le champ magnétique a une très faible influence sur la densité du photocourant et que cette influence se fait sentir de plus en plus pour des valeurs de Sf élevées.

#### **II.7/ Phototension**

La phototension de la photopile est donnée par la relation de Boltzmann [II.14]:

$$V_{Ph}\left(S_{f}, T, B\right) = V_{T} \cdot \ln\left(\frac{N_{b}}{n^{2}i(T)} \cdot \delta(0, Sf, B, T) + 1\right)$$
(II.12)

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

$$V_T = \frac{K_b \cdot T}{q} \tag{II.13}$$

N_b est le taux de dopage,

n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaire de charge avec

$$n^{2}i(T) = A \cdot T^{3} \cdot \exp\left(\frac{E_{g}}{K_{b} \cdot T}\right)$$
(II.14)

 $E_g$  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  $E_g$ . $(E_g = 1,792.10^{-19} \text{ J})$ A est une constante. A = 3,87.10¹⁶ cm⁻³ K^{-3/2}[II.15]

Nous représentons le modèle simulink de la densité de photocourant sur la figure 34 suivante :



Figure 34 : Modèle simulink de la phototension

Le résultat de la simulation de la phototension est représenté sur la figure 35 suivante pour différentes valeurs de la température :



Figure 35 : Courbe de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la température avec  $B = 10^{-5} T$ 

On peut constater sur la figure 35 que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à jonction Sf, la phototension présente un petit palier pour différentes valeurs de la température. La valeur de ce palier correspond à la tension de circuit ouvert où on note une accumulation de porteurs de charges bloquées à la jonction.

Après ce palier la phototension décroît et tend vers une valeur quasi constante au fur et mesure que la vitesse de recombinaison augmente et tend vers l'infini.

Nous constatons que la phototension diminue nettement, quand la température augmente.

Sur la figure suivante est représentée la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique



Figure 36 : Courbe de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs du champ magnétique avec T=330K.

La phototension est maximale pour des faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction. A ce niveau, elle correspond à la phototension de circuit-ouvert. Cette phototension décroit quand la vitesse de recombinaison à la jonction croit et tend vers zéro au fur et à mesure que la vitesse de recombinaison tend vers l'infini. Nous remarquons que la densité de phototension augmente pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison en présence du champ magnétique et diminue pour de grandes valeurs de la vitesse de recombinaison en présence du champ magnétique.

#### II.8/ Caractéristique I-V

La caractéristique photo courant-phototension est déterminée à partir des expressions du photocourant et de la phototension pour un éclairement par la face avant. L'étude de la caractéristique courant-tension de la photopile relève d'une importance car plusieurs paramètres électriques tels que les résistances série et shunt, le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, la puissance maximale, le facteur de remplissage peuvent être déduit.



Figure 37 : Caractéristique I-V pour différentes valeurs de la température avec  $B = 10^{-5} T$ 

La figure 37 présente la caractéristique photocourant-phototension pour différentes valeurs de la température. On voit que le photocourant de court-circuit augmente légèrement quand la température augmente et que la phototension diminue quand la température augmente.

Le photocourant  $(J_{ph})$  d'une cellule solaire augmente généralement légèrement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est due à la décroissance de la largeur de la bande interdite (Eg) du matériau semi-conducteur ce qui permet d'utiliser un peu plus de photons de basse énergie.

Tandis que pour la phototension on peut voir que l'augmentation de la température mène à une diminution de  $V_{co}$ .

Donc ce qui signifie qu'une élévation de la température entraine une légère augmentation de la création de paires électron-trou.

#### II.9/ Résistance shunt

On peut traduire la résistance shunt par les courants de fuite au sein d'une photopile. On se place en situation de court-circuit de la caractéristique I-V et à ce niveau, les imperfections qui ont poussé à ne pas avoir une courbe presque horizontale peuvent être comparées à une résistance shunt (Rsh). Ainsi la photopile est comparable à un générateur de courant idéal qui débite un courant Jphcc en parallèle avec une résistance Rsh [II.17].



Figure 38 : Modèle électrique équivalent

$$R_{Sh}(S_f, T, B) = \frac{V_{Ph}(S_f, T, B)}{J_{cc}(S_f, T, B) - J_{Ph}(S_f, T, B)}$$
(II.16)

Nous représentons le modèle simulink de la résistance shunt sur la figure :



Figure 39 : Modèle simulink de la résistance shunt

Sur la figure suivante, nous représentons la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction :



Figure 40 : Courbe de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température

Nous remarquons que pour les petites valeurs qui appartiennent au domaine de validité de notre model, la résistance shunt varie peu et augmente rapidement lorsque la vitesse de recombinaison atteint 10⁴ cm/s. La résistance shunt croît linéairement avec la vitesse de recombinaison à la jonction pour tendre vers le maximum. Nous noterons un court-circuit de la photopile si la résistance shunt est petite et en particulier tend vers zéro. C'est pourquoi, celle-ci doit être suffisamment grande. Pour s'en passer à cette situation pour ce qui est de notre modèle, la valeur de la résistance shunt doit être grande.

Mais ceci posera un problème d'applicabilité pour cette technique. Elle n'est valable que pour des vitesses de recombinaison à la jonction élevées correspondant à de grandes résistances shunt.

La température diminue la résistance shunt. En effet, la température diminue les courants de fuites au sein de la photopile. Ceci a pour conséquence une diminution de la résistance shunt.

#### II.10/ Résistance série :

Les sources dissipatrices de l'énergie photoélectrique sont en général les contacts métalliques c'est-à-dire les grilles de collecte du photocourant et en particulier leurs interfaces avec le semi-conducteur.

Ces sources dissipatrices d'énergie sont caractérisées par une résistance que l'on appelle résistance série de la photopile. Donc les pertes résistives au sein de la photopile liée à la structure du matériau et à la métallisation sont représentées par la résistance série.

Sous l'éffet de la vitesse de recombinaison à la jonction, l'augmentation de la résistance série entraine une diminution de la tension de charge. Ceci est lié à une intensification des recombinaisons dans le matériau silicium. La résistance série de la photopile est déterminé lorsqu'on est en situation de circuit ouvert de la caractéristique I-V où on a une droite oblique, or pour un générateur de tension idéale la droite devait être verticale. Ce défaut est symbolisé par la résistance série. Par conséquent pour sa détermination, on adopte un schéma électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne au voisinage du circuit ouvert et est représenté par la figure 41 [II.18]



Figure 41 : Modèle électrique équivalent

$$R_{S}(S_{f},T,B) = \frac{V_{co}(S_{f},T,B) - V_{Ph}(S_{f},T,B)}{J_{Ph}(S_{f},T,B)}$$
(II.17)

Nous représentons le modèle simulink de la résistance série sur la figure suivante :



Figure 42 : Modèle simulink de la résistance série

La figure suivante représente la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction.



Figure 43 : Courbe de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la température

Nous remarquons que pour des valeurs faibles de la vitesse de recombinaison (Sf  $<10^2$  cm/s), la résistance série est constante et faible. Par contre, elle croît exponentiellement avec la vitesse de recombinaison à la jonction. L'augmentation de la résistance série aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction est quelque chose qui n'est pas propice pour la photopile. Pour s''en passer à cette situation pour ce qui est de notre modèle, la valeur de la résistance série doit être faible.

Mais ceci posera un problème d'applicabilité pour cette technique. Elle n'est valable que pour des vitesses de recombinaison à la jonction faibles correspondant à de faibles résistances série provoquant ainsi des chutes de tension faibles.

Lorsque la température augmente la résistance série augmente car les porteurs de charge sont accélérés vers jonction par la température augmentant ainsi les chutes de tension.

### II.11/ Capacité

En utilisant l'expression de la phototension, la capacité de la photopile est exprimée sous la forme [II.19.20].

$$C(S_f, T, B) = \frac{dQ(S_f, T, B)}{dV(S_f, T, B)}$$
(II.18)

$$Q(S_f, T, B) = q \times \delta(x, S_f, T, B)\Big|_{x=0}$$
(II.19)

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

$$C(S_{f},T,B) = q \times \frac{n_{i}^{2}(T)}{V_{T}} + q \times \frac{\delta(x,S_{f},T,B)|_{x=0} + \sum_{i=1}^{3} K_{i}}{V_{T}}$$
(II.20)

$$C(S_f, T, B) = C_0(T) + C_d(S_f, T, B)$$
(II.21)

où

$$C_0(T) = q \times q \times \frac{n_i^2(T)}{V_T} \tag{II.22}$$

$$C_d\left(S_f, T, B\right) = q \times \frac{\delta\left(x, S_f, T, B\right)\Big|_{x=0} + \sum_{i=1}^{3} K_i}{V_T}$$
(II.23)

C₀(T) est la capacité de la photopile lorsqu'élle est en court-circuit

 $C_d(Sf, B, T)$  est la capacité de diffusion de la photopile à la température T, et du champ magnétique, en un point de fonctionnement donné par Sf. Nous modélisons la capacité sur la figure suivante :



Figure 44 : Modèle simulink de la capacité



Figure 45 : Courbe de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température et pour  $B = 10^{-5} T$ 

La courbe de capacité est décroissante et présente deux paliers :

Le premier palier correspond aux valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf inférieure à 2.10²cm.s⁻¹, la capacité est maximale et constante. A ce stade nous nous disons que la photopile fonctionne en circuit-ouvert. Les porteurs de charge minoritaires sont stockés à la jonction car l'épaisseur du condensateur plan associé est faible.

Thèse de Doctorat Unique en Physique présentée par M. Babou DIONE Année 2016-2017

Le deuxième palier correspond aux valeurs de la vitesse de recombinaison jonction supérieure à 4.10⁴ cm.s⁻¹, la capacité devient minimale et constante aussi. A ce niveau nous disons que la photopile fonctionne en court-circuit. Là les porteurs de charge minoritaires pourront traverser car il y'a élargissement de l'épaisseur du condensateur plan.

