

N° D'ordre :

Université Cheikh Anta Diop de DAKAR

2015-2016

Faculté des Sciences et Techniques

Département de Physique



Thèse de Doctorat Unique en Physique et Applications

**Option** : Energie solaire, Matériaux et Systèmes (SOLMATS)

Présentée par :

**M. DIENG Alioune Badara**

Titulaire du master

**Sujet** : Etude, en régime statique, d'une photopile à jonction verticale parallèle sous éclairage monochromatique et sous irradiation.

Soutenue publiquement 15 Octobre 2016 .devant le jury composé de :

Président : Grégoire	Sissoko	Professeur Titulaire	FST-UCAD	
Directeur : Ibrahima	Ly	Professeur Assimilé	EPT	
Rapporteur : Kame	Sie	Maître de conférences	U.O. Burkina Faso	
Rapporteur : Senghane	Mbodj	Professeur Assimilé	UADB	
Autres Membres: Mamadou	Wade	Professeur Assimilé	EPT	
	Birame	Dieng	Professeur Assimilé	UADB

# Dédicaces

*Ce travail a été effectué sous la direction :*

*De M. IBRAHIMA LY ,*

*Professeur A l'école polytechnique de THIES , dans le cadre des activités du groupe international de recherche sur les énergies renouvelables dirigé par, M. Grégoire SISSOKO Professeur titulaire de classe exceptionnelle des Universités, Département de Physique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*-A feu mon père et particulièrement à ma mère bien aimée. Un fils ne pourra jamais mériter tous les sacrifices consentis à son égard par ses parents.*

*-A ma femme et à mes enfants*

*-A tous les autres membres de ma famille*

*-A tous les instituteurs et professeurs qui ont participé à ma formation.*

*-A tous les membres de la cellule de sciences physiques du lycée de Bambey en particulier feu maciré sambou, ancien coordonnateur.*

# Remerciements

*Mes sincères remerciements vont à l'endroit de :*

- *M. le professeur **Grégoire Sissoko**, professeur titulaire à la faculté des sciences et techniques, département de physique pour avoir bien voulu m'accepter dans sa dynamique et féconde équipe de recherche. Votre générosité, votre ouverture ainsi que votre africanité ont permis à de jeunes africains de diverses nationalités d'accéder au cercle, jadis très difficile d'accès, des docteurs en physique dans les universités africaines.*

- *M. **Senghane Mbodj**, Professeur assimilé et vice-recteur de l'UADB, pour toute la sollicitude dont il a fait montre à mon égard depuis mon inscription en master 2 et qu'il ne cesse de renouveler. Un homme humble et d'une très grande générosité.*

- *M. **Kame Sié**, Maître de Conférences à l'université d'Ouagadougou. Je vous remercie de bien vouloir accepter de participer à ce jury. Votre déplacement est un grand honneur et témoigne de votre sens de partage des connaissances académiques.*

- *M. **Ibrahima LY**, Professeur assimilé à l'école de polytechnique de Thiès. La confiance placée en vous par le professeur Sissoko suffit largement pour attester de vos qualités intellectuelles et humaines. Je vous suis profondément reconnaissant d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse.*

- *M. **Mamadou Wade**, Professeur assimilé à l'école de polytechnique de Thiès. Vous aviez participé au jury qui a présidé la soutenance de mon mémoire de master. J'ai eu à cette occasion à témoigner de vos qualités intellectuelles. C'est un plaisir pour moi de vous compter à nouveau parmi les membres de mon jury. Soyez en remercié.*

- *M. **Birame Dieng**, Professeur assimilé à l'UADB. Votre déplacement est un grand honneur et témoigne de votre sens de partage des connaissances académiques.*

## Remerciements

*Nos remerciements sont adressés à toute l'équipe de recherches en particulier  
docteur **Mor** **Ndiaye.***

## Table des matières

<b>Table des matières</b>	
Dédicace.....	2
Remerciements.....	4
Liste des Figures.....	8
Liste des Tableaux.....	11
Nomenclature.....	12
Introduction Générale.....	13
Bibliographie.....	15
Chapitre I : Etude Bibliographique.....	18
Introduction.....	18
I.1.Nature de l'irradiation.....	18
I.1.1. Environnement radiatif spatial.....	18
I.1.1.1. Le vent solaire.....	18
I.1.1.2. Les éruptions solaires.....	18
I.1.1.3. Le rayonnement cosmique.....	19
I.1.1.4. Les ceintures de radiations.....	19
I.1.2. Environnement radiatif atmosphérique et terrestre.....	21
I.1.2.1. Influence du rayonnement cosmique.....	21
I.1.2.2. Le rayonnement alpha.....	21
I.1.2.3. Le nucléaire civil.....	21
I.2. Impact technologique de l'irradiation.....	21
I.3. Irradiation en laboratoire.....	22
I.4. Radiation damage in silicon detectors (H. W. Kraner et al, 1983).....	23
I.5) Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells (G-H. Shin et al, 2008).....	24
I.6) Electron and proton radiation study of GaInP <sub>2</sub> /GaAs/Ge solar cell ( P.R Sharps et al, 2001).....	24
I.7) Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell ( G. Sissoko and al, 1996).....	25
I.8)Silicon solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic (G. Sissoko and al, 1998).....	25
I.9) Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light ( Dione et al, 2009).....	26

## Table des matières

I.10) Etude théorique de l'influence de l'irradiation d'une photopile sous éclairage polychromatique (Abderrahim et al, 2012).....	26
I.11)Modelling study of N <sup>+</sup> /P solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (Sf) (Mbodj et al, 2012).....	26
I.12) Effet de la longueur d'onde de l'excitation optique sur les phénomènes de recombinaison dans une photopile en régimes statique et transitoire. ( C.Musereka , 1995).....	27
I.13) 3D approach for a modelling study of the diffusion capacitance's efficiency of the solar cell( M.NDIAYE et al,2010).....	27
I.14) Etude en modélisation à 3D d'une photopile au silicium en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral (M.L.Samb et al ,2010).....	28
CONCLUSION.....	28
Bibliographie.....	29
Chapitre II : Etude théorique de l'influence de la longueur sur les résistances shunt et série d'une photopile à jonction verticale parallèle sous irradiation.....	32
Introduction.....	32
II.1. Présentation de la photopile.....	32
II.2.Principe de fonctionnement de la photopile .....	35
II.3. Equation de continuité.....	35
II.4.Profil de la densité des porteurs minoritaires dans la base .....	38
II.5.Profil de la densité de photocourant en fonction de la longueur d'onde.....	43
II.6.Vitesse de recombinaison à la jonction en court-circuit.....	45
II.7. Détermination pratique de Jcc.....	46
II.8.Profil de la phototension en fonction de la longueur d'onde.....	47
II.9. Vitesse de recombinaison à la jonction en circuit ouvert .....	50
II.10.Détermination pratique de Vco.....	51
II.11.Paramètres électriques de la photopile.....	51
II.11.1.Caractéristique V-I.....	51
II.11.2.Résistance shunt.....	53
II.11.3.Résistance série.....	57
CONCLUSION.....	60
Bibliographie.....	61
Chapitre III : Etude de l'effet de l'irradiation sur les résistances shunt et série de la photopile.....	64
Introduction.....	64

## Table des matières

III.1.Profil de la densité des porteurs minoritaires dans la base .....	64
III.2.Profil de densité de photocourant.....	66
III.3.Influence de l'irradiation sur $S_{Fcc}$ .....	67
III.4.Profil de la phototension.....	67
III.5.Influence de l'irradiation sur $S_{Fco}$ .....	68
III.6.Parametres électriques de la photopile.....	69
III.6.1.Caractéristique V-I.....	69
III.7. Profil de la résistance shunt.....	70
III.8. Profil de la résistance série.....	71
CONCLUSION.....	72
Bibliographie.....	73
<b>Chapitre IV : Etude de l'influence de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion</b>	
Introduction.....	76
IV.1.Expression de capacité de diffusion.....	76
IV.2. Influence de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion.....	76
IV.3.Profil de la capacité en fonction de la phototension.....	79
IV.4.Influence de la longueur d'onde sur la capacité à l'obscurité.....	82
IV.5. Profil de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction de la longueur d'onde.....	84
IV.6. Profil de la capacité de diffusion en court-ouvert en fonction de la longueur d'onde.....	85
IV.7. Rendement de la capacité de diffusion.....	86
IV.7.1. Expression du rendement.....	86
IV.7.2. Profil du rendement en fonction de la longueur d'onde.....	86
CONCLUSION.....	87
Bibliographie.....	88
<b>Chapitre V : Etude de l'effet de l'irradiation sur la capacité de diffusion.....</b>	
Introduction.....	91
V.1.Profil de la capacité de diffusion.....	91
V.2.Profil de la capacité en fonction de la phototension.....	93
V.3.Influence de l'irradiation sur la capacité à l'obscurité.....	94
V.2.Profil de la capacité en court-circuit.....	95
V.3.Profils de la capacité en circuit ouvert.....	97
V.5.Profils du rendement de la capacité.....	99
CONCLUSION.....	100
Bibliographie.....	101
Conclusion Générale.....	103
Bibliographie Générale.....	105

## Liste des figures

### LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 :</b> Carte du monde de l'irradiation annuelle.....	13
<b>Figure 2 :</b> Perspectives d'évolution de la production des cellules photovoltaïque..	14
<b>FIGURE I.1 :</b> Représentation de l'atmosphère solaire. Mesure du vent solaire par le satellite Ulysse.....	18
<b>Figure I-2 :</b> éruption solaire 2003 captée par SOHO.....	21
<b>Figure I-3 :</b> Flux des particules de l'environnement radiatif en fonction de l'altitude.	19
<b>Figure II-1 :</b> cellules monocristallines .....	33
<b>Figure II-2 :</b> cellules polycristallines. ....	33
<b>Figure II-3 :</b> cellules solaires à jonctions verticales parallèles.....	35
<b>Figure II.4 :</b> jonctions verticales parallèles d'une cellule solaire.....	35
<b>Figure II.5 :</b> variation de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur $x$ de la base: $z=0,0001\text{cm}; L_o=0,01\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; S_f=3.10^3\text{cm.s}^{-1}, H=0,03\text{cm}$ .....	38
<b>Figure II.6 :</b> Variation de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction $S_f$ ( $p.10^p \text{ cm/s}$ ) pour différentes valeurs de $\lambda$ : $z=0,0001\text{cm}; L_o=0,01\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; H=0,03\text{cm}$ .....	42
<b>Figure II.7 :</b> variation de de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction $S_f$ pour différentes valeurs de $\lambda$ : $z=0,0001\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; L_o=0,01\text{cm}; H=0,03\text{cm}$ .....	46
<b>Figure II.8 :</b> Caractéristique V-I de la photopile : $z=0,0001\text{cm}; L_o=0,01\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; H=0,03\text{cm}$ .....	50
<b>Figure II.9 :</b> Circuit équivalent de la photopile (générateur de courant).....	52
<b>Figure II.10 :</b> Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde $\lambda$ : $z=0,0001\text{cm}; L_o=0,01\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; H=0,03\text{cm}$ .....	53
<b>Figure II.11 :</b> Résistance shunt en fonction de la longueur d'onde : $z=0,0001\text{cm}; L_o=0,01\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; H=0,03\text{cm}$ .....	56
<b>Figure II.12 :</b> Circuit équivalent de la photopile (générateur de tension).....	56
<b>Figure II.13 :</b> Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde $\lambda$ : $z=0,0001\text{cm}; L_o=0,01\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; H=0,03\text{cm}$ .....	57
<b>Figure II.14 :</b> Résistance série en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ pour $S_f=10 \text{ cm/s}$ : $z=0,0001\text{cm}; L_o=0,01\text{cm}; k_l=5\text{cm}^2/\text{s}; \phi=50\text{Mev}; H=0,03\text{cm}$ .....	59

## Liste des figures

- FIGURE III.1** : profil de la densité des électrons dans la base en fonction de la largeur de la base :  $Sf=3.10^3\text{cm/s}$  ;  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$ .....64
- FIGURE III.2** : profil de la densité des électrons dans la base en fonction de la largeur de la base :  $Sf=3.10^3\text{cm/s}$  ;  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\phi=540\text{Mev}$ ..... 65
- FIGURE III.3** : profil de la densité de photocourant en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$ .....66
- FIGURE III.4** : profil de la densité de photocourant en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$ .....66
- FIGURE III.5** : profil de la phototension en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$ .....67
- FIGURE III.6** : profil de la phototension en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$ ..... 68
- FIGURE III.7** : caractéristique V-I de la photopile :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$ ..... 69
- FIGURE III.8** : caractéristique V-I de la photopile :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$ ..... 69
- FIGURE III.9** : profil de la résistance shunt en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$ .....70
- FIGURE III.10** : profil de la résistance shunt en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$ ..... 70
- FIGURE III.11** : profil de la résistance série en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$ .....71
- FIGURE III.12** : profil de la résistance série en fonction de  $Sf$  :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$ ..... 72
- FIGURE IV.1** : Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$  :  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ..... 77
- FIGURE IV.2** : Profil de la capacité en fonction de la phototension :  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ..... 80
- FIGURE IV.3** : Profil du logarithme décimal de la capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la longueur d'onde :  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ..... 82
- Figure IV.4** : Variation de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  :  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $Sf=7.10^7\text{cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ..... 84

Liste des figures

**Figure IV.5:** Variation de la capacité de diffusion en circuit ouvert en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ :  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $Sf=10 \text{ cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ .....85

**FIGURE IV.6:** Rendement de la capacité de diffusion en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ :  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ..... 86

**FIGURE V.1:** Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour respectivement différentes valeurs de l'énergie d'irradiation:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0, 6\mu\text{m}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ..... 91

**FIGURE V.2:** Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour respectivement différentes valeurs du coefficient de dommage:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0, 6\mu\text{m}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ..... 92