Pour les vitesses de recombinaisons à la jonction,  $2.10^2$  cm.s⁻¹ < Sf <  $4.10^4$  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 se fait ressentir plus en fonctionnement de circuit ouvert. En ce point de fonctionnement, la capacité peut être associée à un condensateur à large épaisseur qui dépend de la température.

La figure suivante représente la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs du champ magnétique.



Figure 46 : Courbe de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température et pour T=300K

Lorsque nous sommes en fonctionnement de circuit ouvert, nous remarquons que la capacité est maximale pour les différentes valeurs du champ magnétique. Ceci est traduit par le fait qu'en circuit ouvert, les porteurs sont stockés au niveau de la jonction.

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

Nous observons que la capacité augmente quand le champ magnétique augmente car le champ magnétique favorise la déviation des porteurs qui ne pourront pas traversés la jonction.

L''effet du champ magnétique sur la capacité se fait ressentir plus en fonctionnement de circuit ouvert. En ce point de fonctionnement, la capacité peut être associée à un condensateur à large épaisseur qui dépend du champ magnétique.

#### II.12/ Puissance

La puissance de la cellule solaire est donnée par l'expression suivante [II.21,22]:

$$P(S_f, T, B) = \left| J_{Ph}(S_f, T, B) - J_d(S_f, T, B) \right| \times V_{Ph}(S_f, T, B)$$
(II.24)

Le courant de diode est donné par la relation suivante [II.23,24] :

$$J_d(S_f, T, B) = q \cdot S_{f0} \cdot \delta(x, S_f, T, B) \Big|_{x=0}$$
(II.25)

J_d qui représente le courant de diode sera modélisé sur la figure suivante 44.

Sf₀ vitesse de recombinaison intrinsèque

q la charge élémentaire de l'électron



Figure 47 : Modélisation du courant de diode


Figure 48 : Modèle simulink de la puissance



Figure 49 : Courbe de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la température avec  $B = 10^{-5} T$ 

Nous observons ici pour des faibles vitesses de recombinaison à la jonction, le courant est faible on est au voisinage du circuit ouvert ce qui entraine une faible puissance de la photopile.

Cependant quand la vitesse de recombinaison à la jonction commence à croitre, le courant augmente progressivement, entrainant ainsi une augmentation de la puissance jusqu'à atteindre une valeur maximale. Lorsqu'on est au voisinage du court-circuit, la photo tension tend à s''annuler cela provoque simultanément une diminution de la puissance.

Également, comme peut être vu l'augmentation de la température entraine une diminution de la puissance maximale. Nous pouvons donc s'attendre à une diminution de la qualité de photopile avec l'élévation de la température.

Nous avons étudié sur la figure suivante le comportement de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison sous l'éffet du champ magnétique.



Figure 50 : Courbe de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique avec T=300K

Nous constatons que la puissance augmente avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison et atteint un maximum. Puis après ce maximum, elle commence à décroitre au fur et à mesure que la vitesse de recombinaison à la jonction Sf augmente. Nous constatons aussi que ces maximums diminuent quand le champ magnétique augmente. Nous pouvons dire que le champ magnétique influe sur le comportement de la photopile.

La figure 51 reproduit la variation de la puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la température :



Figure 51 : Courbe de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température avec  $B = 10^{-5} T$ 

La puissance électrique croît pour des tensions inférieures à 0.5 volts, avant d'atteindre son maximum et décroît ensuite vers zéro. Nous remarquons que la puissance diminue avec l'augmentation de la température. Ce qui a pour conséquence une diminution du rendement de la conversion photovoltaïque.

Le point de puissance maximal varie donc avec la température. On observe une augmentation du photocourant, notamment à cause de la diminution de la largeur de bande interdite. En même temps, on assiste à une augmentation notable du courant direct de diode, entraînant une diminution nette de la tension de circuit ouvert.

#### V/ Conclusion

L''objectif de ce travail était de modéliser et de simuler l''effet de la température et du champ magnétique sur les paramètres électriques d''une photopile au silicium sous éclairement polychromatique. Pour cela, nous avons étudié le comportement de la densité de photocourant sous différentes valeurs de la température et différentes valeurs du champ magnétique, celui de la densité du photocourant et de celle de la phototension. La puissance de la photopile aussi a été étudiée en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs

de la température et pour différentes valeurs du champ magnétique. La capacité de la photopile a été aussi mise en exergue pour différentes valeurs de la température et du champ magnétique.

Nous avons remarqué que la température influence sur les paramètres électriques en augmentant légèrement le courant de court-circuit et en diminuant nettement la tension de circuit-ouvert. Donc nous pouvons dire que l'accroissement de la température entraine une légère augmentation de la création de paires électron-trou au niveau de la photopile.

Le champ magnétique est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires car les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles à celui-ci.

# Chapitre III : Simulation sous matlab d'une photopile au silicium sous éclairement monochromatique en régime dynamique fréquentiel : Effet de la température, du coefficient de dommage et de l'énergie d'irradiation.

#### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, il sera question d'une étude d'une photopile au silicium sous éclaire monochromatique en régime dynamique fréquentiel. Ainsi nous allons faire une simulation sur la densité des porteurs, celle du photocourant et de la phototension pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation et de la température. Nous allons aussi étudier la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de ces paramètres.

Ensuite, nous verrons l''évolution de l'impédance en fonction de la pulsation pour différentes valeurs de l''énergie d'irradiation. Il sera aussi question de voir comment la température et l''énergie d'irradiation influent-elles sur ces grandeurs ? Nous nous sommes basés d'un modèle mathématique qui est une équation de continuité de la densité des porteurs pour pouvoir simuler les différents paramètres de la photopile sous différentes conditions expérimentales telles que la température, l''énergie d'irradiation la fréquence et le coefficient de dommage.

#### III.2 La densité des porteurs minoritaires en excès.

Le fonctionnement d'une photopile est directement lié aux phénomènes de déplacement des porteurs minoritaires de charge photo générés en excès dans la base.

C'ést pour cela que nous utilisons l'équation de continuité qui régit ces porteurs selon le mode de l'éclairement [1,2]:

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

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 [3] donné par :

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

L'équation (1) a pour solution générale :

$$\delta(x,\omega,kl,\phi_p,T) = A(x,\omega,kl,\phi_p,T) \cdot \cosh\left(\frac{x}{L(\omega,kl,\phi_p,T)}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{x}{L(\omega,kl,\phi_p,T)}\right) + \sum K_i \cdot \exp(-b_i \cdot x)$$
(III.3)

Les expressions de A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes [4,5,6]:

i) A la jonction 
$$(x = 0)$$
  
$$\frac{\partial \delta(x, \omega, kl, \phi_p, T)}{\partial x}\Big|_{x=0} = \frac{S_f}{D(T)} \cdot \delta(x, \omega, kl, \phi_p, T)\Big|_{x=0}$$
(III.4)

ii) A l''arrière (x = H)  

$$\frac{\partial \delta(x, \omega, kl, \phi_p, T)}{\partial x} \bigg|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(T)} \cdot \delta(x, \omega, kl, \phi_p, T) \bigg|_{x=H}$$
(III.5)

#### III.3 Modèle simulink du coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion D* est un paramètre très important dans la caractérisation du matériau semi-conducteur [6].

Ce coefficient qui décrit le caractère diffusif des porteurs minoritaires dans le matériau, est représenté en fonction de la fréquence de modulation et de l'intensité du champ magnétique.

$$D(T) = \mu(T) \cdot \frac{K_b \cdot T}{q}$$
(III.6)

$$L_0(T) = \sqrt{D(T).\tau} \tag{III.7}$$

La longueur de diffusion en fonction de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage est donnée par l'équation 3 suivante [6] :

$$L(kl, \phi_p, T) = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{L_0(T)^2} + kl.\phi_p}}$$
(III.8)

A partir de l'équation 3, nous donnons l'expression du coefficient de diffusion dépendant de la température, de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage dans l'équation 4 suivante [7,8]:

$$D^*(kl,\phi_p,T) = \frac{L(kl,\phi_p,T)^2}{\tau}$$
(III.9)



Figure 52 : Modèle simulink du coefficient de diffusion

#### III.4 Modèle simulink de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb

La vitesse de recombinaison à la face arrière représente la zone où le gradient de photocourant est égale à zéro sur la courbe de variation de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf [9,10,11]. Ceci nous permet d'écrire : $\frac{\partial J_{Ph}}{Sf} = 0$  et de donner l'expression de la vitesse de recombinaison à la face arrière.

$$Sb(\omega, kl, \phi_p, T) = \frac{D(\omega, kl, \phi_p, T)}{L(\omega, kl, \phi_p, T)} \cdot \frac{\sinh\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi_p, T)}\right) - \alpha_t \cdot L(\omega, kl, \phi_p, T) \cdot (\cosh\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi_p, T)}\right) - \exp(-H, \alpha_t)}{\alpha_t \cdot L(\omega, kl, \phi_p, T) \cdot \sinh\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi_p, T)}\right) - (\cosh\left(\frac{H}{L(\omega, kl, \phi_p, T)}\right) + \exp(-H, \alpha_t)}$$
(III.11)

Le modèle simulink de la vitesse de recombinaison à la face arrière est donné à la figure suivante :



Figure 53 : Modèle simulink de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb

Nous représentons la courbe de la vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de la fréquence sur la figure 54 :



Figure 54 : Courbe de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb en fonction de la fréquence pour différentes températures avec  $kl = 5cm^2 / s$  et  $\phi_p = 100 Mev$ 

Nous remarquons sur cette figure que la vitesse de recombinaison à la face arrière reste constante pour des pulsations inférieures à  $10^5$  rad/s et au-delà il y"a une augmentation lorsque la pulsation augmente. L"augmentation de la pulsation traduit en fait l"augmentation des fuites à la face arrière au sien de la photopile. Et par définition, la vitesse de recombinaison à la face arrière caractérise les pertes d"une photopile à ce niveau. Donc quand la pulsation augmente, la vitesse de recombinaison à la face arrière augmente elle aussi.

Nous remarquons aussi que l'augmentation de la température diminue la vitesse de recombinaison à la face arrière.

Ceci s''explique que quand la température augmente, les pertes diminuent et donc la vitesse de recombinaison à la face arrière diminue.

La figure ci-dessous représente la courbe de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation.



Figure 55 : Courbe de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb en fonction de la fréquence pour différentes températures avec  $kl = 5cm^2 / s$  et T=300K

Sur cette figure remarquons que la vitesse de recombinaison à la face arrière est faible pour des fréquences égalent à  $10^5$  rad/s. Cette vitesse augmente pour des fréquences supérieures à  $10^5$  rad/s. Nous observons aussi qu'une augmentation de l'énergie d'irradiation entraine une diminution de la vitesse de recombinaison à la face arrière.

Effectivement, l''augmentation de l''énergie d''irradiation entraine une augmentation des fuites au sein de la photopile ; comme la vitesse de recombinaison en face arrière caractérise les pertes en face arrière de la photopile, alors cette vitesse va augmenter avec l''augmentation de l''énergie d''irradiation.

#### III.5 Modèle simulink de la densité des porteurs.

Nous modélisons ici la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base. Partant des équations (4) et (5) nous avons déterminés les coefficients A et B, et nous allons modéliser chaque coefficient pour pouvoir modéliser la densité des porteurs minoritaires.





Figure 56 : Modèle simulink du coefficient A





Thèse de Doctorat Unique en Physique présentée par M. Babou DIONE Année 2016-2017

Le modèle simulink de la densité des porteurs minoritaires en excès est modélisé comme suit sur la figure suivante :



Figure 58 : Modèle simulink de la densité des porteurs minoritaires

# II.5.1/ La densité des porteurs minoritaires en excès en circuit-ouvert

La courbe de la densité des porteurs minoritaires en excès en circuit-ouvert est reproduit sur la figure suivante :



Figure 59 : Courbe de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la température avec  $kl = 10 cm^2 / s$ ,  $\phi_p = 100 Mev$ ,

$$S_f = 3 \times 10^3 \, cm/s$$

Nous observons que toutes les courbes présentent des pentes négatives. Sur la face avant d'une photopile fonctionnant en situation de circuit-ouvert, le maximum de porteurs se trouve au voisinage de la jonction. Cette décroissance des porteurs se poursuit jusque dans la profondeur de la base. Cette baisse peut être à l'origine d'une augmentation des recombinaisons en volume ou une baisse de photogénération.

La température a un effet abaisseur sur la densité des porteurs en circuit-ouvert et de même qu''en court-circuit.

La figure suivante représente la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation.



Figure 60 : Courbe de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation avec  $kl = 10 cm^2 / s$ , T=300 K,

 $S_f = 3 \times 10^3 \, cm/s$ 

La photopile fonctionne en circuit ouvert et présente des maximas qui diminuent en profondeur dans la base. Dans ce mode de fonctionnement, le gradient des porteurs à la jonction est nul. Les porteurs minoritaires créés ne traversent pas la jonction. Nous pouvons constater que la densité de porteurs diminue avec l'augmentation de l'énergie d'irradiation ; en effet, lorsque l'énergie d'irradiation augmente, les dégradations causées sont plus importantes pour un même coefficient de dommage.

# III.5.2/ Densité des porteurs minoritaires en excès en court-circuit

La figure suivante représente la densité des porteurs minoritaires en excès en court-circuit





$$S_f = 6 \times 10^6 \, cm \, s$$

La figure 61 montre que la densité des porteurs présente trois régions :

- Une première région proche de la jonction où le gradient des porteurs est positif. Les porteurs situés dans cette' région peuvent donc traverser la jonction et participer à la production du courant.
- Une deuxième région où le gradient des porteurs est nul.
- Une troisième région où le gradient des porteurs est négatif. Les porteurs qui se trouvent dans cette région ne participent pas à la production du courant. Ils se recombinent en volume ou en face arrière.

Il faut aussi remarquer que le maximum de la densité des porteurs augmente lorsque la température augmente et se déplace vers la jonction. Cela se traduit par un élargissement de la zone de charge d'espace. En effet, le maximum de la courbe de densité des porteurs définit un

gradient nul. Les porteurs générés dans la première région peuvent traverser la jonction. Par contre, pour les porteurs générés dans la troisième région, le gradient est négatif ces derniers ne peuvent pas traverser la jonction. Pour la photopile, ces porteurs semblent donc être en position de circuit ouvert. Tout se passe comme si la base de la photopile se réduisait d'une quantité équivalente à la distance entre la jonction émetteur/base et le maximum de la courbe de densité des porteurs, d'où un phénomène qui ressemble à un élargissement de la zone de charge d'espace.



Figure 62 : Courbe de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de l''énergie d''irradiation avec,  $kl = 10 cm^2 / s$  T=300 K,

$$S_f = 6 \times 10^6 cm/s$$

La figure 62 est similaire à la figure précédente. Nous observons que pour une énergie d'irradiation donnée, la densité des porteurs augmente avec la profondeur x de la jonction jusqu''à une valeur maximale située à la face arrière de la base. Dans cette zone de la base, le gradient des porteurs étant positif, alors les porteurs minoritaires situés dans cette région peuvent traverser la jonction et générer un photocourant. Le maximum de densité correspond à un gradient des porteurs nul (il n'y a donc pas de passage d'électron). Ce maximum est situé à la face arrière de la base.

En plus le maximum de la densité des porteurs croit avec l'énergie d'irradiation.

Nous remarquons que la densité des porteurs minoritaires augmente quand l'énergie d'irradiation augmente.

#### III.6/ Densité de photocourant

L'expression du photocourant est donnée par l'expression suivante [12] :

$$J_{ph} = q \times D \times \frac{\partial \delta(x, \omega, kl, \phi_p, T)}{\partial x}|_{x=0}$$
(III.12)



Figure 63 : Modèle simulink de la densité de photocourant

La courbe de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction est donnée sur la figure ci-dessous :



Figure 64 : Courbe du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison Sf,

$$kl = 10 cm^2 / s$$
,  $\phi_p = 100 Mev$ 

La figure ci-dessus montre que le photocourant est une fonction croissante de la vitesse de recombinaison à la jonction. Elle se subdivise en trois parties que sont :

- la première correspond aux valeurs relativement faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf, la photopile fonctionne en circuit ouvert. De ce fait, les électrons de la base sont bloqués à la jonction. Puisque le photocourant dépend de la circulation des électrons ; par conséquent le photocourant doit présenter une valeur quasi faible comme l''illustrent la figure ci-dessus.
- la deuxième correspond à des valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction supérieures à 10² cm/s. La photopile présente un point de fonctionnement intermédiaire entre le circuit –ouvert et le court-circuit. Dans ce cas, une partie des porteurs minoritaires de la base est bloquée à la jonction et l'autre partie passe à l'émetteur.
- et la troisième partie correspond aux valeurs de la vitesse de recombinaison supérieure à 10⁵ cm/s, ce qui veut dire que la photopile fonctionne en court-circuit. La majorité des électrons traversent la jonction pour passer à l'émetteur ; par conséquent le photocourant présente une valeur maximale presque constante.

# III.7 Densité de la phototension

L'expression de la densité de la phototension est donnée par l'équation suivante [13] :

$$V_{\rm ph}\left(S_{\rm f},\,\omega,\,kl,\,\phi_p,\,T\right) = V_{\rm T}\ln\left(\frac{N_{\rm b}}{(n_{\rm i}^2)}\delta\left(0,S_{\rm f},\,\omega,\,kl,\,\phi_p,\,T\right)\right) + 1\right) \tag{III.13}$$

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

$$V_{\rm T} = \frac{k_{\rm b}}{q} \, {\rm T} \tag{III.14}$$

N_b est le taux de dopage et n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaire de charge



Figure 65 : Modèle simulink de la densité de phototension



Figure 66 : Courbe de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison Sf,  $kl = 10 cm^2 / s$ ,  $\phi_p = 100 Mev$ 

Le module de la phototension diminue en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension est égale à la tension de circuit ouvert de la photopile puis lorsque les valeurs de vitesse augmentent, la phototension tend vers la tension de court-circuit.

L'application de la température diminue l'amplitude de la phototension de la photopile. On note que la diminution de l'amplitude de la phototension de circuit ouvert est due à la forte recombinaison des porteurs minoritaires.

# III.8 Impédance Z

L''impédance est donnée par l''expression [14]



Figure 67 : Modèle simulink de l'impédance

La figure suivante nous montre le diagramme de bode du module de l'impédance en fonction de la pulsation pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation en fonction de la pulsaton.



Figure 68 : Courbe du module de l'impédance en fonction de log (w) pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation  $kl = 10 cm^2 / s$ , T=300K

Nous distinguons trois zones pour le diagramme de bode de l'impédance qui représente la courbe du logarithme d'impédance en fonction de la fréquence :

- la première zone où la fréquence est inférieure à 10⁵ Hz où le module de l'impédance est constante
- la deuxième zone où la fréquence est comprise entre 10⁵ Hz et 10⁶ Hz, nous observons que le module de l'impédance diminue.

Et la troisième zone où la fréquence est supérieure à  $10^6$  Hz où le module de l''impédance est supérieur à  $10^6$  Hz augmente.