**Figure V.3:** Capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0, 6\mu\text{m}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$  ..... 93

**Figure V.4:** Capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs du coefficient de dommage:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0, 6\mu\text{m}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ..... 94

**Figure V.5:** Profil du logarithme décimal de la capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0, 6\mu\text{m}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ..... 94

**Figure V.6:** Profil du logarithme décimal de la capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs du coefficient de dommage:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0, 6\mu\text{m}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ..... 94

**Figure V.7:** Variation de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction de l'énergie d'irradiation:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $Sf=7.10^7 \text{ cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ..... 95

**Figure V.4:** Variation de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction du coefficient de dommage:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $Sf=7.10^7 \text{ cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ..... 96

**Figure V.5:** Variation de la capacité de diffusion de circuit ouvert en fonction de l'énergie d'irradiation:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $Sf= 10\text{cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ .....97

**Figure V.6:** Variation de la capacité de diffusion de circuit ouvert en fonction du coefficient de dommage:  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $Sf= 10\text{cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ..... 98

**FIGURE V.7 :** Variation du rendement de la capacité en fonction de l'énergie d'irradiation :  $z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ..... 99

**FIGURE V.8 :** Variation du rendement de la capacité en fonction du coefficient de dommage :  $z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $H=0,03\text{cm}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ..... 99

**LISTE DES TABLEAUX**

<b><u>Tableau 1:</u></b> Nature et énergies des particules des ceintures de radiations .....	20
<b><u>TABLEAU II.1 :</u></b> Variation de $S_{fCC}$ en fonction de la longueur d'onde : $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ; $\phi=50\text{Mev}$ ; $J_{cc}=0.5\text{A.cm}^{-2}$ .....	44
<b><u>TABLEAU II.2 :</u></b> Variation de $S_{fCO}$ en fonction de la longueur d'onde : $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ; $\phi=50\text{Mev}$ ; $V_{co}=0.6\text{V}$ .....	49
<b><u>Tableau II.3 :</u></b> Résistance shunt en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ pour $S_f= 7.10^7$ cm/s.....	55
<b><u>Tableau II.4 :</u></b> Résistance série en fonction de la longueur $\lambda$ pour $S_f=10$ cm/s.....	59
<b><u>TABLEAU III.1:</u></b> Variation de $S_{fCC}$ en fonction du coefficient de dommage.....	67
<b><u>TABLEAU III.2:</u></b> Variation de $S_{fCC}$ en fonction de l'énergie d'irradiation.....	67
<b><u>TABLEAU III.3:</u></b> Variation de $S_{fCO}$ en fonction du coefficient de dommage.....	68
<b><u>TABLEAU III.4:</u></b> Variation de $S_{fCO}$ en fonction de l'énergie d'irradiation.....	68

## Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
$D(kl, \phi_p)$	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base en présence d'irradiation	$(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
$\phi_p$	énergie d'irradiation	(MeV)
$G(z)$	Taux de génération global	$(\text{cm}^{-3})$
$g(z)$	Taux de génération spatial	$(\text{cm}^{-3})$
H	Épaisseur de la base	(cm)
$J_{ph}$	Densité de photocourant	$(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
$J_{cc}$	Densité de photocourant de court-circuit	$(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Kl	coefficient de dommage	$(\text{cm}^{-1})$
$L_0$	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base en l'absence d'irradiation.	(cm)
$L(Kl, \phi_p)$	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base sous irradiation	(cm)
$\lambda$	Longueur d'onde	( $\mu\text{m}$ )
$\alpha(\lambda)$	Coefficient d'absorption à la longueur d'onde $\lambda$	$(\text{cm}^{-1})$
$n_i$	Concentration intrinsèque du matériau Si	$(\text{cm}^{-3})$
Nb	Taux de dopage des impuretés dans la base	$(\text{cm}^{-3})$
q	Charge élémentaire de l'électron	(C)
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion du matériau à la longueur d'onde $\lambda$	$(\text{cm}^{-1})$
Sf	Vitesse de recombinaison à la jonction	$(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
$Sf_{cc}$	Vitesse de recombinaison à la jonction en situation de court-circuit	$(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
$Sf_{co}$	Vitesse de recombinaison à la jonction en situation de circuit ouvert	$(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
$\tau$	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base	(s)
t	Temps	(s)
T	Température absolue	(°K)
$\delta(x,t)$	Densité des porteurs minoritaires photogénérés dans la base en fonction de l'épaisseur x et du temps t	$(\text{cm}^{-3})$
V	Phototension	(V)
$V_{co}$	Phototension de circuit ouvert	(V)
$V_T$	Tension thermique	(V)
Z	Profondeur dans la base de la photopile à jonction verticale	(cm)
C	Capacité de diffusion de la photopile	$\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$
$C_{cc}$	Capacité de diffusion en court-circuit	$\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$
$C_{co}$	Capacité de diffusion en circuit ouvert	$\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$
$\eta$	Rendement de la capacité	

## Introduction générale

### Introduction générale

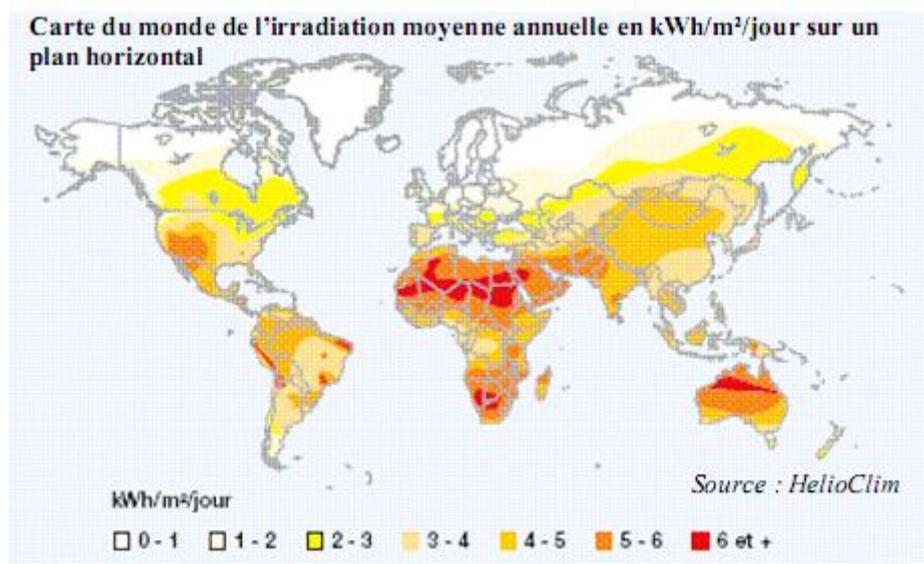
L'émergence économique, qui constitue l'objectif primordial des états subsahariens, nécessite inévitablement une maîtrise de l'énergie. Cette maîtrise se traduit par une production énergétique suffisante ainsi qu'une mise à disposition sur le marché, à des prix compétitifs, pour les différents acteurs de l'activité économique et des ménages.

Pour y parvenir, il faut impérativement agir sur les coûts de production, ce qui revient à revoir les méthodes de production.

Au Sénégal, en 2012, 88% de l'énergie électrique produite par la société nationale l'a été en utilisant des sources d'énergies fossiles (fuel lourd 49% ; diesel 39%). La perspective, à l'horizon 2017, est de mettre en place un mix énergétique dans lequel la part de diesel 39% sera réduite et remplacée par le charbon et le gaz.

Mise à part, le projet de construction d'une centrale solaire d'une puissance de 4 MW à Djembéring au sud du pays, à Boghol au nord et le projet de central solaire Taïba dans le département de Tivaouane ; l'utilisation des énergies renouvelables est encore marginale. Les énergies fossiles, énergies épuisables, majoritairement utilisées dans la production d'énergie électrique sont importées et pèsent donc lourdement sur le prix de l'électricité, en plus de provoquer de graves dommages sur l'environnement et la santé des populations.

L'énergie du soleil a l'avantage d'être disponible de manière quasi illimitée (Figure 1) et les photopiles constituent un des moyens de récupérer cette énergie sans pratiquement générer de pollution.



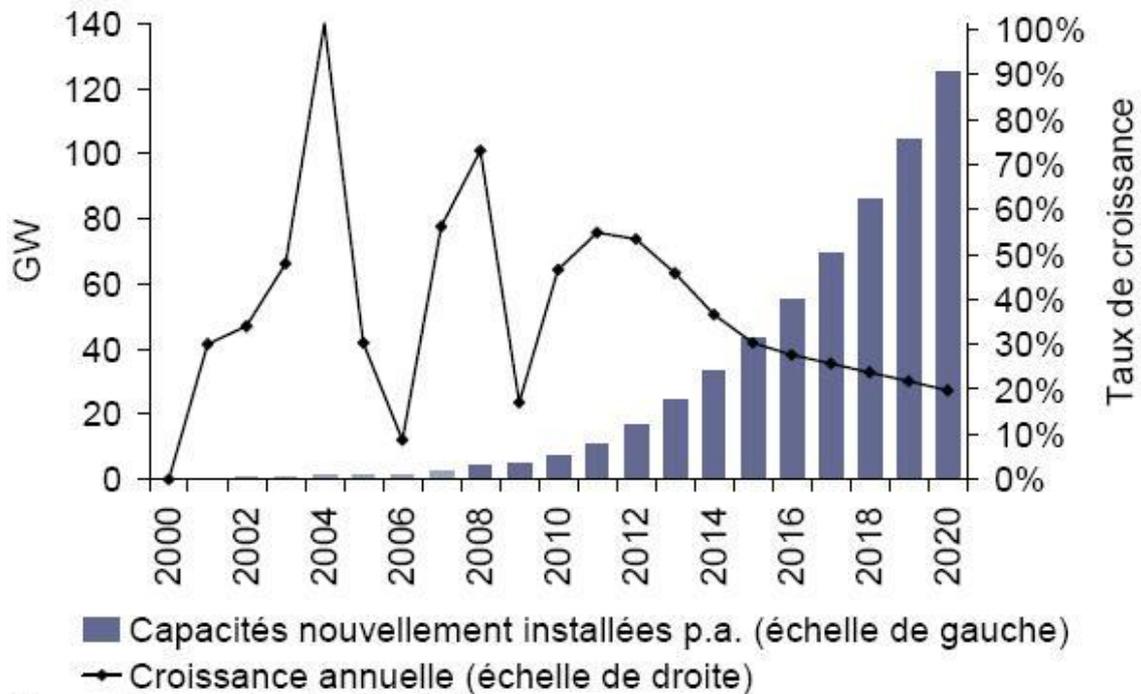
**Figure 1 :** Carte du monde de l'irradiation annuelle. [4]

Ces convertisseurs d'énergie s'intègrent parfaitement dans l'environnement urbain comme rural (toits, façades....) et l'énergie qu'elles produisent peut être raccordée facilement au réseau. Cependant, l'énergie photovoltaïque présente un handicap dans la mesure où elle est encore plus chère que les énergies fossiles, sans tenir compte de l'impact des différents environnements radiatifs sur le bon fonctionnement des photopiles.

## Introduction générale

Afin de surmonter ces difficultés, les recherches effectuées et celles en cours visent à développer de nouveaux modules photovoltaïques plus performants et moins chers.

La production mondiale de cellules solaires (*Figure 2*) a connu une croissance soutenue depuis quelques années.



Source : Banque Sarasin, Nov 2008

### **Figure 2 :** Perspectives d'évolution de la production des cellules photovoltaïques. [2]

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse qui a pour objectif d'étudier une photopile à jonction verticale parallèle fonctionnant en régime statique et sous irradiation. Cette étude se fera à une dimension. Nous nous focaliserons sur la contribution des porteurs minoritaires de la base dans le courant photogénérés et la plage de longueurs d'onde est du domaine du visible.

Dans cette thèse, nous nous attèlerons à développer une démarche analytique couplée à la simulation. Elle est divisée en cinq chapitres.

- ✓ Le premier chapitre est le chapitre consacré à l'étude bibliographique dans laquelle les différents environnements radiatifs auxquels les photopiles sont confrontées seront exposés. Nous terminerons ce chapitre en faisant la synthèse de quelques travaux scientifiques déjà effectués dans notre domaine de recherche.
- ✓ Le deuxième chapitre traite de l'influence de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série de la photopile.
- ✓ Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'influence de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion de la photopile.
- ✓ Le quatrième chapitre traite de l'influence de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage sur les résistances shunt et série.
- ✓ Enfin le cinquième et dernier chapitre a trait à l'impact de l'irradiation sur la capacité de diffusion.

**BIBLIOGRAPHIE :**

- [01].Mané, J. P., Interview Aly N.N, in journal L'observateur, 17/8/2013, N° 2972, p.10.
- [02] Anonyme, Évolution de la production mondiale de photopiles, adresse URL, <http://www.wikipedia.com> (consulté le 20/08/2015)
- [03].Sayad, Y., Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière-matière, Lyon, INSA ,THESE,2009,136p.
- [04] Anonyme, Carte du monde de l'irradiation, adresse URL, <http://www.wikipedia.com>(consulté le 16/08/2015)
- [05] H.Nodet,D.Casenave,R.Gauthier,P.Pinard,Revue phys.Appl.16,1981.pp 591-595
- [06]G.Sissoko,A.Correa,E.Nanema,M.N.Diarra, A.L.Ndiaye, M.Ndiaye,world Renewable Energy Congress(1998),pp1856-1859
- [07] C.T.HO and J.D.Mathias.Solid State.Elect.Vol 24(1981) pp 115-120.
- [08]A.Ricaud, photopiles solaires, presses polytechniques universitaires romande. Lausanne, Suisse ,1997.
- [09]B.Dieng,Etude en modélisation d'une photopile bifaciale au silicium éclairée par une lumière monochromatique, thèse de doctorat 3cycle,UCAD,Juillet 2002 ,Dakar ,Sénégal.
- [10]K.Atallah and Martinot, Equivalent circuit and minority carrier lifetime in heterostructure light emitting diodes, Solid State Electronic,Vol .27 ,N° 4 , 1984,pp 375-380.
- [11]S.M.SZE, physics of semiconductors devices, 2<sup>e</sup> Ed, Wiley Interscience, New york(U.S.A),1981,p 145.
- [12]A.Jakubowicz, Solid State Electr,Vol 23, 1980, pp 635-639.
- [13]A.Romanowsky and D.B.Wittry, J.App.Phys,60 (8),1986,pp 2910-2913.
- [14]I.Gaye,A.Correa,A.L.Ndiaye,E.Nanema,A.B.B.Ba,M.adj and G.Sissoko, world Renewable Energy Congress(1996), Colorado(U.S.A),p 1598.
- [15]F.N.Gonzalez and A.Neugroschel I.E.E.E.Trans.Elect .D.Vol.ED.31,1984,pp 413-416
- [16]M.A.Green,Solid.State.Electr.Vol 26,1983,pp 1117-1122.
- [17]M.A.Green,Solar cells,Vol 11,1984,pp 147-161.