L'application de l'énergie d'irradiation entraine une augmentation de l'émplitude du module de l'émpédance. Cet effet nous montre qu'éau voisinage de la résonance l'émpédance diminue car les effets capacitifs y apparaissent puis on note une augmentation de l'émpédance pour montrer l'éffet inductif.

Nous pouvons dire qu'au voisinage des résonances c'est-à-dire pour des fréquences inférieures ou égales aux fréquences de résonances, la diffusion des porteurs minoritaires s''effectue de façon considérable et cela a comme corollaire une diminution de l''impédance.

La figure ci-dessous nous donne le diagramme de nyquist de l'impédance.



Figure 69 : Courbe de la partie imaginaire de Z en fonction de sa partie réelle pour,  $kl = 10 cm^2 / s$ ,  $\phi_p = 100 Mev$  et T=300K

La courbe ci-dessus qui est le diagramme de nyquist de l''impédance c'est-à-dire sa partie imaginaire en fonction de sa partie réelle est un demi-cercle. Ceci nous confirme ce qu''on avait avec le diagramme de bode car nous sommes en présence des deux effets : effet capacitif comme effet inductif.

La courbe montre la partie imaginaire en fonction de la partie réelle augmente. Donc les effets inductifs l'emportent sur les effets capacitifs.

# III.9 La phase de l'impédance

La tangente de l''angle entre la partie imaginaire et la partie réelle de l''impédance est donnée par l''équation suivante :

$$\tan \varphi = \frac{\mathrm{Im}(Z)}{\mathrm{Re}(Z)}$$
(III.18)

ce qui entraine que de la phase est donnée par le rapport de la partie imaginaire sur sa partie réelle [15].

$$\varphi = \tan^{-1} \cdot \left(\frac{\operatorname{Im}(Z)}{\operatorname{Re}(Z)}\right) \times \frac{180}{\pi}$$
 (III.19)



Figure 70 : Modèle simulink de la phase de l'impédance Z

La figure suivante représente la phase de l'impédance en fonction de la pulsation :



Figure 71 : Courbe de la phase de l'impédance en fonction de la pulsation  $kl = 10 cm^2 / s$ , T=300K

La figure 71 nous montre que pour des fréquences comprises dans l'intervalle  $0 < \omega < \omega_c$ , le module de l'impédance est indépendant de la fréquence. Et pour les valeurs de la pulsation telle que  $\omega > \omega_c$  le module de l'impédance croît avec la pulsation.

Le module de la pulsation croît aussi avec l'augmentation de l'énergie d'irradiation. Ainsi l'intersection des prolongements de chacune des deux parties linéaires de la courbe permet d'obtenir la fréquence angulaire de coupure  $\omega_c$ .

Nous pouvons aussi dire que l'éffet de l'énergie d'irradiation se fait sentir plus quand la pulsation dépasse la fréquence de coupure.

#### **III.10** Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une simulation de la photopile au silicium sous éclairement monochromatique et sous l'effet de la fréquence, de l'énergie d'irradiation, du coefficient de dommage et de la température. La densité des porteurs minoritaires en excès a été modélisée et simulée en fonctionnement de court-circuit comme en fonctionnement de circuit-ouvert. Nous pouvons retenir que l'énergie d'irradiation augmente la dégradation de la photopile plus elle est grande plus la performance de la photopile diminue. Plus aussi la fréquence augmente plus les fluctuations des électrons au sien de la photopile augmente.

# Chapitre IV : Dispositif expérimental pour l'acquisition de la caractéristique I-V et de la température d'une photopile en silicium

# **IV.1/Introduction**

La demande en énergie s''est considérable accrue durant ces dernières décennies. En plus donc de la source mère qui est issue de l'énergie fossile, d'autres sources d'énergies se sont développées : il s'agit des énergies renouvelables. Parmi celles-ci on peut citer l'énergie éolienne, les énergies océaniques, le solaire photovoltaïque etc [IV.1,2].

Cette dernière est une source d'énergie puissante qui est produite par la cellule solaire [IV.3]. C''est ainsi, pour faire face à cette concurrence, satisfaire la demande en énergie, et avoir un bon fonctionnement de la cellule solaire avec un rendement meilleur, [IV.4,5] des recherches ont été menés sur la conception des cellules photovoltaïque. Le fonctionnement de la photopile est aussi dépendant des paramètres naturels tels que la température [IV.6].

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'acquisition de la caractéristique I-V et de la température d'une photopile en silicium.

Dans un premier temps, nous avons menés une étude théorique sur la variation automatique de la charge résistive de la cellule solaire.

Dans un second temps, l'étude s'est portée sur la partie expérimentale. Dans cette partie est étudiée l'acquisition de la caractéristique I-V et de la température à l'aide d'un microcontrôleur [IV.7] qui exécute un code de programme langage C [IV.8,9].

# IV.2/ Etude théorique

#### IV.2.1/ Dispositif expérimental de la variation résistive de la cellule solaire.

Une des caractéristiques statiques d'une photopile peut être schématisée comme suit :



Figure 72 : Schéma de base pour la caractérisation de la photopile

Nous avons conçu un dispositif qui reprend cette caractérisation dont le programme exécuté par le microcontrôleur est constitué par un programme correspondant à un régime statique et un régime dynamique.

# IV.2.2/ Dispositif expérimental de la variation résistive de la cellule solaire.

Un dispositif constitué d'un ensemble de résistances en parallèle est mis en place. La commande à distance de la valeur d'une résistance électrique équivalente s'effectuera grâce à l'électronique numérique [IV.10,11], voici un schéma d'exemple.





Les n résistances mises en jeu peuvent participer à l'association parallèle pour le calcul de la résistance numérique. Cette association se fait selon que le transistor Ti considéré ici comme un interrupteur se fermera ou s''ouvrira.

 $T_i$  est considéré comme étant un nombre binaire qui prendra deux valeurs selon son état : un zéro logique (0) si le  $R_i$  correspondant ne fait pas partie de l'association parallèle ou un logique (1) si le  $R_i$  correspondant fait partie de l'association parallèle. Nous avons donc une résistance équivalente qui est donnée par :

$$\frac{1}{R_{\acute{e}q}} = \sum_{i=0}^{9} T_i \times \frac{1}{R_i}$$
(IV.1)

Remarque : cette résistance équivalente est une fonction numérique exprimée en fonction des T_i [IV.12]

$$R_{\acute{eq}} = f(T_0, T_1, T_2, \dots, T_9)$$
 (IV.2)

Cette fonction numérique a un nombre N dénombrable de valeurs définies. La relation suivante exprime N en fonction de n [IV.13] et est donnée :

$$N = 2^n \tag{IV.3}$$

Par conséquent, avec notre solution l'utilisation de n interrupteurs électroniques permettra d'obtenir  $2^n$  points de fonctionnements distincts.

Par exemple, avec 10 résistances nous avons 1024 valeurs possibles pour la résistance de charge de la photopile ; ceci correspond également à 1024 mesures du couple courant-tension de la photopile.

Nous avons choisi comme interrupteurs des transistors et voici le schéma de principe pour la caractérisation.



Figure 74 : Schéma de principe pour la caractérisation automatique de la photopile

La résistance équivalente est obtenue par les signaux binaires donnés par la séquence et qui est appliqué aux transistors.

#### IV.3/ La loi de commande de la résistance à commande numérique.

La loi de la commande numérique fonctionne à l'aide de signaux binaires. Donc pour notre exemple :

$$B = T_9, T_8, T_7, T_6, T_5, T_4, T_3, T_2, T_1, T_0$$
(IV.4)

$$(D)_{10} = (B)_2$$
 (IV.5)

$$D = T_9 \times 2^9 + T_8 \times 2^8 + T_7 \times 2^7 + T_6 \times 2^6 + T_5 \times 2^5 + T_4 \times 2^4 + T_3 \times 2^3 + T_2 \times 2^2 + T_1 \times 2^1 + T_0 \times 2^0$$
(IV.6)

Ce qui fera que D prendra 1023 valeurs.

Comme D est une fonction de T et Réq aussi, donc on peut exprimer Réq en fonction de D. Ce qui nous permettra d'écrire :

$$\frac{1}{R_{\acute{eq}}} = \frac{T_9 \times 2^9}{R_9 \times 2^9} + \frac{T_8 \times 2^8}{R_8 \times 2^8} + \frac{T_7 \times 2^7}{R_7 \times 2^7} + \frac{T_6 \times 2^6}{R_6 \times 2^6} + \frac{T_5 \times 2^5}{R_5 \times 2^5} + \frac{T_4 \times 2^4}{R_4 \times 2^4} + \frac{T_3 \times 2^3}{R_3 \times 2^3} + \frac{T_2 \times 2^2}{R_2 \times 2^2} + \frac{T_1 \times 2^1}{R_1 \times 2^1} + \frac{T_0 \times 2^0}{R_0 \times 2^0}$$
(IV.7)

En posant

$$R_i \times 2^i = R_0 \times 2^0 = R_0 \forall i \tag{IV.8}$$

Nous obtenons

$$\frac{1}{R_{\acute{eq}}} = \frac{1}{R_0} \times \left( T_9 \times 2^9 + T_8 \times 2^8 + T_7 \times 2^7 + T_6 \times 2^6 + T_5 \times 2^5 + T_4 \times 2^4 + T_3 \times 2^3 + T_2 \times 2^2 + T_1 \times 2^1 + T_0 \times 2^0 \right)$$
(IV.9)

Ce qui entraine que  $\frac{1}{R_{\acute{e}q}} = \frac{D}{R_0}$  (IV.10)

Nous avons donc la loi de commande numérique reliant la grandeur qui doit être réglée à la grandeur qui sert de réglage.

Le choix de la valeur d'une résistance est arbitraire mais on a tenu compte aussi des valeurs commerciales normalisées des résistances et la relation de récurrence va nous servir de calculer les autres résistances restantes [IV.4]. La relation de récurrence est donnée par cette formule :

$$\frac{R_i}{R_{i+1}} = \frac{R_0}{2^i} \times \frac{2^{i+1}}{R_0}$$
(IV.11)

d'où donc nous aurons  $R_i = 2 \times R_{i+1}$  (IV.12)

Dans ce travail nous avons utilisé un dispositif à 10 résistances pour une photopile de 0,5A en court-circuit. Nous avons choisi 10  $\Omega$  pour la résistance la plus faible qui est  $R_9$ .

<i>R</i> 9	R ₈	<i>R</i> ₇	<i>R</i> ₆	$R_5$	$R_4$	<i>R</i> ₃	<i>R</i> ₂	<i>R</i> ₁	$R_0$
10 Ω	20 Ω	40 Ω	80 Ω	160 Ω	320 Ω	640 Ω	1280 Ω	2560 Ω	5120 Ω

#### IV.4/ Acquisition de la température

Le capteur LM35 est un capteur de température où la tension de sortie est linéairement proportionnelle à la température en Celsius centigrade. Ce capteur ne nécessite pas de calibrage externe pour fournir une précision de  $\pm 0.5$  °C sur une gamme de température de 55 °C à +150 °C. Son coefficient est de 10mV/°C et dans notre cas le capteur est alimenté en 0-5V, on ne peut mesurer par conséquent que des températures positives voire figure suivante :



Figure 75 : Schéma du capteur de température

Son équation caractéristique est donnée par l'équation suivante :

$$V_{cap} = 10mV \times T \tag{IV.13}$$

Le capteur est directement placé sur le panneau solaire.

En effet, d'après les fiches techniques que nous avons consulté, les fabricants proposent des panneaux solaires fonctionnant dans une gamme de température comprise entre  $-40^{\circ}$ c et 85°c. Ce qui fait que avec un panneau solaire ayant pour température maximale de fonctionnement Tmax = 85°c, nous aurons une tension

$$V_{cap} = 10mv \times 85 = 0,85V$$
 (IV.14)

Cette tension est faible par rapport à la tension dont le microcontrôleur utilise pour la conversion qui est comprise entre 0-5V. En plus de cela, la température est une grandeur analogique.

L''objectif est d'utiliser toute la plage de conversion du microcontrôleur pour avoir une meilleure précision, il va falloir utiliser un amplificateur.

L'amplificateur d'instrumentation INA122 est composé de deux AOP. Son gain est défini par une résistance externe Rg à rajouter entre les deux broches de signe négatif. Le gain est donné par la formule  $G=5+\frac{2000}{R_g}$ (IV.15)

Sans résistance le gain est de 5 ; avec une résistance externe de 2 k $\Omega$  le gain est de 105. Le schéma interne de l'INA122 est donné ci-après.

Cet amplificateur (INA 122P, 32Z58) est adapté aux panneaux solaires ayant des températures de fonctionnement comprises entre -40°c et 85°c voire figure :



Figure 76 : Schéma de l'amplificateur

Cet amplificateur nous permettra d'atteindre une tension avoisinant la tension de conversion du microcontrôleur en utilisant son équation caractéristique :

$$V_{S} = \left(5 + \frac{200 K}{R_{g}}\right) \times V_{e} \tag{IV.16}$$

Donc avec un panneau solaire ayant une température maximale de fonctionnement Tmax=85°c, nous aurons :

Ve=0,85V avec Ve=Vcap. Ce qui entraine qu'avec une tension de 5V nous aurons un gain :

Etant donné que la température une grandeur analogique et que le pic traite des données numériques il va falloir utiliser un convertisseur analogique numérique pour adopter le signal au pic

#### IV.5/ Le microcontroleur



Figure 77 : Schéma synoptique d'un Pic 16F877

L'utilisation du microcontrôleur PIC16F877 se justifie pour son calculateur assez complet avec des PORTS numériques réversibles, des Timers, des convertisseurs analogique/numérique...

Deux PORTs de sortie à 8 bits chacun du microprocesseur sont câblés aux résistances de base des transistors.

Un PORT d'entrée à 8bits

Un PORT d'entrée à 6bits pour la conversion analogique

Un PORT de sortie de 8bits est câblé aux décodeurs pour l'affichage 7segment.

 $\checkmark$ L''étude du régime statique, correspond à une fonction de comptage qui est programmée et appliquée au PORT pour faire passer la photopile d'un point de fonctionnement à l''autre ; et ceci de façon continu.

✓L''étude du régime dynamique transitoire, correspond quant à elle à un programme qui fait passer l''état du PORT en commutation entre deux valeurs  $D_1$  et  $D_2$  qui correspondent aux deux points de fonctionnement.

# IV.6/ Conversion analogique/numérique par le PIC 16F877A

Le convertisseur analogique numérique a une résolution de 10 bits. Il dispose de huit (8) entrées analogiques réparties sur deux (2) ports (PORTA et PORTE).

#### Fonctionnement du convertisseur.

La conversion se passe en 2 temps :

* 1^{er}temps le signal à convertir est appliqué sur l'entrée à convertir, ce signal doit être présent au moins pendant le temps Tacq (temps d'acquisition environ 20μS pour 5V).



Figure 78 : Câblage du Convertisseur Analogique Numérique

2ème temps : la conversion.

Le temps de conversion minimum est de 12 TAD (TAD c'est le temps de conversion dépendant de l''horloge interne, typiquement  $1,6\mu$ S).

Une conversion commence toujours par la mise à 1 du bit GO/DONE du registre ADCON0. Lorsque la conversion est terminée ce bit repasse à 0.

Donc pour pouvoir lire le résultat dans les registres ADRESL et ADRESH il suffit d'attendre que le bit GO/DONE passe à 0. [IV.7]

La valeur résultante N de la conversion ADRESH : ADRESL est égale à :

$$N = \frac{V_{in} - V_{\text{Re}f^-}}{V_{\text{Re}f^+} - V_{\text{Re}f^-}} \times 1023$$
 (IV.17)

Si 
$$V_{\text{Re}f^+} = V_{DD} = 5V$$
 et  $V_{\text{Re}f^-} = V_{SS} = 0V$  alors  
 $N = 1023 \times \frac{V_{in}}{5}$  (IV.18)

Mais avant de réaliser une conversion il faut définir la configuration du convertisseur :

- Le nombre d'éntrées analogiques.
- Le nombre d'éntrées logiques.
- Le type de tension de référence :
- Interne  $V_{\text{Re}f^+} = V_{DD}$  et  $V_{\text{Re}f^-} = V_{SS}$
- Externe, soit  $V_{\text{Re}f^+} = RA_3$  et  $V_{\text{Re}f^-} = RA_2$

Connaissant le gain G nous pouvons exprimer la température en fonction de N en remarquant que  $V_{IN} = V_S$  de l'amplificateur.

Donc nous aurons : 
$$N = 1023 \times \frac{G \times T}{5}$$
 (IV.19)

ce qui donne :

$$T = \frac{5 \times N}{1023 \times G} \tag{IV.20}$$

en remplaçant G par sa valeur nous trouvons  $T = \frac{5 \times N}{6015,24}$  (IV.21)

# IV.7/Algorithme pour la commande par le microcontrôleur PIC 16F877

Dans cette partie est élaboré un algorithme de base qui permet l'étude soit du régime statique soit du régime dynamique transitoire.

Le choix du régime à étudier se fait par un interrupteur à commande manuelle K.

La mise en marche du dispositif se fait par un bouton poussoir S.

La mise à l'arrêt du dispositif se fait par un bouton poussoir R qui est câblé à l'entrée d'initialisation du microprocesseur. Ainsi, l'arrêt du système n'est pas géré par le programme qui découle de l'algorithme.

Le temps de temporisation entre deux états consécutifs se fait par un bouton V.



Figure 79 : Schéma de principe du dispositif expérimental



### Le programme :

```
void main() {
unsigned short int T;
unsigned int N;
unsigned int Compteur;
TRISD=0;
TRISB=0;
TRISC.RC0=0;
TRISC.RC1=0;
TRISC.RC2=1;
TRISC.RC3=1;
TRISA=1;
ADCON1=0;
ADCON1.F7=1;
ADCON0.F6=0;
ADCON0.F7=1;
ADCON0.F0=1;
while (1)
{
while (PORTC.RC2==0);
if (PORTC.RC3==0)
{ PORTD=0; PORTC=0x01;
Delay(t3);
PORTC=0x02;
Delay(t3); }
else
{
ADCON0.F3=0;
ADCON0.F4=0;
ADCON0.F5=0;
Delay_us(20);
ADCON0.F2=1;
While (ADCON0.F2==1);
N=ADRESL+512*ADRESH.B1+256*ADRESH.B0;
```

```
T=0.084268716081*N;
If (T < 10) PORTB=T;
else if (T>=10&&T<20) {PORTB=T-10 ; PORTB.RB4=1 ;}
else if (T>=20&&T<30) {PORTB=T-20 ; PORTB.RB5=1 ;}
else if (T>=30&&T<40) {PORTB=T-30 ; PORTB.RB4=1 ; PORTB.RB5=1 ;}
else if (T>=40&&T<50) {PORTB=T-40 ; PORTB.RB6=1 ;}
else if (T>=50&&T<60) {PORTB=T-50 ; PORTB.RB4=1 ; PORTB.RB6=1 ;}
else if (T>=60&&T<70) {PORTB=T-60 ; PORTB.RB5=1 ; PORTB.RB6=1 ;}
else if (T>=70&&T<80) {PORTB=T-70 ; PORTB.RB5=1 ; PORTB.RB6=1 ;
PORTB.RB4=1;
else if (T>=80&&T<90) {PORTB=T-80 ; PORTB.RB7=1 ;}
else {PORTB=T-90 ; PORTB.RB4=1 ; PORTB.RB7=1 ;}
PORTD=0;
PORTC=0;
Compteur=0;
while (Compteur<1024)
{
if (PORTC.RC4==1)
Delay(t1);
else Delay(t2);
PORTD++;
if (PORTD==0) PORTC++;
Compteur++;
}
}
}
}
```

# IV.8/ Réalisation du dispositif expérimental

## IV.8.1/ Schémas de réalisation

Voici notre dispositif complet câblé :



Figure 80 : Circuit électronique du dispositif expérimental



Figure 81 : Circuit électronique du dispositif expérimental



Figure 82 : Typon de la carte électronique du dispositif expérimental



Figure 83 : Carte électronique du dispositif expérimental

## IV.8.2/ Présentation des résultats

Nos résultats sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope analogique. Le microprocesseur PIC 16F877A est utilisé pour la partie commande du dispositif expérimental automatique.