*Bibliographie de l'introduction*

- [18] R.K.Ahrenkiel, B.M.Keyes and D.J.Dunley, J.App.phys.70(1),1991,pp 229-231.
- [19] S.K.Sharma, A.Agarwala and V.K.Tewary, J.phys.D.14,1981,p 1119.
- [20] S.K.Sharma, A.Agarwala and V.K.Tewary,D.16,1983,pp 1741-1744.

**CHAPITRE I : Etude Bibliographique**

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE :

### Introduction

Les photopiles sont sensibles aux environnements dans lesquels ils évoluent et de nombreux facteurs peuvent être à l'origine de leur dysfonctionnement.

Ce chapitre traite des environnements radiatifs spatial, atmosphérique et terrestre et les effets des radiations sur les composants électroniques en particulier les photopiles.

Nous ferons aussi la synthèse de travaux déjà effectués par quelques chercheurs sur les thèmes que nous aborderons dans cette présente thèse.

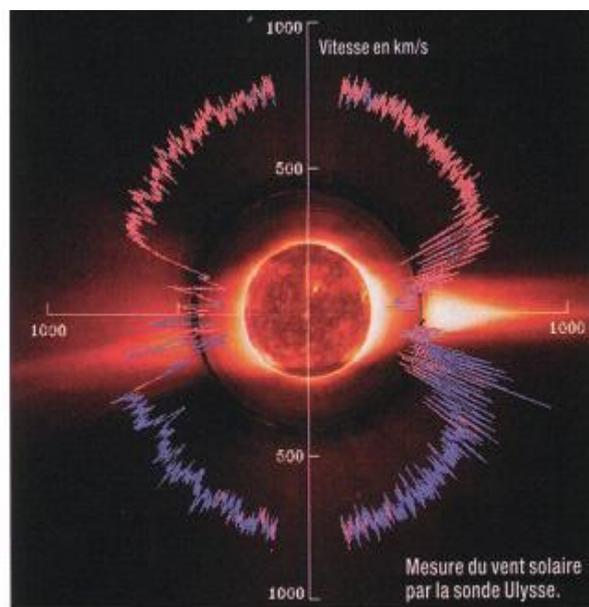
### I.1) Nature de l'irradiation :

#### I.1.1) Environnement radiatif spatial :

Les principales composantes de l'environnement radiatif spatial sont classées, suivant leur origine, en quatre catégories : le vent solaire, les éruptions solaires ; le rayonnement cosmique et les ceintures de radiations.

##### I.1.1.1) Le vent solaire :

Le vent solaire (**Figure I-1**) est un plasma peu dense résultant de l'évaporation de la couronne solaire .Les photographies du soleil prises lors d'éclipses où à l'aide d'un coronographe font apparaitre d'immense flammèches qui s'étendent jusqu'à plus de 10millions de kilomètres du soleil. On visualise ainsi le vent solaire ; la densité du plasma de  $10^{12}$  cm<sup>-3</sup> au niveau du soleil, tombe à 10 particules/cm<sup>3</sup> au niveau de l'orbite terrestre. Ce plasma est essentiellement constitué d'électrons, de protons et d'hélium (7 à 8%)



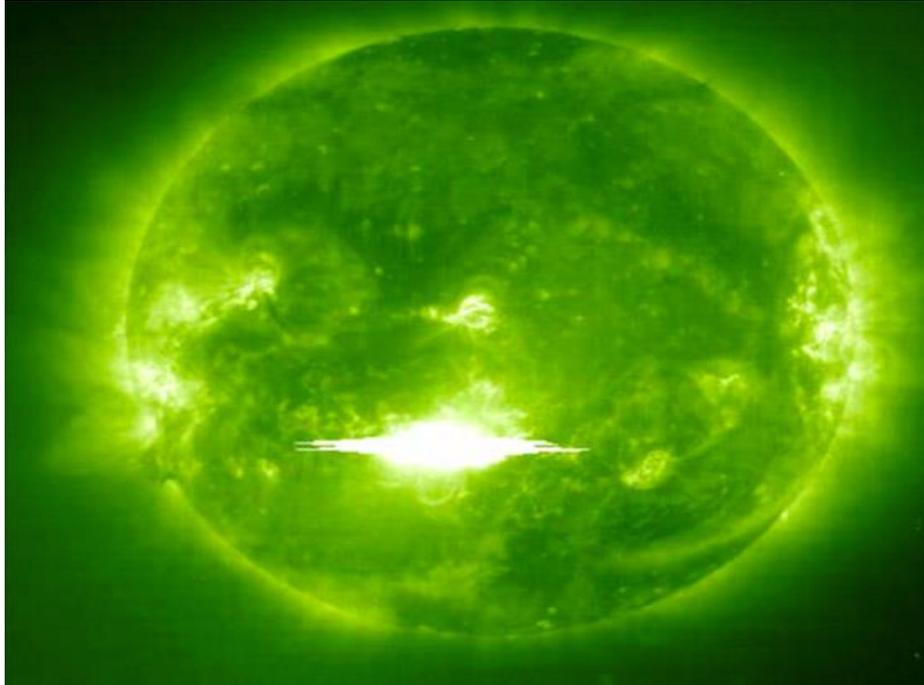
**Figure I-1 :** *représentation de l'atmosphère solaire. Mesure du vent solaire par le satellite Ulysse. [3]*

La figure représente au milieu le soleil avec tout autour l'atmosphère solaire ou couronne. Le vent solaire rapide est expulsé des régions autour des pôles, Nord et Sud, du soleil à la vitesse de 800Km/s, alors que le vent solaire lent afflue de la zone équatoriale à 350Km/s. Le vent solaire est immergé dans un champ magnétique.

##### I.1.1.2) Les éruptions solaires :

## Chapitre I : Etude bibliographique

Durant les éruptions solaires (**Figure I-2**), d'importants flux de protons énergétiques sont produits et atteignent la terre. Le champ magnétique terrestre protège une région de l'espace proche de la terre de ces particules (bouclier géomagnétique), mais elles atteignent facilement les régions polaires et les hautes altitudes telles que les orbites géostationnaires. Les éruptions solaires suivent un cycle de 11 ans, appelé cycle solaire ou cycle magnétique, constitué d'environ 4 ans de faible activité et 7 ans de forte activité ponctuée par des événements mineurs, majeurs et exceptionnels.



**Figure I-2 :** éruption solaire 2003 captée par SOHO. [3]

On peut distinguer deux types d'éruptions solaires :

- Les éruptions solaires à protons : Leur durée de vie va de quelques heures à quelques jours. L'émission principale est constituée de protons d'énergies importantes (jusqu'à quelques centaines de MeV). Parmi ces éruptions solaires à protons on note : les éruptions solaires ordinaires (OR : ORDinary events) et les éruptions solaires majeures (ALE : Anomalously Large Event)
- Les éruptions solaires à ions lourds, dont l'émission principale est constituée d'ions lourds. Ces éruptions envoient des ions de forte énergie (quelques dizaines de MeV par nucléon, à quelques centaines de GeV par nucléon)

### **I.1.1.3) Le rayonnement cosmique :**

Le rayonnement cosmique a été découvert par V. Hess en 1912 grâce à des mesures effectuées à partir de ballons sondes. Il est constitué de 1% d'ions de très grande énergie (Energie >1 MeV), de 85% de protons, de 2% d'électrons et de 12% d'hélium.

L'origine de ce rayonnement est mal connue. On sait toutefois qu'une partie, correspondant aux ions les plus énergétiques, est extragalactique et que l'autre partie est galactique. Les flux de ces particules sont faibles, mais parce qu'elles comportent des ions lourds énergétiques, elles induisent une très forte ionisation quand elles traversent la matière : certains ions atteignent l'énergie de  $10^{21}$  eV.

### **I.1.1.4) Les ceintures de radiations :**

## Chapitre I : Etude bibliographique

Le champ géomagnétique terrestre peut piéger de façon plus ou moins stable les particules (essentiellement électrons et protons). Il en résulte la présence de « ceintures de radiations », structures toroïdales situées à l'intérieur de la magnétosphère.

Les ceintures de radiations sont essentiellement constituées d'électrons d'énergie allant jusqu'à quelques MeV. Les ceintures de radiations se présentent sous la forme d'un tore.

Les particules sont piégées dans le champ magnétique terrestre.

Le tableau ci-dessous résume la provenance et la nature des particules rencontrées dans l'espace ainsi que leur énergie et leur flux dans la magnétosphère.

PROVENANCE	PARTICULES	ENERGIES	FLUX
Ceintures de radiations	Protons	< qq. 100 MeV (dont 99% < 10 MeV)	$10$ à $10^6$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
	Electrons	< 7 MeV (dont 99% < 2 MeV)	$10^{-2}$ à $10^7$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Vent solaire	Protons Electrons Particules $\alpha$ (7 à 8 %)	< 100 keV < qq. keV	$10^8$ à $10^{10}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Eruptions solaires	Protons	10 MeV à 1 GeV	$10^{10}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
	Particules $\alpha$ IONS LOURDS	10 MeV à qq. 100 MeV	$10^2$ à $10^3$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Rayons cosmiques	Protons (87 %)	$10^2$ à $10^6$ MeV	$1$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
	Particules $\alpha$ (12 %)	Fortes énergies	
	IONS LOURDS (1 %)	1 MeV à $10^{14}$ MeV	$10^{-4}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

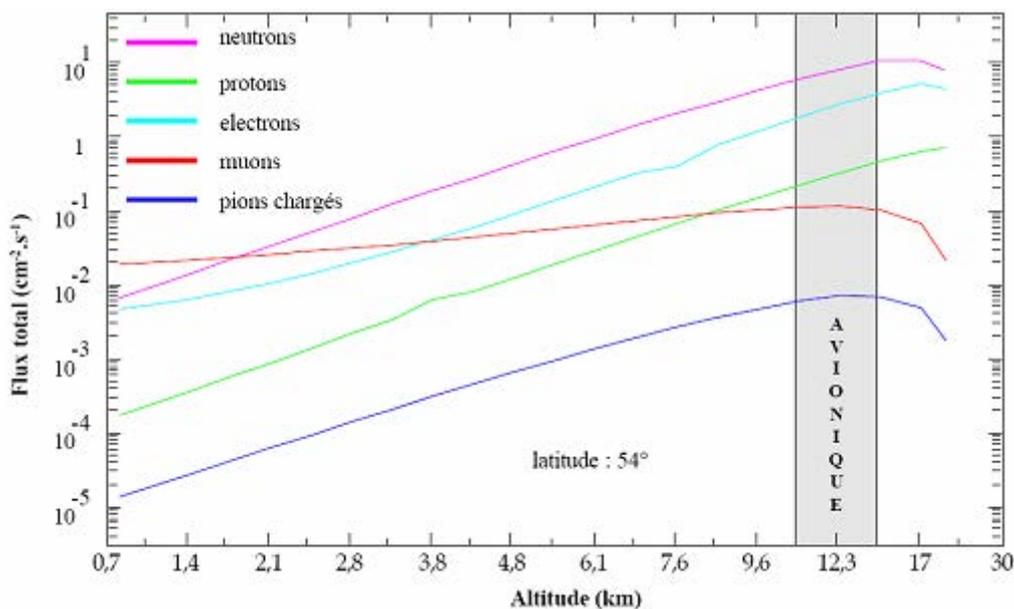
**Tableau 1:** Nature et énergies des particules des ceintures de radiations. [2]

### **I.1.2) Environnement radiatif atmosphérique et terrestre :**

#### **I.1.2.1) Influence du rayonnement cosmique :**

La terre et environnement immédiat sont protégés des radiations cosmiques par son champ magnétique et son atmosphère. Ceux-ci constituent un véritable écran semi-perméable arrêtant la plus grande partie des radiations issues de l'espace. L'environnement radiatif atmosphérique résultent essentiellement de l'interaction des particules primaires, issues du rayonnement cosmique, avec les atomes constituant les molécules de l'atmosphère (entre autre : 78% d'azote et 21% d'oxygène).

L'énergie des particules primaires peut être supérieure au GeV. Les rayonnements les moins énergétiques (Energie < 1 GeV) sont renvoyées dans l'espace par le champ magnétique terrestre avant d'atteindre l'atmosphère. Les premières collisions entre les rayons énergétiques (Energie >1 GeV) ont lieu aux alentours de 50km d'altitude. Cette succession de réactions produisant des particules est appelée cascade neutronique. Elle crée des générations de nouvelles particules (« rayons cosmiques secondaires ») qui pourront atteindre le sol. Ces rayons terrestres d'origine cosmique sont constitués de neutrons(n), de protons(p), de pions ( $\pi$ ), de muons ( $\mu$ ), d'électrons(e<sup>-</sup>) et de photons ( $\gamma$ ). Toutes ces particules peuvent potentiellement interagir avec la matière. Les énergies de ces particules sont comprises entre 0 et  $10^{11}$  eV.