Durant toute la manipulation, nous avons calibré notre oscilloscope à 1V/div pour la tension et 0,2V/div pour le courant et avons utilisé une sonde de température pour mesurer la température ambiante. Voici des résultats pris pour différentes valeurs de la température ambiante.

Caractéristique I-V en régime statique sous éclairement polychromatique à 35°C sous une température ambiante de 33,1°C.

Caractéristique I-V en régime statique sous éclairement polychromatique à 38°C sous la température ambiante de 33,1°C.





éclairement polychromatique.

Figure 84 : Courbes I-V de la photopile pour Figure 85 : Courbes I-V de la photopile pour éclairement polychromatique.

Caractéristique I-V en régime statique sous éclairement polychromatique à 42°C sous une température ambiante de 34,8°C.

Caractéristique I-V en régime statique sous éclairement polychromatique à 45°C sous une température ambiante de 33,8°C.



Figure 86: Courbes I-V de la photopile pour éclairement polychromatique.

Figure 87 : Courbes I-V de la photopile pour éclairement polychromatique.

Voici un exemple ci-dessous pour le calcul du courant et de la tension. Tout au long de notre manipulation nous avons pris 1V/div pour la tension et 0,1V/div pour le courant.



## **IV.9/** Conclusion

Ce travail a été effectué au laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire (LASES) de la Faculté des Sciences et Techniques de Dakar.

Il nous a permis de concevoir et réaliser un dispositif expérimental automatique pour l'acquisition de la caractéristique I-V et de la température pour photopile au silicium.

Nous avons utilisé la notion de résistance équivalente à plusieurs résistances câblées en dérivation pour obtenir une résistance variable à commande numérique.

L'utilisation d'interrupteurs statiques de type transistor a permis de modifier le câblage des résistances de l'association à l'aide de signaux binaires électroniques.

Pour cela nous avons utilisé un microcontrôleur qui a exécuté un programme de langage C. Les résultats nous ont permis de déduire que la variation de la température a une influence sur la caractéristique I-V.

L'augmentation de la température mène à une augmentation du courant de court-circuit Icc et une diminution de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . Donc ce qui signifie qu'une élévation de la température entraine une légère augmentation de la création de paires électron-trou.

Enfin le travail nous a permis de se familiariser avec certains composants tels que le microprocesseur.

## **Conclusion générale**

Une étude de la photopile au silicium sous environnement matlab simulink pour différents régimes et sous différentes conditions expérimentations a été présentée.

Dans l'étude bibliographique, un rappel sur le principe de fonctionnement de la photopile et une présentation des différents types de photopiles ont été étudiés. Nous avons aussi étudié dans ce chapitre, les différentes méthodes de détermination des paramètres électriques et de recombinaisons, des expressions du coefficient de diffusion, du photocourant, de vitesse de recombinaison à la face arrière.

La simulation de la photopile au silicium sous éclairement polychromatique en régime statique et sous l'effet de la température et du champ magnétique a été menée. Les résultats ont montré que la température influence beaucoup sur les paramètres électriques. Par exemple nous avons constaté que la température diminuait la tension de circuit ouvert Vco et augmentait le courant de court-circuit Icc. Donc ce qui signifie qu'une élévation de la température entraine une légère augmentation de la création de paires électron-trou.

De même pour l''effet du champ magnétique qui est un paramètre néfaste sur la photopile. Car, nous avons vu que l''application du champ magnétique diminue l''amplitude du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert. Mais cette diminution est plus sensible qu''en circuit ouvert qu''en court-circuit. Ceci influe sur le point de fonctionnement maximum voire sur le rendement de la photopile.

Une simulation de la photopile au silicium sous éclairement monochromatique en régime dynamique fréquentiel a été élaborée sous l'éffet de la température, de la fréquence, du coefficient de dommage et de l'énergie d'irradiation. Pour la plupart des grandeurs étudiées, nous avons fait ressortir l'éffet de la température, de l'énergie d'irradiation et da la fréquence.

Il ressort que les dégradations causées dans la photopile dépendent aussi bien de la fréquence que de l''énergie d'irradiations. Pour la fréquence son effet est surtout étudié au niveau de l''impédance. Nous avons tracé le diagramme de bode et la phase en fonction de son logarithme.

Une étude expérimentale a terminé sur ce travail. Et dans ce chapitre, nous avons pu à l'aide d'un microcontrôleur acquérir de façon automatique la variation du point de fonctionnement et la caractéristique courant tension et la température.

Cette étude peut être poursuivie pour une photopile éclairée par la face arrière mais aussi simultanément en régime statique comme en régime dynamique fréquentiel. Cela peut aussi se poursuivre pour une photopile en régime transitoire et une photopile à jonction verticale.

### RESUME

Au cours de cette thèse, il a été question d'une étude de la photopile au silicium sous environnement matlab/simulink.

Le premier chapitre s'ést porté sur l'étude bibliographique. Ainsi, le rayonnement solaire, et le principe de conversion de la lumière ont été mis en exergue. Il a été aussi question d'aborder quelques articles tour au tour de notre thème.

Dans le deuxième chapitre, la simulation d'une photopile au silicium sous éclairement polychromatique et sous différentes valeurs du champ magnétique et de la température y a été consacrée. Le coefficient de diffusion, la vitesse de recombinaison à la face arrière, la densité des porteurs minoritaires, la densité de photocourant, la phototension et les paramètres électriques ont été étudiés.

Le troisième chapitre a été l''objet d'une simulation par matlab/simulink d'une photopile au silicium sous éclairement monochromatique et sous l''effet de la fréquence, la température, l''énergie d''irradiation et du coefficient de dommage. La densité des porteurs minoritaires, le coefficient de diffusion, la vitesse de recombinaison à la face arrière ainsi que l''impédance ont été élaborés.

Le quatrième chapitre s'est porté sur d'une étude expérimentale où nous avons grâce à un microcontrôleur pu acquérir de façon automatique la température et la caractéristique d'un panneau solaire. Ceci a été possible par un assemblage de résistances qui ont été mises en parallèle pour pouvoir trouver le point de fonctionnement par la charge résistive du panneau solaire.

Mots-clés : Photopile, Vitesse de recombinaison, température, matlab/simulink, champ magnétique, énergie d'irradiation, coefficient de dommage.

## ABSTRACT

In this thesis, a study was made of a silicon photopile under a matlab/simulink environment. The first chapter focused on the bibliographic study. Thus, solar radiation, and the principle of conversion of light have been highlighted. It was also a question of trackling a few articles around the theme.

In the second chapter, the simulation of a silicon photovoltaic cell under polychromatic illumination and under different values of the magnetic field and temperature was devoted to it. The diffusion coefficient, recombination velocity at the back, minority carrier density, photocurrent density, phototension and electrical parameters were studied.

The third chapter was the object of a matlab / simulink simulation of a silicon photopile under monochromatic illumination and under the effect of frequency, temperature, irradiation energy and coefficient of in damage. The density of the minority carriers, the diffusion coefficient, the recombination velocity at the back and the impedance were developed.

The fourth chapter focused on an experimental study where, thanks to a microcontroller, we were able to automatically acquire the temperature and characteristic of a solar panel. This was made possible by an assembly of resistors which were paralleled in order to find the point of operation by the resistive load of the solar panel.

Keywords: Solar cell, Velocity recombination, Temperature, Matlabv/simulink, magnetic field, Irradiation energy.

### **BIBLIOGRAPHIES**

### **INTRODUCTIONS GENERALE**

[1] A. LABOURET, P. CUMUNEL, J. P. BRAUN, B. FARAGGI «Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque » Dunod, Paris, 2010 5^{ème} édition, vol 134p.

[2] P. Siffert « Nouvelles techniques de réalisation de photopiles au silicium » Revue de Physique Appliquée, 1979, 14 (1), pp.169-192

[3] Ed. Becquerel, C.R. Acad. Sci., 9 (1839) 561.

[4] Anne Labouret et Michel Villoz « Énergie Solaire Photovoltaïque» 2e édition Dunod, 2006, 300p.

[5] Bernard Equer, « Énergie Solaire Photovoltaïque» physique et technologie de la conversion photovoltaïque, vol 1, édition ellipses 1993, 231p.

[6] Y. Hasegawa, T. Egawa, T. Jimbo, M. Umeno "AlGaAs/GaAs light-emitting diode on a Si substrate with a self-formed GaAs islands active region grown by droplet epitaxy". Appl. Phys. Lett. 68 (1996) 523-525

[7] J. Barnard «Energie Solaire Calcul Et Optimisation». Ellipses édition, Paris, France, 2004.

[8] Joseph J. Wysocki and Paul Rappaport « Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion » Journal of Applied Physics Volume 31, Issue 3, 1960.

[9] K. Shirasawa, H. Yamashita, K. Fukui, M. Takayama, K. Okada, K. Masuri, H. Watanabe, Conference Record of the Twenty First IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee, Finland, 688 (1990).

[10] O. SOW, I. ZERBO, S. Mbodji; M. I. NGOM; M. S. DIOUF and G. Sissoko "Silicon solar cell under electromagnetic waves in steady state: electrical parameters determination using the I-V and P-V characteristics", International Journal of Science, Environment and Technology, Vol. 1, No 4, 2012, 230 – 246.

### > CHAPITRE I

- [I.1] A. Mouhoub, «Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin ». Rev. Energ. Ren. Vol. 4 (2001), 11-22.
- [I.2] H. Mathieu, « Physique des Semi-conducteurs et des Composants Electroniques », Masson, Paris, 601 pages, 1987.
- [I.3] Anne Labouret et Michel Villoz « Énergie Solaire Photovoltaïque» 2e édition Dunod, 2006, 300p.
- ➢ [I.4]: HONSBERG C. and BOWDEN S. Photovoltaic: Devices, Systems and Applications [CDROM]. Sydney, Australia: University of New South Wales, 1998.
- [I.5] B.A. Monteny; G. Gosse; D. Cardon; M. Eldin «Etude spectrale du rayonnement solaire en Côte d'ivoire» office de la recherche scientifique et technique outre – mer centre d'Adiopodoumé - côte d'ivoire BP : 20 Abidjan Janvier 1974 n°06862 pp 1-33
- [I.6] I. Ly, O. H. Lemrabott, B. Dieng, I. Gaye, S. Guèye, M. S. Diouf and G. Sissoko "Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multispectral constant en régime statique"; Revue des énergies renouvelables vol.15 n°2 2012 187-206.
- [I.7] 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, 15 - 21 June, pp. 1487- 1490, 1996.
- [I.8] M. Kunst and A. Sanders, 1992. Transport of excess carriers in silicon wafers, Semicond. Sci. Technol. 7, pp: 51-59 in the UK
- [I.9] M.K. El-Adawi, 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 Volume 64, Issue 1, 28 November 2001, Pages 33–36

- [I.10] A.Dieng, L. Ould Habiboulahy, A. S. Maiga, A. Diao, G. Sissoko "Impedance spectroscopy method applied to electrical parameters determination on bifacial silicon solar cell under magnetic field" Journal des Sciences pp 48_52, Vol.7, N°3 (2007)
- [I.11] A. Zondervan, L. A. Verohef, and F. A. Lindholm "Measurement circuits for silicon-diode and solar cell lifetime and surface recombination velocity by electrical short-circuit current delay", IEEE transactions on electron devices vol. ED-35, n°1, January 1988.
- [12] K. J. Singh, K L Rita Kho, S. Jitu Singh, Y. C. Devi, N. Basanta 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, June 2014
- [I.13] 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, February 2012, pp. 26~34
- [I.14] R. KISHORE Accurate analytical expressions for the parameters of the single exponential model of the solar cells Solid-State Electronics, Vol. 32, No.6 (1989) pp.493-495
- [I.15] F.I.Barro, A.S.Maiga, A.Wereme and G.Sissoko "Determination of Recombination Parameters in the Base of a Bifacial Silicon Solar Cell Under Constant Multispectral Light", November 2010 Phys. Chem. News 56 (2010), Vol.12 76-84.
- [I.16] S. Djerroud et A. Boudghene Stambouli, «Mise au point d'un dispositif automatique de caractérisation du module solaire à base d'un microcontrôleur PIC16F877 Application au module solaire hybride en a-Si:H », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 613 – 623.

[I.17] O. Sow, D. Diarisso, N. Zénobe A. MBodji, M. S. Diallo, A. Diao, I. Gaye, F. I. Barro, G. Sissoko "Experimental Device for Acquisition of Properties I-V and V (T) of the Solar By Automatic Change Operating Point"; International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-4, March 2013

### ✓ CHAPITRE II

- ✓ [II.1] W. A. BASIT, A. M. A.MAKSOOD and F. A. M. Saad SOLIMAN «Mathematical Model for Photovoltaic Cells», Leonardo Journal of Sciences 23, July-December 2103 pp13-28.
- ✓ [II.2] P. Sudeepika, G. Md. Gayaz Khan "Analysis of Mathematical Model of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment" IJAREEIE Vol.3, Issue 3, March 2014
- ✓ [II.3] 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.
- ✓ [II.4] Hamet Yoro BA, Boureima Seibou, Idrissa GAYE, Ibrahima LY, Grégoire SISSOKO "Recombination Parameters Measurement of Silicon Solar Cell Under Constant White Bias Light With Incident Angle Current" Trends in Technology and Sciences ISSN: 2279-0535. Volume: 3, Issue: 6 (Oct.-Nov. 2014), P.411-415.
- ✓ [II.5] G.Sissoko, E. Nanema, A. Correa, P. M. Bitèye, M. Adj, A. L. Ndiaye,1998. Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic Proceedings of the World Renewable Energy Conference Florence-Italy, pp: 1848-1851.
- ✓ [II.6] M. L. Samb, M. Zoungrana, F. Touré, M. T. D. Diop, G. Sissoko « Etude en modélisation à 3-D d'une photopile au silicium en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairement multispectral : détermination des paramètres électriques» J. Sci.Vol. 10, № 4 (2010) 23 – 38
- ✓ [II.7] H. Ly Diallo, B. Dieng, I. Ly, M.M. Dione, M. Ndiaye, O.H. Lemrabott, Z.N. Bako, A. Wereme and G. Sissoko « Determination of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell» Research Journal

of Applied Sciences, Engineering and Technology ISSN: Maxwell Scientific Organization, 2012 vol 6 pp 1-6

- ✓ [II.8] 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, April 1984, 462-467
- ✓ [II.9] M. Kunst, and A. Sanders, 1992. Transport of excess carriers in silicon wafers, Semicond. Sci. Technol. 7, pp : 51-59 in the UK
- ✓ [II.10] M. NDIAYE, Z. NOUHOU BAKO, I. ZERBO, A. DIENG, F. I. BARRO, G. SISSOKO « Détermination des paramètres électriques d'une photopile sous éclairement monochromatique en modulation de fréquence, à partir des diagrammes de bode et de nyquist » J. Sci.Vol. 8, N° 3 (2008) 59 68
- ✓ [II.11] H.L. Diallo, A. Seïdou. Maiga, A. Wereme, and G.Sissoko, 2008. "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
- ✓ [II.12] I. Ly, O.H. Lemrabott, B. Dieng, I. Gaye, S. Gueye, M.S. Diouf and G. Sissoko « Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multi spectral constant en régime statique » Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2 (2012) 187 – 206
- ✓ [II.13] El-Adawi, M.K. and I.A. Al-Nuaim, 2002. "A method to determine the solar cell series resistances from a single I-V characteristic curve considering its shunt resistance-new approach". Vaccum, 64, pp: 33-36.
- ✓ [II.14] M.I.Ngom, B.Zouma, M.Zoungrana, M.Thiame, Z.N. Bako, A.G.Camara, and G.Sisssoko "Theoretical study of a parallel vertical multijunction silicon cell under multispectral illumination: influence of external magnetic field on the electrical parameters". International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), ISSN No: 2250-3536 Volume 2, Issue 6, Nov. 2012

- ✓ [II.15] G.Sissoko, C. Museruka, A. Corréa, I. Gaye, A. L. Ndiaye, "Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell", World Renewable Energy Congress (1996), part III, pp.1487-1490
- ✓ [II.16] M. S. Diouf, G. Sahin, A. Thiam, K. Faye, M. I. Ngom, D. Gaye and G. Sissoko "Determination Of The Junction Surface recombination Velocity Limiting The Open Circuit (Sfoc) For A Bifacial Silicon Solar Cell Under External Electric Field"; IJISET
   International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 2 Issue 9, September 2015.
- ✓ [II.17] S. Mbodji, I. Ly, H. L. Diallo, M.M. Dione, O. Diasse 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 ISSN: 2040-7467 Maxwell Scientific Organization, 2012
- ✓ [II.18] M.M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. Gueye Camara, N. Dieme, Z. Nouhou Bako, S. Mbodji, F. I Barro, G. Sissoko, "Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light", 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 5-9 September 2011
- ✓ [II.19] S. Mbodji, B. Mbow, F. I. Barro and G. Sissoko "A 3d model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction in a bifacial polycrystalline solar cell", Global Journal of Pure and Applied Sciences vol 16, n° 4, 2010: 469- 477
- ✓ [II.20] A. Hamidou, A. Diao, S. A. Douani, A. Moissi, M. Thiame, F. I. Barro and G. Sissoko "Capacitance determination of a Vertical Parallel Junction Solar Cell under Multispectral Illumination in steady state" International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-3, February 2013.

- ✓ [II.21] Sissoko, G., B. Dieng, A. Correa, M. Adj and D. Azilino,1998 a. Silicon Solar Cell space charge width determination by a study in modelling. Proc. World Renewable Energy Congress, 3: 1852-1855
- ✓ [II.22] S. Madougou, F. Made, M. S. Boukary, and G. Sissoko "I –V Characteristics For Bifacial Silicon Solar Cell Studied Under a Magnetic Field"; Advanced Materials Research Vols. 18-19 August 2007 pp. 303-312.
- ✓ [II.23] A. Dieng, N. Thiam, A. Thiam, A.S. Maiga and G. Sissoko "Magnetic Field Effect on the Electrical Parameters of a Polycrystalline Silicon Solar Cell", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology ISSN 2040-7467 vol 3 n°7 602-611, 2011
- ✓ [II.24] M. Zoungrana, I. Zerbo, F.I. Barro, R. Sam, F. Touré, M.L. Samb and F. Zougmoré « Modélisation à 3-D de l"influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur une photopile au silicium poly cristallin sous éclairement concentré » Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°4 (2011) 649 664.