**Figure I-3** : Flux des particules de l'environnement radiatif en fonction de l'altitude. [2]

### I.1.2.2) Le rayonnement alpha :

Le rayonnement alpha est issu de l'activité tellurique de certains éléments lourds présents à l'état de trace dans les matériaux utilisés dans la fabrication des semi-conducteurs.

La radioactivité « fossile » ou tellurique est la réminiscence de la formation de notre planète. Il y'a plusieurs milliards d'années, la terre a été formée par des isotopes radioactifs créés dans les étoiles.

Ces atomes sont dits radioactifs ou instables car ils émettent spontanément des particules pour atteindre un état plus stable : c'est la décroissance radioactive. Il existe plusieurs formes de décroissances radioactives qui produisent des particules alpha (noyaux d'Hélium), des particules bêta (électrons) et des particules gamma (photons).

Seule la décroissance alpha produit une particule avec un pouvoir ionisant suffisamment important au regard de la sensibilité des mémoires.

Les atomes radioactifs fossiles (Uranium 235,238, et Thorium 232) sont présents dans toute matière naturelle à l'état de trace.

Dans les circuits intégrés, ces impuretés sont présentes soit dans le composant lui-même, soit dans son environnement poche.

### I.1.2.3) Le nucléaire civil :

L'essor du nucléaire civil s'accompagne d'un nombre croissant de réacteurs nucléaires, d'usines de production ou de retraitement de combustibles, d'usines de traitement de déchets, ou encore d'installation de stockage de déchets qui constituent autant de sources de contamination pour les composants électroniques qui sont exposés à des flux de particules radioactives.

### I.2) Impact technologique de l'irradiation :

Une simple particule chargée de haute énergie traversant un matériau semi-conducteur est susceptible d'injecter des centaines d'électrons dans la bande de conduction, accroissant le bruit électronique et provoquant un pic de signal dans un circuit analogique, ou faussant les calculs dans un circuit numérique. A plus forte

## Chapitre I : Etude bibliographique

énergie, c'est la qualité même des matériaux, par conséquent leurs propriétés physiques, qui peut être définitivement dégradée, conduisant à la destruction pure et simple du composant irradié.

Deux types d'effets directs des radiations sur les composants électroniques sont à considérer :

- Les défauts cristallins induits par les particules subatomiques ainsi que par les photons gamma de très grande énergie, Ils perturbent le réseau cristallin et provoquent des désordres irrémédiables en multipliant les centres de recombinaison. Ceci a pour effet de neutraliser l'essentiel des porteurs minoritaires et donc de modifier sensiblement les propriétés électroniques des matériaux irradiés.

- Les effets ionisants provoqués par des particules chargées, y compris celles dont l'énergie est trop faible pour induire des défauts cristallins, sont généralement transitoires mais peuvent conduire à la destruction des composants touchés, notamment par l'effet de *latch-up* (les latch-ups sont des états anormaux de dispositifs électroniques qui ne répondent plus aux signaux d'entrée)

On peut aussi noter les dommages appelés *single event effect* (SEE) qui sont produit par une seule particule ionisante qui traverse un dispositif micro-électronique .La création d'une paire électron-trou par l'impact d'une particule peut interrompre la réponse habituelle des circuits électroniques.

Les effets appelés *single event upsets* (SEU) sont produits en particulier par des ions lourds du rayonnement cosmique primaire ou des secondaires engendrés dans l'atmosphère par un proton primaire de haute énergie.

Tous ces effets peuvent être à l'origine de courants électriques parasites sources de dommages permanents et irréversibles pour les composants électroniques.

### **I.3) Irradiation en laboratoire :**

La production de défauts dans les matériaux est une conséquence directe de l'irradiation. Ces défauts affectent les propriétés physico-chimiques des matériaux et sont en particulier à l'origine du «vieillessement sous irradiation», étudié en laboratoire, et qui limite la durée de vie de dispositifs ou d'équipements utilisés dans des applications comme l'électronucléaire ou le spatial.

Mais les défauts induits par irradiation n'ont pas une nature différente des défauts natifs dans les solides, et les irradiations peuvent constituer une méthode de choix pour l'étude des propriétés de tels défauts ainsi que la relation entre la structure des matériaux et leurs propriétés. L'irradiation est utilisée comme une technique de contrôle des propriétés des matériaux car elle intervient comme une méthode d'étude des propriétés physiques fondamentales des solides. Par ailleurs, les techniques d'irradiation permettent d'obtenir des états physico-chimiques qui ne sont pas atteignables par les méthodes classiques de synthèse, et ainsi de concevoir de nouveaux matériaux.

La structure des défauts dans les solides fait l'objet d'études théoriques.

## Chapitre I : Etude bibliographique

Un exemple spécifique de propriétés nouvelles qui peuvent être obtenues par irradiation est celui de la nanostructuration des matériaux. C'est par exemple le cas pour l'irradiation aux ions lourds relativistes permettant d'obtenir des membranes polymères nanoporeuses avec des tailles et des géométries de pores contrôlées au nanomètre près. Par ailleurs, les techniques de radiogreffage ou de croissance électrochimique en matrice, permettent d'obtenir à l'aide de telles membranes, mais aussi à l'aide de nanoparticules polymères obtenues par voie chimique, des nanomatériaux complexes ou hybrides avec des applications dans les domaines allant du biomédical à la dépollution, de la fabrication de nanocapteurs magnétostrictifs ou de membranes échangeuses de protons pour piles à combustibles.

Une autre méthode de nanostructuration par irradiation consiste à piloter par irradiation les propriétés de précipitation-dissolution de solutions solides, ce qui permet d'obtenir des colloïdes avec des distributions de tailles que la synthèse par voie chimique ne permet pas d'atteindre.

De nombreux travaux scientifiques ont été réalisés par des équipes de recherches afin d'étudier l'impact technologique des radiations sur les équipements électroniques. A titre d'exemples, nous allons citer les travaux suivants :

### **I.4) Radiation damage in silicon detectors (H. W. Kraner et al, 1983)**

Les auteurs de ce travail présentent les effets de l'irradiation sur des détecteurs au silicium. Ils montrent les principaux types d'effets observés;

- Augmentation de courant de fuite et de la durée de collecte de charge
- Réduction de la mobilité des porteurs et de la sensibilité à l'éclairement
- Augmentation du temps de montée du signal de sortie (article M. A. O. Moujtaba)

Les auteurs, partant de la relation empirique entre le coefficient de dommage donné ci-dessous et le type de radiation, proposent un résumé de valeurs de coefficients de dommage pour des particules données et des énergies particulières.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + Kl\phi \quad (I-1)$$

Dans cette équation, Kl désigne le coefficient de dommage,  $\Phi$  l'énergie d'irradiation,  $T_0$  et  $T$  la durée de vie des porteurs avant irradiation et celle après irradiation.

Ils trouvent que pour les particules de haute énergie le coefficient KI est de l'ordre de  $10^{-8}$  tandis qu'il est de l'ordre de  $10^{-6}$  pour celles de plus faible énergie.

Les auteurs terminent en montrant l'effet des recuits thermiques sur l'énergie de gap.

#### **I.5) Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells (G-H. Shin et al, 2008)**

Ce travail présente les résultats de l'irradiation de photopiles mono et polycristallines par des protons d'un accélérateur de protons.

Les photopiles sont soumises à deux énergies différentes avec deux flux différents ( $20,3\text{MeV}$  et  $3,24 \cdot 10^{11}$  particules/cm<sup>2</sup>, puis  $10,7\text{MeV}$  et  $2,28 \cdot 10^{11}$  particules/cm<sup>2</sup>).

Les auteurs comparent ensuite les performances des photopiles avant et après irradiation pour un lot de 16 photopiles et montrent que ces dégradations pour les photopiles polycristallines sont 5% inférieures à celles des monocristallines.

De plus, les dégradations sur les polycristallines vont jusqu'à 30% et celles des monocristallines à 35%. La dégradation de performance peut dans le cas être présentée par la relation

$$D = D_0 - C \text{Log} \left[ 1 + \frac{\phi}{\phi_0} \right] \quad (I-2)$$

Où D désigne la performance après irradiation et D<sub>0</sub> celle avant irradiation ; C est un Coefficient d'ajustement et  $\phi$  l'énergie d'irradiation.

#### **I.6) Electron and proton radiation study of GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge solar cell (P.R Sharps et al, 2001)**

Les auteurs de cet article ont présenté les résultats de l'irradiation de cellules multijonctions de type GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge pour des protons et des électrons avec différentes énergies mais aussi différents flux de particules.

Les paramètres observés sont la tension de circuit ouvert V<sub>co</sub>, le courant de court-circuit J<sub>cc</sub> et la puissance maximale P<sub>max</sub>.

Les auteurs ont montré que les paramètres observés décroissent lorsque l'énergie d'irradiation augmente ou que le flux de particules augmente.

Les dégradations notées sont plus marquées quel que soit le flux considéré pour une énergie de 2 MeV pour ce qui est des protons.

Dans le cas des électrons, trois énergies différentes ont été utilisées (1 MeV, 2 MeV, 12 MeV).

## Chapitre I : Etude bibliographique

Les auteurs ont constaté presque les mêmes effets pour 1MeV et 12 MeV sauf pour Jcc où la dégradation est plus marquée pour 1 MeV.

### **I.7) Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell ( G. Sissoko and al, 1996)**

Les auteurs de cet article ont étudié une photopile de type (  $n^+.p.p^+$  ), en régime statique, sous éclairage monochromatique constant.

De nouvelles expressions des vitesses de recombinaison à la jonction Sf et en face arrière Sb des porteurs minoritaires de charge dans la base sont proposées.

La notion de vitesse de recombinaison dépendant uniquement des états d'interfaces est étendue à deux autres processus :

- les processus d'origine électrique à travers la charge externe.
- les processus d'origine optique à travers la composition spectrale de la lumière incidente.

La vitesse de recombinaison à la jonction Sf traduit un couplage entre l'émetteur et la base de la photopile.

La vitesse de recombinaison en face arrière dépend des états d'interface et de la longueur d'onde de l'excitation optique. Cela traduit un couplage optique entre la base de la base de la photopile et la zone surdopée  $p^+$  à l'arrière de la base.

### **I.8) Silicon solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic (G. Sissoko and al, 1998)**

Dans cet article, les auteurs ont déterminé les paramètres de recombinaison d'une photopile monofaciale soumise à un éclairage multispectral constant.

La vitesse de recombinaison à la jonction Sf est présentée comme ayant deux parties.

Le premier terme  $Sf_0$  qui représente les pertes dues aux états d'interface.

Le second terme  $Sf_i$  qui est fixée par la charge externe et définit le point de fonctionnement.

La densité de courant est présentée comme une fonction de calibration de la longueur de diffusion. Son intersection avec la densité de courant de court-circuit expérimentale donne la longueur de diffusion effective  $L_{eff}$  des porteurs minoritaires de charge dans la base.

Les courbes théorique et expérimentale de la phototension de circuit ouvert sont représentées en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Leur

intersection conduit à la vitesse de recombinaison intrinsèque  $S_f$  des porteurs minoritaires de charge à la jonction.

**I.9) Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light ( Dione et al, 2009)**

Dans cet article, les auteurs ont présenté une approche nouvelle basée sur la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  afin d'évaluer les paramètres électriques d'une photopile à jonctions verticales multiples.

Après la résolution de l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base, les expressions de la densité de photocourant et de la phototension ont été déduites leur permettant de tracer la caractéristique courant-tension de la photopile.

Deux circuits équivalents de la photopile traduisant son fonctionnement en court-circuit et en circuit ouvert ont été proposés par les auteurs. Ce qui leur a permis d'établir les expressions des résistances shunt et série et calculer leurs valeurs pour des jonctions verticales série et parallèle.

**I.10) Etude théorique de l'influence de l'irradiation d'une photopile sous éclairage polychromatique (Abderrahim et al, 2012)**

Les auteurs de ce travail ont réalisé l'étude théorique d'une photopile bifaciale sous éclairage polychromatique et sous irradiation.

Les auteurs ont étudié l'influence de l'irradiation sur la densité relative des porteurs minoritaires de charge dans la base. Ils ont montré que la largeur de la zone de charge d'espace dépend des paramètres d'irradiation.

Les auteurs ont aussi étudié l'influence de l'irradiation sur le photocourant, la phototension, la phototension en circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme, le rendement de conversion les résistances shunt et série ainsi que la capacité de diffusion.

**I.11) Modelling study of N<sup>+</sup>/P solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (Sf) (Mbodj et al, 2012)**

Dans cet article, les auteurs présentent une approche nouvelle basée sur la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  afin d'évaluer les résistances shunt et série de la photopile.

## Chapitre I : Etude bibliographique

En associant  $S_f$  et  $S_b$ , vitesse de recombinaison en face arrière, les auteurs ont résolu l'équation de continuité dans la base de la photopile sous éclairage monochromatique ; ce qui leur a permis de tracer les caractéristiques I-V et P-V.

En exploitant la caractéristique I-V, les auteurs ont proposé deux circuits équivalents pour la photopile et ils en ont déduit les expressions de  $R_{sh}$  et de  $R_s$ .

### **I.12) Effet de la longueur d'onde de l'excitation optique sur les phénomènes de recombinaison dans une photopile en régimes statique et transitoire.( C.Musereka , 1995)**

L'auteur de cette thèse a effectué une étude bibliographique sur les techniques de mesure de la durée de vie et de la vitesse de recombinaison des porteurs de charge de la photopile.

La photopile sous éclairage monochromatique et en régime stationnaire est étudiée.

Les mécanismes de génération-recombinaison et diffusion des porteurs de charge dans la base sont analysés par modélisation à travers le profil de la densité des porteurs en fonction de la profondeur de la base et de la longueur d'onde.

De nouvelles expressions des vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière de la base en fonction de la qualité spectrale de l'excitation optique sont établies par l'auteur.