### CHAPITRE III

- [III.1] E. H. Ndiaye, G. Sahin, M. Dieng, A. Thiam, H. Ly Diallo, M. Ndiaye,
   G. Sissoko "Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of
   Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation", Journal of Applied
   Mathematics and Physics, 2015, 3, 1522-1535
- [III.2] S. M. Sze, Physics of semiconductor Devices, second edition, Copyright. C.1981 by john, Wiley and Son, Inc.
- [III.3] Ly Diallo, H., Wade, M., Ly, I., Ndiaye, M., Dieng, B., O. H Lemrabott, A.S. Maiga and Sissoko, G. "1D Modeling of a Bifacial Solar Cell Silicon under Monochromatic Illumination Frequency Modulation: Determination of the Equivalent Electrical Circuit Related to the Recombination Area Velocity".

Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4, 1672-1676, (2012).

- [III.4] Diallo, M.M., Seibou, B., Yoro BA, H., Zerbo, I. and Sissoko, G. "One-Dimensional Study of a Bifacial Silicon Solar Cell Illuminated from the Front area by a Monochromatic Light Frequency Modulation under Influence of Irradiation Damage and Coefficient". Current Trends in Technology and Science, 3, 416-421, (2014).
- [III.5] Tall, I., Seibou, B., El Moujtaba, M.A.O., Diao, A., Wade, M. and Sissoko, G. "Diffusion Coefficient Modeling of a Silicon Solar Cell under Irradiation Effect in Frequency: Electric Equivalent Circuit. International Journal of Engineering and Technology Trends" (IJETT), 19, 56-61, (2015).
- [III.6] N. Thiam, A. Diao, M. Wade, M. Ndiaye, I. Zerbo, M. Sarr, A. S. Maïga and G. Sissoko "Study of the Photothermal Response of a Monofacial Solar Cell in Dynamic Regime Under a Multispectral Illumination" Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(1): 134-141, 2013 ISSN: 2040-7459
- [III.7] N. Hamrouni, M. Jraidi and A. Chérif "Solar radiation and ambient temperature effects on the performances of a PV pumping system" Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 95 – 106
- [III.8] Ly, I., Lemrabott, O.H., Dieng, B., Gaye, I., Gueye, S., Diouf, M.S. and Sissoko, G. "Recombination Parameter Determination Techniques and Their Field of Validity of a Bifacial Solar Cell Polycrystalline Silicon in Constant MultiSpectral Irradiance under Static Conditions". Renewable Energy Magazine, 15, 187-206, (2012)
- [III.9] 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, February 2012, pp. 26~34 ISSN: 2088-8708.

- [III.10] Xing, Y., Han, P., Wang, S., Liang, P., Lou, S., Zhang, Y., Hu, S., Zhu, H., Mi, Y. and Zhao, C. (2013) Analysis of Effects of Front and Back Surface of One Vertical Silicon Dopants Multi-Junction Solar Cell by 2D Numerical Simulation. Science China Technological Sciences, 56, 2798-2807. http://dx.doi.org/10.1007/s11431-013-5378-z
- [III.11] Chenvidhya, D., Kirtikara, K. and Jivacate, C. "PV Module Dynamic Impedance and Its Voltage and Frequency Dependencies". Solar Energy Materials and Solar Cells, 86, 243-251 (2005). <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2004.07.005</u>
- [III.12] M. NDiaye, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, 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, and Technology, 2012 p 5
- [III.13] 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
- [III.14] Mora-Sero, I., Garcia-Belmonte, G., Boix, P.P., Vazquez, M.A. and Bisquert, J. "Impedance Spectroscopy Characterization of Highly Efficient Silicon Solar Cells under Different Illumination Intensities Light". Energy and Environmental Science, 2, 678-686. <u>http://dx.doi.org/10.1039/b812468j</u>, 2009
- [III.15] Zerbo, I., Kooalaga, Z., Barro, F.I., Zougmore, F., Ndiaye, A.L., Diao,
   A. and Sissoko, G. "Silicon Solar Cell Parameters Determination under Recombination Frequency Modulated White Light Using the Short Loop Current Phase". Journal des Sciences, 4, 42-46, 2004

### ✤ CHAPITRE IV

 [IV.1] Sdeepika, P. and Gayad Khan, G.Md. (2014) "Analysis of Mathematical Model of PV Cell Module in Matlab/Simulink Environment". International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 3, 7823-7829.

- IIV.2] A. Boudghene Stambouli, "Solar Photovoltaic at the Tipping Point: Pathways from Evolutionary to Disruptive and Revolutionary Technologies", Université des Sciences et de la Technologies d'Oran, USTO.MB, 2009.
- [IV.3] S. Mbodji, I. Ly, H. L. Diallo, M.M. Dione, O. Diasse, G. Sissoko, Modeling Study of N+/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (Sf), Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., 4(1): 1-7, 2012.
- ✤ [IV.4] M.M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. Gueye Camara, N. Dieme, Z. Nouhou Bako, S. Mbodji, F. I Barro, G. Sissoko, Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light, Proceedings of the 26st European Photovoltaic Solar Energy Conference (2011), pp. 250 254.
- [IV.5] Surya Kumari, J. and SaiBabu, Ch. (2012) Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell Using Matlab-Simulink Environment. International Journal of Electrical andNComputer Engineering (IJECE), 2, 26-34.
- [IV.6] 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, February 2012, pp. 26~34 ISSN: 2088-8708.
- [IV.7] T. Bendib, B. Barkat, F. Djeffal, N. Hamia et A. Nidhal «Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontroleur PIC16F84A», Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 523 – 532.
- [IV.8] O. Sow, D. Diarisso, N. Zénobe A. MBodji, M. S. Diallo, A. Diao, I. Gaye. I. Barro, G. Sissoko «Experimental Device for Acquisition of Propertiesi- V and V (T) of the Solar By Automatic Change Operating Point>>, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-4, March 2013 pages 330,334.

- [IV.9] D. Diarisso, M. S. Diallo, A. Diao, O. Sow, I. Gaye, F. I. Barro, G. Sissoko «Development of Battery Charge/Discharge Regulator for Photovoltaic Systems », International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-3, February 2013 pp 231-234
- [IV.10] Microchip Datasheet "PIC 16F87x: 28/40 pin CMOS Flash Microcontrollers", Microchip Technology Inc. DS30292B, 1999.
- [IV.11] Bigonoff, « La Programmation des PIC par Bigonoff », Seconde partie (PIC16F876-16F877), 7ème Révision, 2003.
- [IV.12] P. Mayeux, « Apprendre la Programmation des PIC par l'Expérimentation et la Simulation plus un CD-ROOM », ETSF 2ème édition 2002
- [IV.13] R. Merat, R. Moreau, L. allay, J.-P. Dubos, J. Lafargue, R. Legoff, Electronique numérique ; Edition Nathan / VUEF 2001.
- [IV.14] Jean-Yves FABERT, Sciences industrielles : Automatismes et automatique, Edition Ellipses, 2005.
- [IV.15] Tahar Neffati, Electricité générale : Analyse et synthèse des circuits, Edition Dunod 2003.

#### UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

#### Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER)

Faculté des Sciences et Techniques

Département de Physique

**Ecole Doctorale : PCSTUI** Thèse de Doctorat Unique

#### Présentée par : M. Babou DIONE

#### En vue d'obtenir le diplôme de Docteur

#### Membre du Jury :

Président :	FARSI	Sidi	Professeur Titulaire	ESP / UCAD
Rapporteurs :	TALL	KhaLy	Maître de Conférences	ESP / UCAD
	WADE	Mamadou	Maître de Conférences	EPT /Thiès
Membres :	DIENG	Moustapha	Professeur	FST / UCAD
	Ly	Ibrahima	Maître de Conférences	EPT/Thiès
	SOW	Ousmane	Maitre- Assistant	IUT / Thiès
Co-Directeurs	MBODJI	Senghane	Maître de Conférences	UADB/Bambey
	SISSOKO	Grégoire	Professeur Titulaire	FST/UCAD

<u>SUJET</u> :

« Etude de la photopile au silicium sous environnement matlab/simulink pour différents régimes et sous différentes conditions expérimentales »

#### RESUME :

Au cours de cette thèse, il a été question d'une étude de la photopile au silicium sous environnement matlab/simulink.

Le premier chapitre s'est porté sur l'étude bibliographique. Ainsi, le rayonnement solaire, et le principe de conversion de la lumière ont été mis en exergue. Il a été aussi question d'aborder quelques articles tour au tour de notre thème. Dans le deuxième chapitre, la simulation d'une photopile au silicium sous éclairement polychromatique et sous différentes valeurs du champ magnétique et de la température y a été consacrée. Le coefficient de diffusion, la vitesse de recombinaison à la face arrière, la densité des porteurs minoritaires, la densité de photocourant, la phototension et les paramètres électriques ont été étudiés. Le troisième chapitre a été l'objet d'une simulation par matlab/simulink d'une photopile au silicium sous éclairement monochromatique et sous l'effet de la fréquence, la température, l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage. La densité des porteurs minoritaires, le coefficient de diffusion, la vitesse de recombinaison à la face arrière ainsi que l'impédance ont été élaborés. Le quatrième chapitre s'est porté sur d'une étude expérimentale où nous avons grâce à un microcontrôleur pu acquérir de façon automatique la température et la caractéristique d'un panneau solaire. Ceci a été possible par un assemblage de résistances qui ont été mises en parallèle pour pouvoir trouver le point de fonctionnement par la charge résistive du panneau solaire.

**Mots-clés** : Photopile, Vitesse de recombinaison, température, matlab/simulink, Champ magnétique, Energie d^{**}irradiation, Coefficient de dommage.