Les études théorique et expérimentale de la photopile en régime transitoire sous excitation monochromatique pulsée sont présentées et ont permis à l'auteur d'extraire les différentes composantes des vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière ainsi que la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs de charge en fonction de la longueur d'onde.

### **I.13) 3D approach for a modelling study of the diffusion capacitance's efficiency of the solar cell( M.NDIAYE et al,2010)**

Dans cet article, les auteurs ont fait cas de deux théories sur l'étude du rendement de la capacité de diffusion d'une photopile de type  $n^+ - p - p^+$ .

Le rendement de la capacité de diffusion est obtenu à l'aide des capacités de diffusion en court-circuit et en circuit ouvert.

Prenant en compte la taille de grain, la vitesse de recombinaison aux joints de grains et la longueur d'onde, les auteurs ont montré que le rendement de la capacité de diffusion est lié au rendement de conversion.

**I.14) Etude en modélisation à 3D d'une photopile au silicium en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral (M.L.Samb et al ,2010)**

Dans cet article, les auteurs ont fait une étude, en modélisation à trois dimensions, d'une photopile au silicium en régime statique placée dans un champ magnétique et sous éclairage multispectral.

Ils ont analysé l'influence du champ magnétique sur la densité des porteurs minoritaires de charges dans la base, la densité de photocourant et la phototension.

De l'étude de la caractéristique courant-tension, les auteurs ont déterminé les expressions des résistances shunt et série.

**CONCLUSION :**

Au terme de ce chapitre que nous avons consacré à l'étude bibliographique, nous avons indiqué les différents environnements radiatifs dans lesquels peuvent évoluer les photopiles ainsi que les effets des radiations auxquelles elles y sont confrontées. Nous avons terminé en soulignant quelques travaux scientifiques, relatifs aux thèmes que nous traitons dans cette thèse, qui ont été réalisés par d'éminentes équipes de recherche.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder l'étude théorique de la variation de la longueur d'onde sur les paramètres électriques d'une photopile à jonction verticale sous éclairage monochromatique, en régime statique et sous irradiation.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Anonyme, Durcissement électronique, adresse URL, <http://www.wikipedia.com>( consulté le 12-09-2015)
- [2].Gaye,I.,Influence de l'irradiation et du coefficient de dommage sur les paramètres électriques d'une photopile au silicium en regime transitoire,Dakar, UCAD,These unique,2013,85p.
- [3] Anonyme, Eruption solaire, adresse URL, <http://www.wikipedia.com>( consulté le 12-09-2015)
- [4].Mané, R., Etude d'une photopile à jonction verticale parallèle sous éclairement polychromatique et sous irradiation, Dakar, UCAD, mémoire masterII, 2013, 48p.
- [5].Kryakunova,O.,impact technologique et biologique du rayonnement cosmique,in neutron monitor database,15/12/2009,Vol.14,n°2,pp.1-2.
- [6].SAHIN, G., Détermination des paramètres électriques d'une photopile à jonction verticale parallèle sous éclairement monochromatique en modulation de fréquence à partir de la caractéristique I-V, Dakar, UCAD, mémoire masterII ,2011 ,48p.
- [7].NGOM, M.I., Etude d'une photopile à jonction verticale parallèle en régime statique sous éclairement polychromatique et sous champ magnétique, Dakar, UCAD, mémoire masterII, 2011,41p.
- [8]. Sané, M., Etude théorique de l'effet de l'angle d'incidence d'un éclairement monochromatique sur une photopile verticale en régime dynamique fréquentiel, Dakar, UCAD, mémoire masterII, 2011,43p.
- [9].Mathieu, H., physique des semi-conducteurs et des composants électroniques,2<sup>ième</sup> édition, Masson,1990.
- [10]G.Sissoko,G.Museruka,A.Correa,I.Gaye,A.L.Ndiaye.Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell.World renewable energy congress, part III,pp 1487-1490,1996
- [11] M.L.Samb, M.Zoungrana ,F.Toure,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, journal des sciences, Vol 10,N°4 ,2010.pp :23-38
- [12]Mbodji. S., 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). Res. J. Appl. Sci. Eng. Techn., 4(1), 2012, pp. 1-7.

- [13] G.Sissoko ,E.Nanema,A.Correa,P.M.Biteye,M.Adj,A.L.Ndiaye. , silicon solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic, Renewable energy, vol 3, pp 1848-1851, Elsevier science Ltd, 1998.
- [14] M.A. Ould El Moujtaba, M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiame, I.F. Barro and G. Sissoko, (2012). Théoretical study of the influence of irradiation on a silicon solar cell under multispectral illumination. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 4(23), 5068-5073, ISSN : 2040-7467
- [15] M.M.Dione, H.L.Diallo, M.Wade, I.Ly, M.Thiame, F.Toure, A.C.Gueye, N.Dieme, Z.N.Bako, S.Mbodj, 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 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference (2011)-1CV.6 .pp: :2 5 0 - 2 54
- [16] Kraner, H.W. , radiation damage in silicon detectors, 2<sup>nd</sup>e Pisa meeting on Advanced Detectors, Grosetto, Italy, June 1983, 3-7.
- [17] C.Musereka , Effet de la longueur d'onde de l'excitation optique sur les phénomènes de recombinaison dans une photopile en régimes statique et transitoire, thèse de doctorat 3cycle, FST, UCAD, 1995.
- [18] P. R. Sharps , Fatemi, N. S., M. A. Stan, D. J. Aiken, B. Clevenger, H. Q. Hou, . Radiation-Hard High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells for Commercial Space Applications. Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2001, pp 2155-2158
- [19] G-H. Shin, K-S Ryu, H-M Kim, K-W Min. Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 52, No. 3, March 2008, pp. 843-847.
- [20] M. Boutiller " *Approche méthodologique de l'impact de l'environnement radiatif spatial sur les propriétés intrinsèques d'une diode laser*" Spécialité : Optoélectronique" l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier ; mars 2008, nombre de page 158.
- [21] M.Ndiaye, A.Diao, M.Thiame, M.M.Dione, H.L.Diallo, M.L.Samb, I.Ly, C.Gassama, S.Mbodj, F.I.Barro and G.Sissoko, 3D Approach for a modelling study of diffusion capacitance's efficiency of the solar cell, 25th European photovoltaic solar energy conference and exhibition, 5<sup>th</sup> world conference of photovoltaic energy conversion, 6-7 September 2010, Valencia-Spain

**Chapitre II : Etude théorique de l'effet de la longueur d'onde sur les paramètres électriques de la photopile sous irradiation**

## **Chapitre II : Etude théorique de l'effet de la longueur d'onde sur les paramètres électriques de la photopile sous irradiation**

### **Introduction :**

La conversion photovoltaïque permet d'obtenir de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. La photopile est le dispositif technique permettant de réaliser cette conversion.

Ce chapitre évoque dans un premier temps le procédé de fabrication de photopiles à base de silicium et la configuration des cellules solaires à jonctions verticales parallèles ensuite leur mode de fonctionnement sera présenté.

Enfin la résolution de l'équation de continuité nous permettra d'établir l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge dans la base et d'en déduire les expressions de la densité de photocourant et de la phototension.

Les résistances série et shunt ont été par la suite déduites.

Nous étudierons dans ce chapitre l'incidence de la variation de la longueur d'onde sur tous ces paramètres précités.

### **II.1. Présentation de la photopile :**

Les cellules solaires sur lesquelles porte notre travail sont à base de silicium cristallin. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium présente plusieurs avantages :

- Il n'est pas toxique.
- Il est l'un des principaux constituants de l'écorce terrestre (27% en masse) d'où sa relative abondance.

Le silicium est obtenu à partir du sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700°C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingots suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes ou wafers. Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes, ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière. On distingue deux types de cellules solaires à base de silicium cristallin :

- Les panneaux PV avec des cellules monocristallines :

Ce sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N,

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs) le wafer devient cellule .Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.

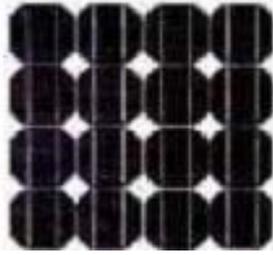


Figure II-1 : cellules monocristallines. [1]

- Les panneaux PV avec des cellules polycristallines :

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Elles ont un rendement de 11 à 15% mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication .Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure polycristalline. Durée de vie : 30ans.

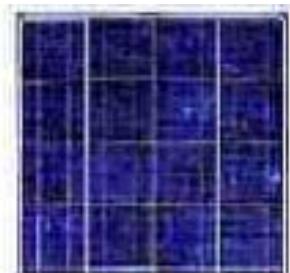


Figure II-2 : cellules polycristallines. [1]

C'est dans l'optique d'améliorer la qualité des photopiles à base de silicium cristallin que la jonction verticale a été pensée par plusieurs équipes de recherche.

La jonction verticale vise à augmenter la durée de vie des porteurs photogénérés et à améliorer leur collection. Ce qui permet d'augmenter le courant de court-circuit  $J_{sc}$  généré par les cellules.

La photopile comporte principalement trois parties :

- Un émetteur qui est un semi-conducteur de type N. C'est la partie la plus dopée avec une concentration en atomes d'impureté allant de  $10^{17}$  à  $10^{19}$  atomes. $cm^{-3}$ . Il a l'épaisseur la plus petite (généralement moins de  $1\mu m$ ). Ce fort taux de dopage permet de réduire les pertes électriques internes modélisées par la résistance série et donc d'améliorer le rendement de la photopile.

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

- Une base qui est un semi-conducteur dopé de type P. La base est peu dopée comparée à l'émetteur avec une concentration en atomes d'impureté allant de  $10^{15}$  à  $10^{17}$  atomes.cm<sup>-3</sup>, mais une épaisseur bien plus importante pouvant aller jusqu'à 400µm. C'est la zone de prédominance des phénomènes de génération, diffusion et de recombinaison.
- Une zone intermédiaire appelée zone de charges d'espace (ZCE) ou encore zone de déplétion.

Un semi-conducteur est un matériau solide de conductivité  $\sigma$  comprise entre  $10^{-8}$ S/cm et  $10^3$ S/cm. C'est le cas du Silicium(Si), semi-conducteur intrinsèque le plus couramment rencontré.

Doper un semi-conducteur, revient à lui ajouter des impuretés (atomes étrangers) qui ont, soit un électron de valence en plus, soit un électron de valence en moins.

Un semi-conducteur de type N est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type donneur. Chaque atome d'impureté apporte un électron de conduction. Dans le cas du silicium, ces impuretés peuvent être des atomes de Phosphore(P), d'Arsenic(As) ou d'Antimoine(Sb).

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteur. Chaque atome d'impureté a une carence d'électron appelée trou. C'est le cas de l'injection de Bore(B) ou de Gallium(Ga) dans un cristal de Silicium pur.

Une jonction semi-conductrice est la limite séparant un milieu dopé P d'un milieu dopé N. La mise en contact d'une zone dopée N (riche en électrons de conduction) avec une zone P (riche en trous) va entraîner un processus de diffusion. Les électrons de la zone N vont diffuser vers la zone P et se recombiner. On obtient donc des ions positifs du côté N (les atomes ayant perdu un électron) et négatifs du côté P (ils ont capté un électron supplémentaire).

La zone ionisée est appelée zone de charges d'espace(ZCE) où règne donc un champ électrique.

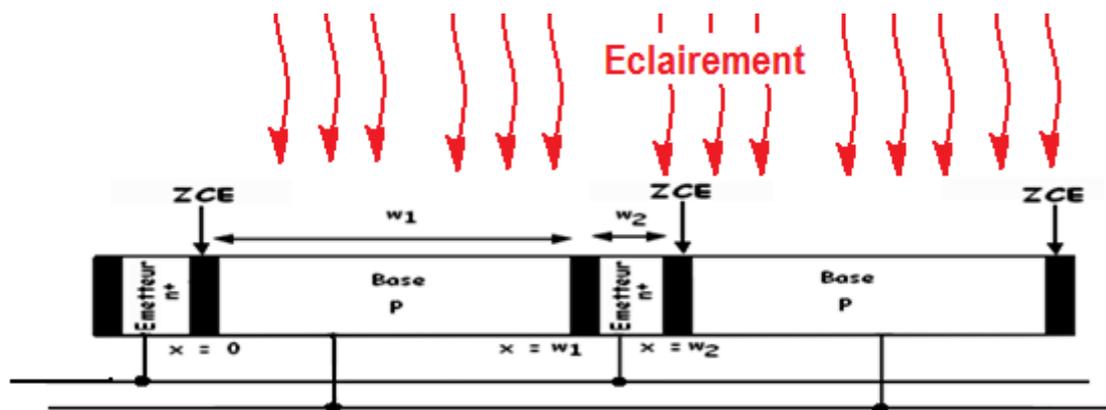


Figure II-3 : cellules solaires à jonctions verticales parallèles.

**.2. Principe de fonctionnement de la photopile :**

La cellule photovoltaïque où photopile est un composant électronique capable de fournir de l'énergie électrique s'il est convenablement éclairé. L'absorption de photons d'énergie suffisante, c'est-à-dire supérieure ou environ égale à l'énergie de la bande interdite ( $E_{gap}$ ) dans la couche absorbante (base p) génère des paires électrons-trous (passage d'électrons d'états de la bande de valence à des états de la bande de conduction). Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne (jonction) et sont ensuite collectées puis débitées à travers une charge.

Dans le cas où ces porteurs libres ont une, mobilité ( $\mu$ ) et un temps de vie ( $\tau$ ) brefs, il se produit des recombinaisons.

**II.3. Equation de continuité :**

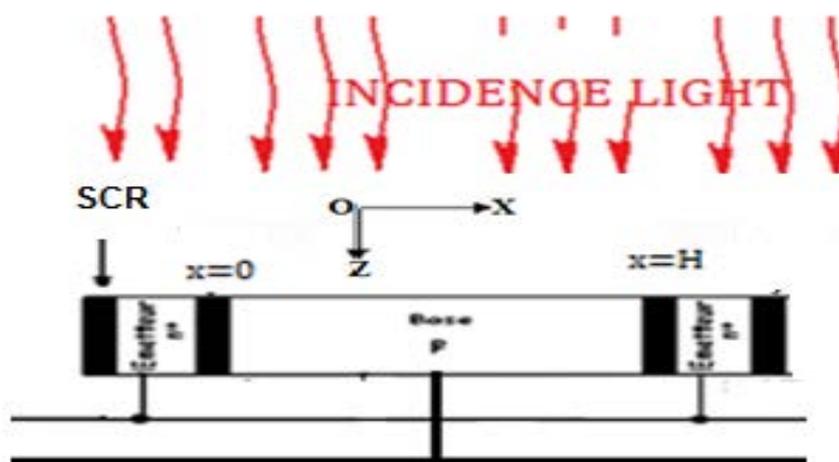


Figure II.4 : jonctions verticales parallèles d'une cellule solaire

Lorsque la photopile est éclairée, il y'a création de paires électron-trous dans la base.

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

Le comportement des porteurs minoritaires dans la base (les électrons) est régi par l'équation de continuité intégrant tous les phénomènes qui font varier la densité des électrons en fonction de la largeur  $x$  de la base, de la profondeur  $z$  de celle-ci, de la longueur d'onde et des paramètres d'irradiation.

La résolution de cette équation nous permettra par la suite d'avoir dans un premier temps l'expression de la densité des porteurs minoritaires de la base et d'en déduire celles des grandeurs et autres paramètres électriques de la photopile.

L'équation de continuité en régime statique est de la forme :

$$D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{\tau} = -G(z) \quad (\text{II.1})$$

$\delta(x)$  décrit la densité des porteurs minoritaires de charge photogénérés.

.  $D$  est le coefficient de diffusion.  $\tau$  est la durée de vie moyenne des porteurs.

.  $G(z)$  est le taux global de génération des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur  $z$  de la base.

L'équation de continuité peut encore être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} + \frac{G(z)}{D} = 0 \quad (\text{II.2})$$

$L(kl, \phi) = \frac{1}{\sqrt{kl\phi + \frac{1}{L_0^2}}}$  est le coefficient de diffusion [Kraner et al, 1983].  $L_0$  est le

coefficient de diffusion en l'absence d'irradiation.  $Kl$  et  $\phi$  désignent respectivement le coefficient de dommage et l'énergie d'irradiation.

L'expression du taux global de génération des porteurs minoritaires de charge est de la forme : [Mbodj et al, 2012]

$$G(z, \lambda) = \alpha_t (1 - R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_t \cdot z) \quad (\text{II.3})$$

$R(\lambda)$  est le coefficient réflexion monochromatique ;  $F$  est le flux de photons incidents issus d'une radiation monochromatique.

$\alpha_t$  est le coefficient de réflexion monochromatique.

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = -\frac{G(z)}{D} \quad (\text{II.4})$$

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

### - Solution de l'équation de continuité

#### - **Solution particulière :**

$$\delta_1(x) = \frac{L^2}{D} \alpha_i (1 - R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i \cdot z) \quad (\text{II.5})$$

#### - **Solution de l'équation avec second membre :**

$$\delta_2(x) = A \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L}\right) \quad (\text{II.6})$$

#### - **Ainsi la solution générale est :**

$$\delta(x, z, \lambda, Sf, kl, \phi) = \left[ A \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L}\right) + \frac{L^2}{D} \cdot \alpha_i (1 - R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i z) \right] \quad (\text{II.7})$$

#### - **Recherche des coefficients A et B :**

##### ❖ **Les conditions aux limites :**

#### - **Ainsi à la jonction ( $x=0$ ) on a :**

$$D \cdot \left. \frac{\partial \delta(x_i, z_i, \lambda, kl, \phi)}{\partial x} \right|_{x=0} = Sf \cdot \delta(x_i, z_i, \lambda, kl, \phi) \Big|_{x=0} \quad (\text{II.8})$$

$Sf$  : est la vitesse de recombinaison à la jonction. C'est un paramètre phénoménologique qui décrit comment les porteurs minoritaires à la base traversent la jonction. Elle peut être scindée en deux termes [Sissoko et al, 1998].

Nous avons :

$$Sf = Sf_o + Sf_j$$

$Sf_o$ , induite par la résistance shunt, est la vitesse de recombinaison intrinsèque.

Elle dépend uniquement des paramètres intrinsèques de la photopile.

$Sf_j$  traduit le flux de courant imposé par une charge externe et définit le point de fonctionnement de la photopile

- **Au milieu de la base ( $x = \frac{H}{2}$ )**. La structure de la photopile, avec deux jonctions identiques de part et d'autre de la base, laisse présager l'équation (II.9) ci-dessous :

$$D \cdot \left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=H/2} = 0 \quad (\text{II.9})$$

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

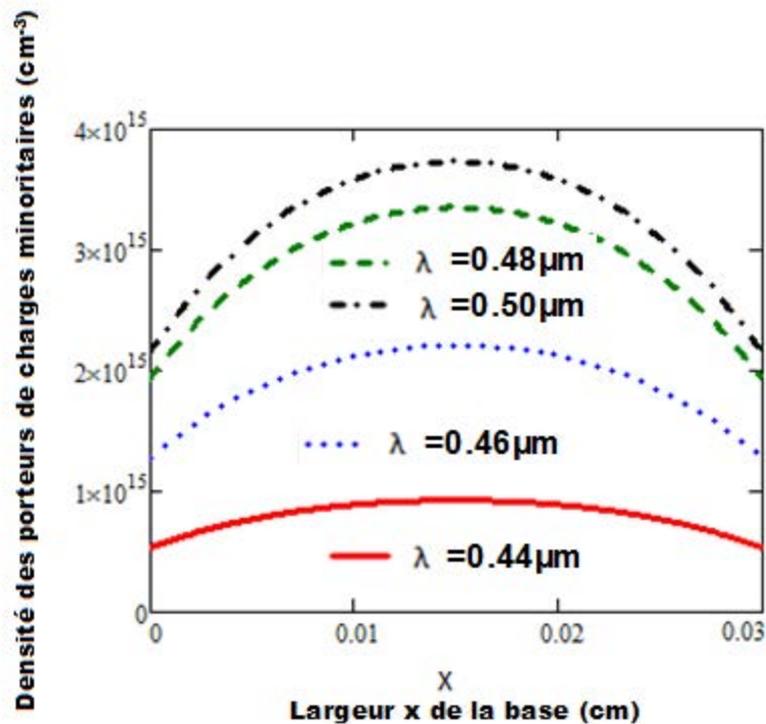
$H$  : est l'épaisseur de la base de la photopile

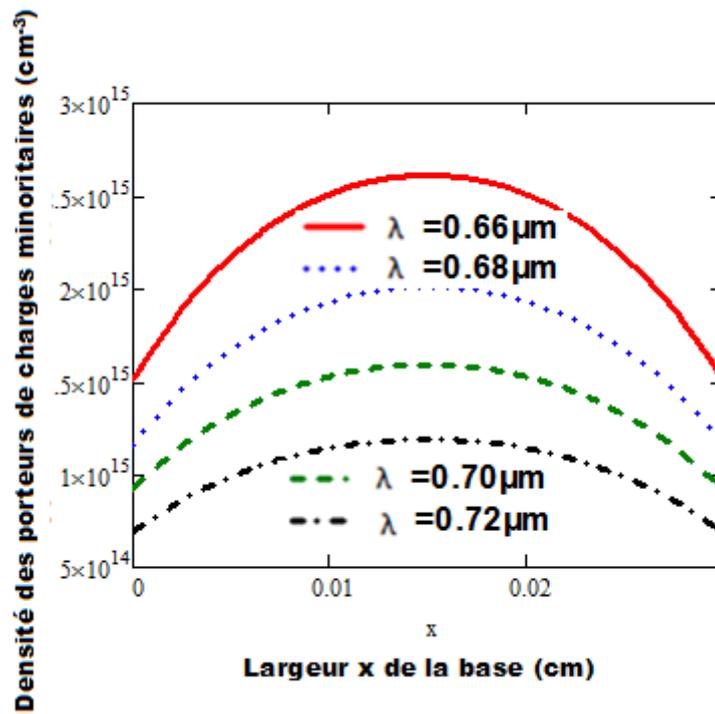
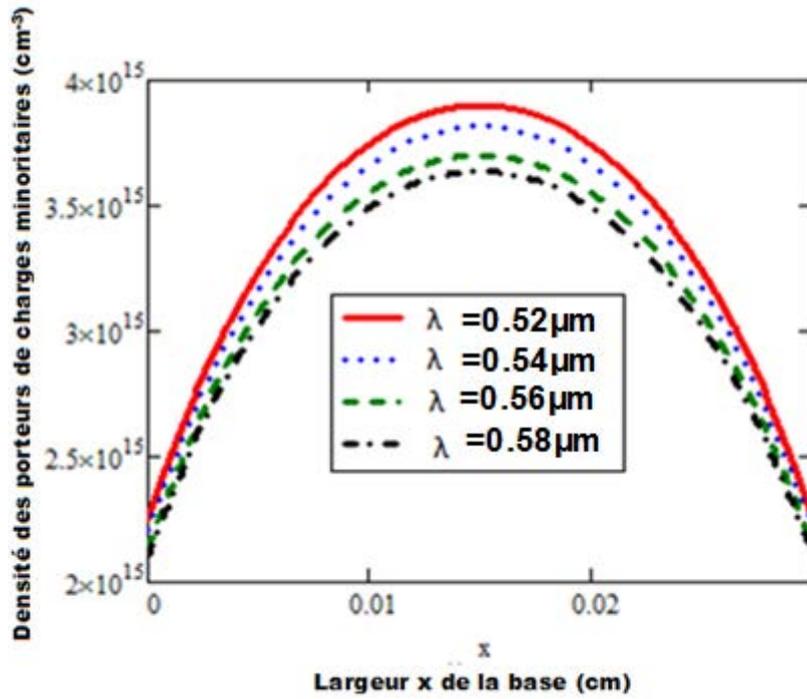
$$B = A \cdot S_f \frac{L}{D} + S_f \frac{L^3}{D^2} \cdot \alpha_i (1 - R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i \cdot z) \cdot$$

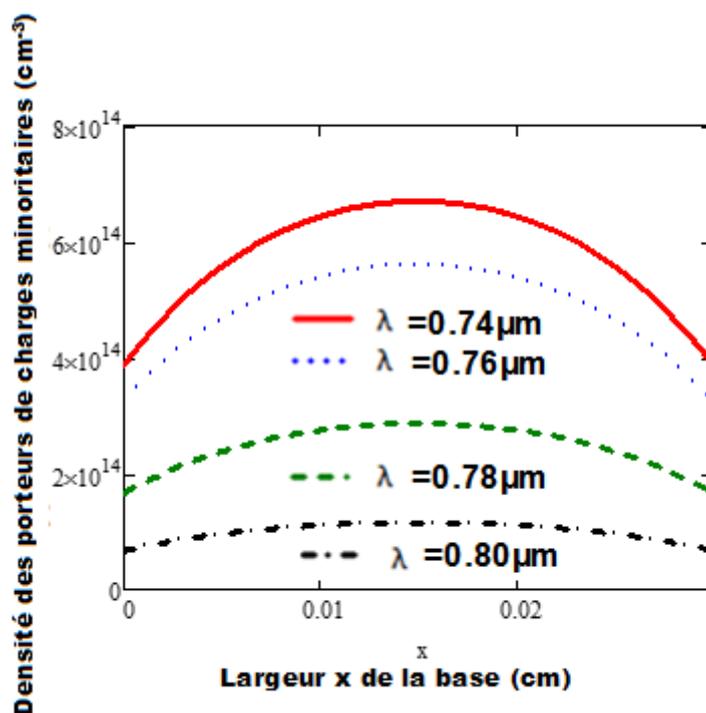
$$A = \frac{-S_f \cdot L^3 \alpha_i (1 - R) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i \cdot z)}{S_f D \cdot L + D^2 \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)}$$

### II.4. Profil de la densité des porteurs minoritaires dans la base :

Les figures ci-dessous nous montrent le profil de la densité des porteurs de charge minoritaires dans la base en fonction de la largeur  $x$  de celle-ci pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$ .







**Figure II.5 :** variation de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x de la base.

$z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_0=0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $S_f=3.10^3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $H=0,03\text{cm}$

La densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x de la base garde le même profil pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$ . Le profil de la densité est symétrique par rapport à l'axe  $x=\frac{H}{2}$  car on a deux jonctions identiques ( $x=0$  et  $x=H$ ) de part et d'autre de la base considérée.

Pour  $0 < x < \frac{H}{2}$ , le gradient de la densité des porteurs minoritaires dans la base est positif et cela correspond à un passage de flux d'électrons à travers la jonction base-émetteur ( $x=0$ ) donnant ainsi un photocourant.

Pour  $x=\frac{H}{2}$ , la densité des porteurs minoritaires dans la base est maximale et son gradient est nul. Plus on s'éloigne de la jonction, plus la densité augmente du fait d'une diminution des recombinaisons en surface.

L'éclairement de même que le dopage étant homogènes, cette zone de la base va avoir une densité de porteurs plus élevée car les recombinaisons y sont moins fortes.

Pour  $\frac{H}{2} < x < H$  le gradient de la densité des porteurs minoritaires de charge est toujours positif car il y'a une autre jonction entre la base et l'émetteur situé à la

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

position  $x=H$  (figure01). Il y'a aussi au niveau de cette jonction un passage de flux d'électrons.

Au niveau des jonctions ( $x=0$  et  $x=H$ ) la densité est minimale car les recombinaisons en surface sont très fortes à ces niveaux.

Nous notons aussi que la densité augmente avec la longueur d'onde dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$  car la génération de porteurs est très élevée avec des photons suffisamment énergétiques et les recombinaisons surfaciques s'amenuisent. Nous constatons un effet inverse dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ , les porteurs photogénérés ont de moins en moins d'énergie et les recombinaisons en volume combinées à celles surfaciques font diminuer la densité.

### **II.5.Profil de la densité de photocourant en fonction de la longueur d'onde :**

Le photocourant de la photopile obtenu à partir du gradient de la densité de porteurs minoritaires est donné par l'expression(10) :

$$J_{ph} = 2q \cdot D \cdot \left. \frac{\partial \delta(x, z, S_f, \lambda, kl, \phi)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (\text{II.10})$$

où  $q$  désigne la charge élémentaire et  $D$  le coefficient de diffusion des électrons dans la base. D'où :

$$J_{ph} = 2q \frac{S_f L^3 \cdot \alpha_i (1 - R) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i \cdot z) \cdot \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)}{S_f \cdot L + D \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)}$$

#### **- Calcul du courant de court-circuit :**

Pour calculer ce courant il faut que :

$$S_f \rightarrow \infty$$

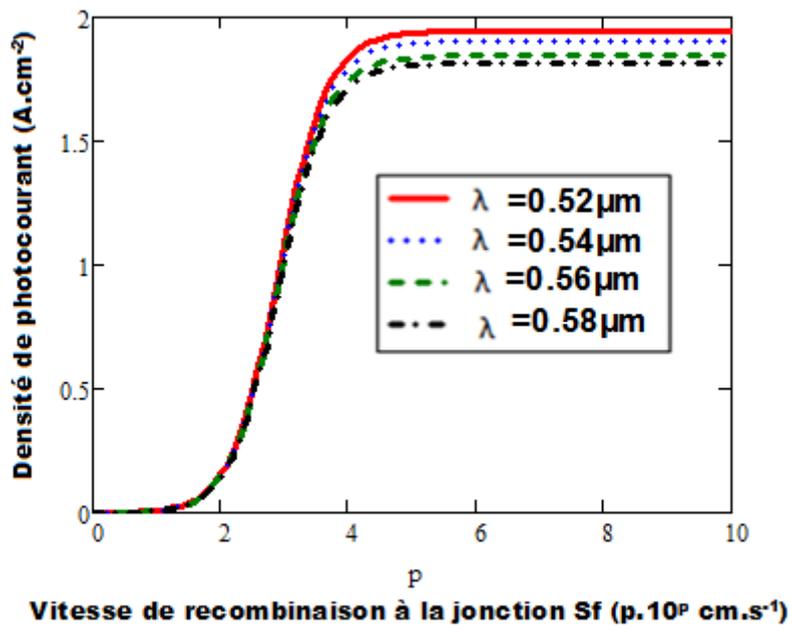
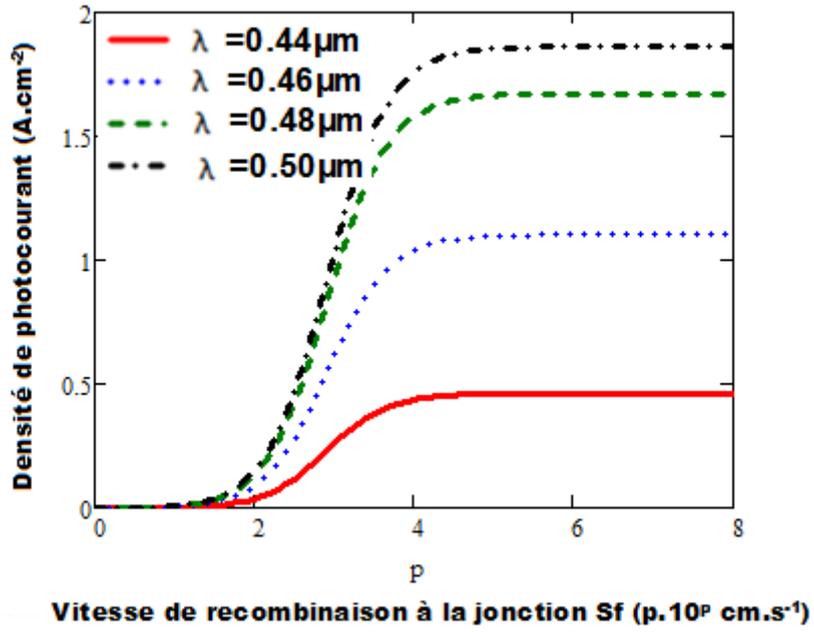
Ce qui donne :

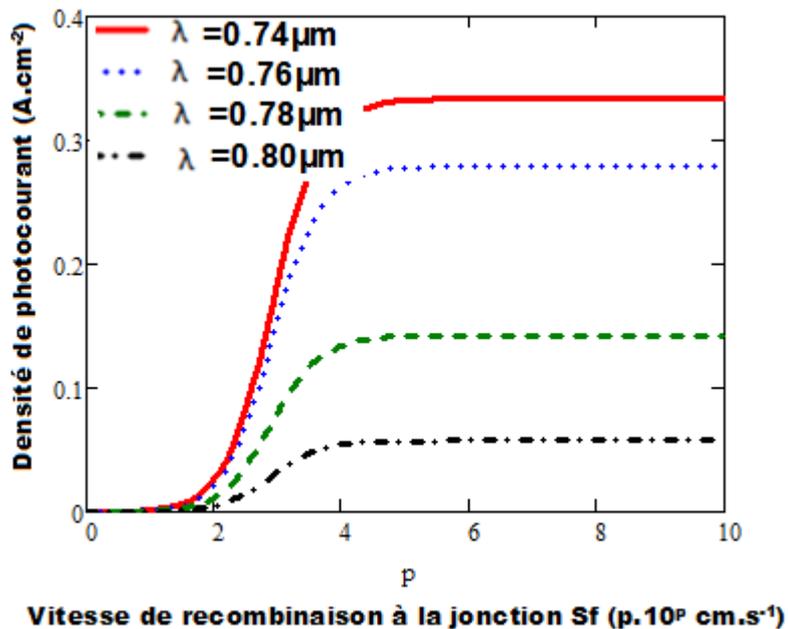
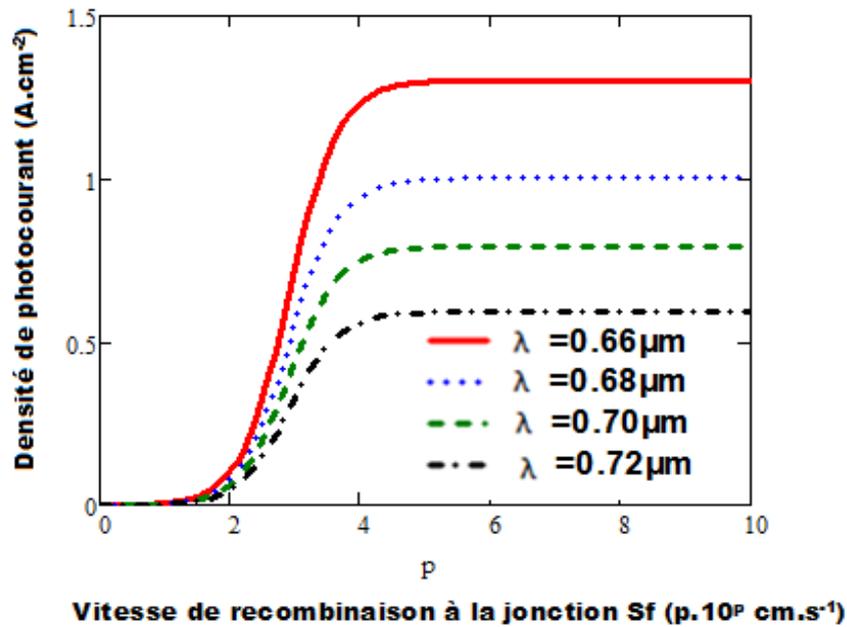
$$J_{Ph} \rightarrow J_{cc}$$

Ainsi on obtient l'expression du courant de court-circuit :

$$J_{cc} = 2q \tanh\left(\frac{H}{2L}\right) \cdot L^2 \cdot \alpha_i (1 - R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i \cdot z) \quad (\text{II.12})$$

Les figures ci-dessous représentent le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$





**Figure II.6** : Variation de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf ( $p \cdot 10^P \text{ cm/s}$ ) pour différentes valeurs de  $\lambda$ .

$z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

La densité de photocourant est nulle pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction traduisant le fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. La situation de circuit-ouvert correspond à un blocage des charges minoritaires à la jonction.

**Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série**

La densité augmente progressivement jusqu'à une valeur asymptotique correspondant au photocourant de court-circuit lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction devient grande.

L'état de court-circuit correspond à un transfert massif des électrons qui arrivent à la jonction vers l'émetteur.

Lorsque la longueur d'onde augmente la densité du photocourant garde le même profil et nous notons une croissance du courant de court-circuit dans l'intervalle [0,40µm ; 0,50µm]

L'augmentation de la longueur d'onde entraîne une croissance de la contribution des porteurs minoritaires de la base dans le courant débité par la photopile parce qu'on a une densité de porteurs qui augmente.

Dans l'intervalle [0,52µm ; 0,80µm], c'est l'effet inverse qui est noté.

**II.6. Vitesse de recombinaison à la jonction en court-circuit :**

La vitesse de recombinaison à la jonction en court-circuit  $S_{fCC}$  est la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction à partir de laquelle le courant de court-circuit s'établit. On a :  $J_{ph}(S_{fCC})=J_{CC}$ .

Ce qui nous permet d'établir l'expression littérale de  $S_{fCC}$  à partir de celle de  $J_{ph}$  (II.13)

. Il vient :

$$S_{fCC}(\lambda, \phi, kl) = \frac{J_{CC} \cdot D \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)}{2q \cdot L^3 \cdot \alpha_r \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_r \cdot z) \cdot \tanh\left(\frac{H}{2L}\right) - L \cdot J_{CC}(\lambda, kl; \phi)} \tag{II.13}$$

Mathématiquement, on obtient la relation suivante :  $\left(\frac{\partial J_{ph}}{\partial S_f}\right)_{S_f=S_{fCC}}=0$

Ce calcul permet d'établir, en fixant trois paramètres, les tableaux II.1 ci-dessous :

**TABLEAU II.1.a :** Variation de  $S_{fCC}$  en fonction de la longueur d'onde :  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $z=0.0001\text{cm}$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.44	0.46	0.48	0.50
$J_{CC}(\text{A} \cdot \text{cm}^2)$	0.48	1.1	1.6	1.7
$S_{fCC}(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.2 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^6$	$2.8 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^6$

**TABLEAU II.1.b :** Variation de  $S_{fCC}$  en fonction de la longueur d'onde :  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $z=0.0001\text{cm}$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.52	0.54	0.56	0.58
$J_{CC}(\text{A} \cdot \text{cm}^2)$	1.80	1.76	1.74	1.72
$S_{fCC}(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.4 \cdot 10^6$	$3.6 \cdot 10^6$	$3.8 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^6$

*Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série*

**TABLEAU II.1.c :** Variation de  $S_{fCC}$  en fonction de la longueur d'onde :  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $z=0.0001\text{cm}$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.66	0.68	0.70	0.72
$J_{CC}(\text{A.cm}^2)$	1.32	0.98	0.72	0.61
$S_{fCC}(\text{cm.s}^{-1})$	$5.2 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^6$	$4.8 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^6$

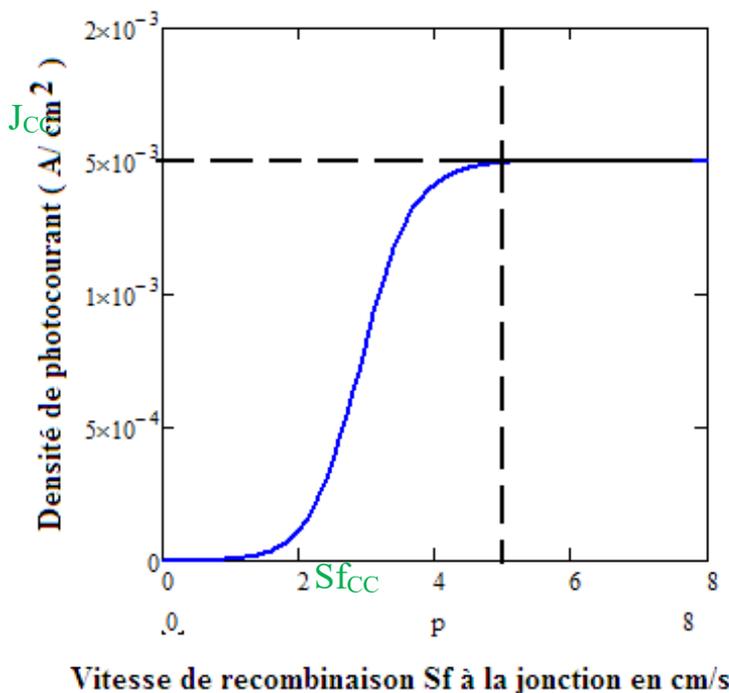
**TABLEAU II.1.d :** Variation de  $S_{fCC}$  en fonction de la longueur d'onde :  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $z=0.0001\text{cm}$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.74	0.76	0.78	0.80
$J_{CC}(\text{A.cm}^2)$	0.35	0.28	0.14	0.06
$S_{fCC}(\text{cm.s}^{-1})$	$5.4 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^6$	$5.8 \cdot 10^6$	$6.0 \cdot 10^6$

La vitesse de recombinaison à la jonction en court-circuit diminue lorsque la longueur d'onde augmente dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$  et augmente dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ . Ce résultat confirme le comportement du courant de court-circuit en fonction de la longueur d'onde.

**II.7. Détermination pratique de  $J_{CC}$  :**

La méthode consiste à tracer l'asymptote horizontale et à repérer le point de la courbe à partir de laquelle on obtient le palier. Ce point a pour abscisse  $S_{fCC}$  et pour ordonnée  $J_{CC}$ . Cette méthode a été développée dans la thèse de **Ly. I [2]**



$z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

**III.8.Profil de la phototension en fonction de la longueur d'onde**

La phototension, créée par l'accumulation de porteurs minoritaires de charge au niveau de jonction, est obtenue à partir de la relation de BOLTSMANN(II.14) :

**Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série**

$$V = V_T \cdot \ln \left[ 1 + \frac{N_b}{n_0^2} \cdot \delta(0, z, \lambda, kl, \phi, Sf) \right] \quad (\text{II.14})$$

$V_T = \frac{KT}{e}$  : tension thermique

$N_b$ : Taux de dopage en atomes accepteurs dans la base

$n_0$ : est la densité de porteurs intrinsèques à l'équilibre thermique. D'où :

$$V_{ph} = \frac{KT}{q} \ln \left\{ 1 + \frac{N_b}{n_0^2} \left[ \frac{D \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)}{S_f L + D \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)} \right] \cdot \frac{L^2}{D} \cdot \alpha_i (1-R) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i \cdot z) \right\} \quad (\text{II.15})$$

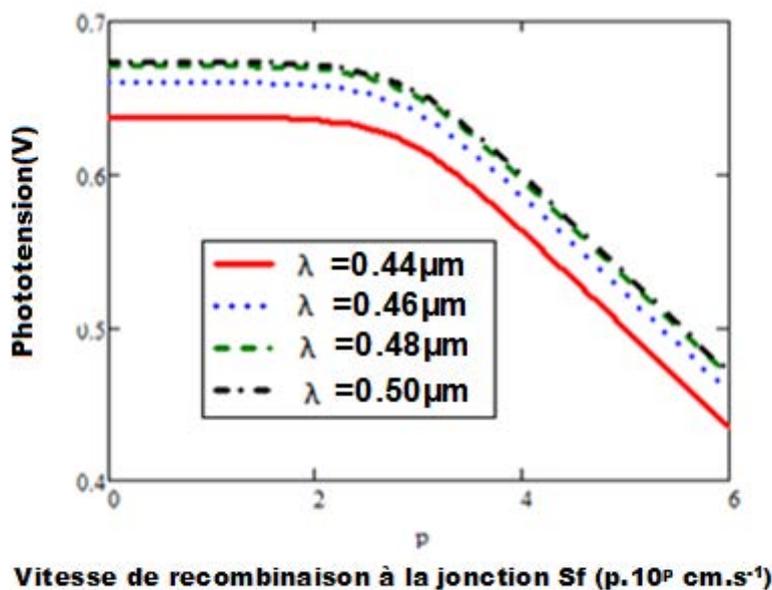
- **Calcul de la tension en circuit ouvert :**

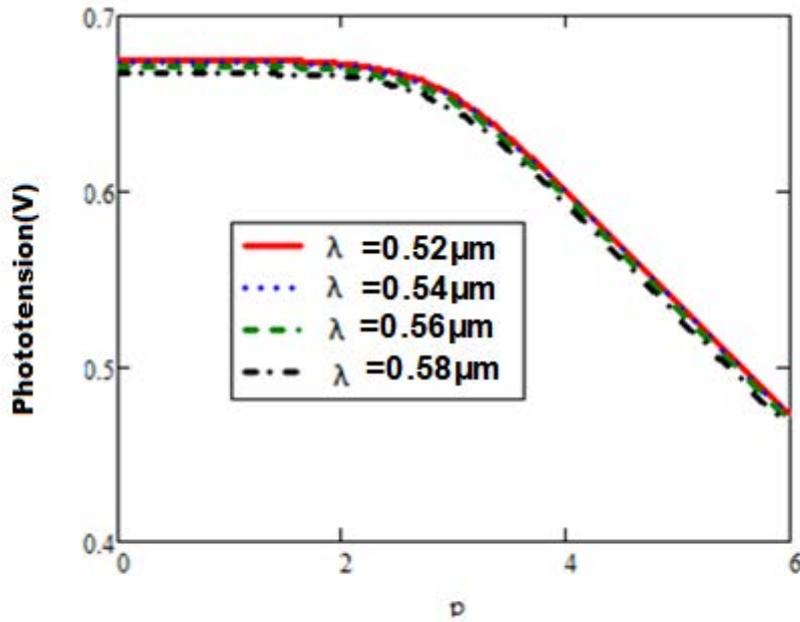
$$Sf \rightarrow 0$$

Ce qui donne :  $V \rightarrow V_{CO}$

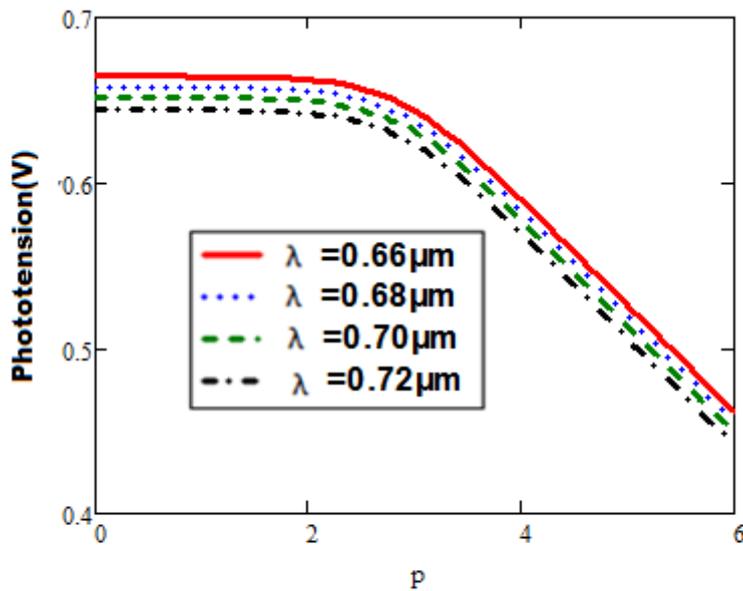
$$V_{co} = \frac{K \cdot T}{q} \ln \left\{ 1 + \frac{N_b}{n_0^2} \frac{L^2}{D} \alpha_i (1-R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i \cdot z) \right\} \quad (\text{II.16})$$

Les figures ci-dessous nous montrent le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $Sf$  ( $p \cdot 10^P$  cm/s) pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$ .

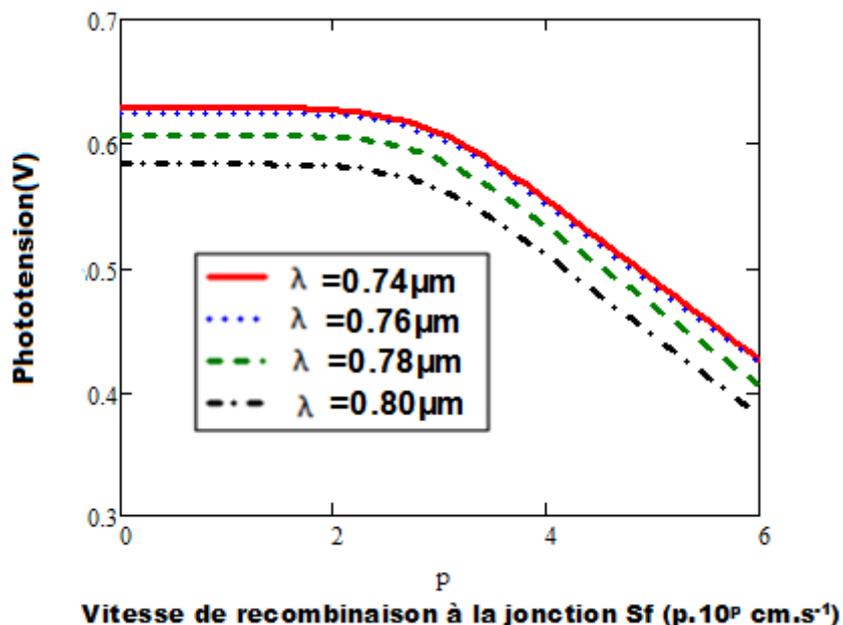




Vitesse de recombinaison à la jonction Sf ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )



Vitesse de recombinaison à la jonction Sf ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )



**Figure II.7** : variation de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  pour différentes valeurs de  $\lambda$   
 $z=0,0001\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{MeV}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

La phototension diminue avec la vitesse de recombinaison  $S_f$ . Pour les grandes valeurs de  $S_f$ , la phototension tend vers la valeur zéro, ce qui correspond au fonctionnement de la photopile en court-circuit. Pour les faibles valeurs de  $S_f$ , il n'y a pas de passage de charge à la jonction, la phototension reste constante et sa valeur correspond à la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$ .

Nous remarquons d'autre part que la phototension est d'autant plus faible que la longueur d'onde  $\lambda$  est petite dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ . L'augmentation de la longueur d'onde provoque une croissance de la valeur de  $V_{co}$  car la quantité de porteurs stockés est plus importante.

Dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ , c'est l'effet inverse qui est noté.

### **II.9. Vitesse de recombinaison à la jonction en circuit ouvert :**

La vitesse de recombinaison à la jonction en circuit ouvert  $S_{fCO}$  est la valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction à partir de laquelle la phototension commence à décroître.

On a:  $V_{ph}(S_{fCO}) = V_{co}$ . D'où est établie l'expression littérale de  $S_{fCO}$ .

*Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série*

$$\text{Il vient : } S_{FCO}(\lambda, \kappa l, \phi) = \frac{\tanh\left(\frac{H}{2L}\right)}{L} \cdot \left[ \frac{L^2 \cdot \alpha_i (1 - R(\lambda)) \cdot F \cdot \exp(-\alpha_i z) - D}{\frac{n_o^2}{N_b} \left( e^{\frac{V_{CO}}{V_T}} - 1 \right)} \right] \quad (\text{II.18})$$

Mathématiquement, on obtient la relation suivante :  $\left( \frac{\partial V_{ph}}{\partial S_f} \right)_{S_f=S_{FCO}} = 0$

Ce résultat permet d'établir, en fixant trois paramètres, les tableaux II.2 ci-dessous.

**TABLEAU II.2.1 :** Variation de  $S_{FCO}$  en fonction de la longueur d'onde :  $\kappa l=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $z=0.0001\text{cm}$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.44	0.46	0.48	0.50
$V_{CO}(\text{V})$	0.64	0.66	0.67	0.68
$S_{FCO} (\text{cm.s}^{-1})$	195	180	177	168

**TABLEAU II.2.2 :** Variation de  $S_{FCO}$  en fonction de la longueur d'onde :  $\kappa l=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $z=0.0001\text{cm}$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.52	0.54	0.56	0.58
$V_{CO}(\text{V})$	0.675	0.674	0.673	0.672
$S_{FCO} (\text{cm.s}^{-1})$	198	210	250	287

**TABLEAU II.2.3 :** Variation de  $S_{FCO}$  en fonction de la longueur d'onde  $\kappa l=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$  ;  $z=0.0001\text{cm}$

$\lambda(\mu\text{m})$	0.66	0.68	0.70	0.72
$V_{CO}(\text{V})$	0.67	0.66	0.65	0.64
$S_{FCO} (\text{cm.s}^{-1})$	645	678	720	764

**TABLEAU II.2.4 :** Variation de  $S_{FCO}$  en fonction de la longueur d'onde  $\kappa l=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$  ;  $z=0.0001\text{cm}$

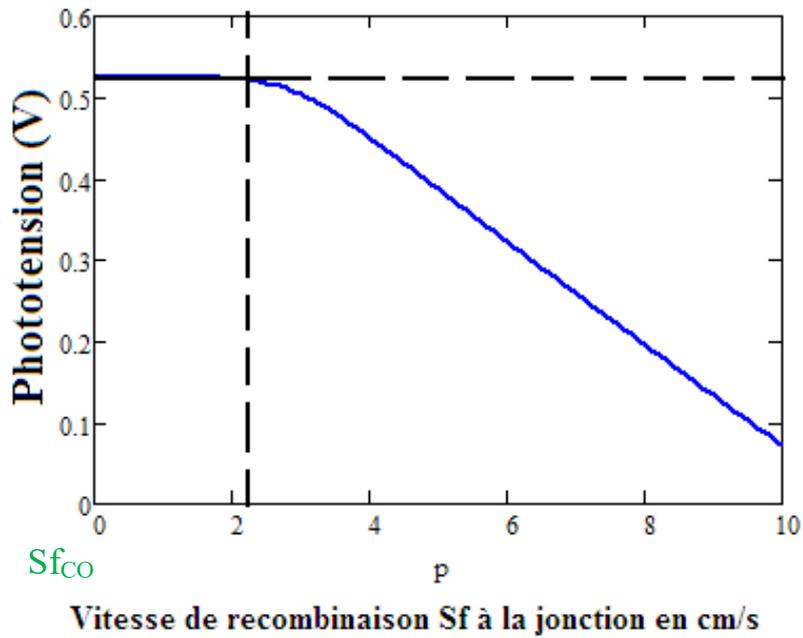
$\lambda(\mu\text{m})$	0.74	0.76	0.78	0.80
$V_{CO}(\text{V})$	0.63	0.62	0.61	0.58
$S_{FCO} (\text{cm.s}^{-1})$	983	1230	1565	1985

La vitesse de recombinaison à la jonction en circuit ouvert  $S_{FCO}$  diminue dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$  et augmente dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ , du fait du comportement de la densité des porteurs photogénérés en fonction de la longueur d'onde.

**II.10. Détermination pratique de  $V_{CO}$  :**

La méthode consiste à tracer l'asymptote horizontale et à repérer le point de la courbe à partir de laquelle on obtient le palier. Ce point a pour abscisse  $S_{FCO}$  et pour ordonnée  $V_{CO}$ . Cette méthode a été développée dans la thèse de Ly.I [2]

$V_{co}$

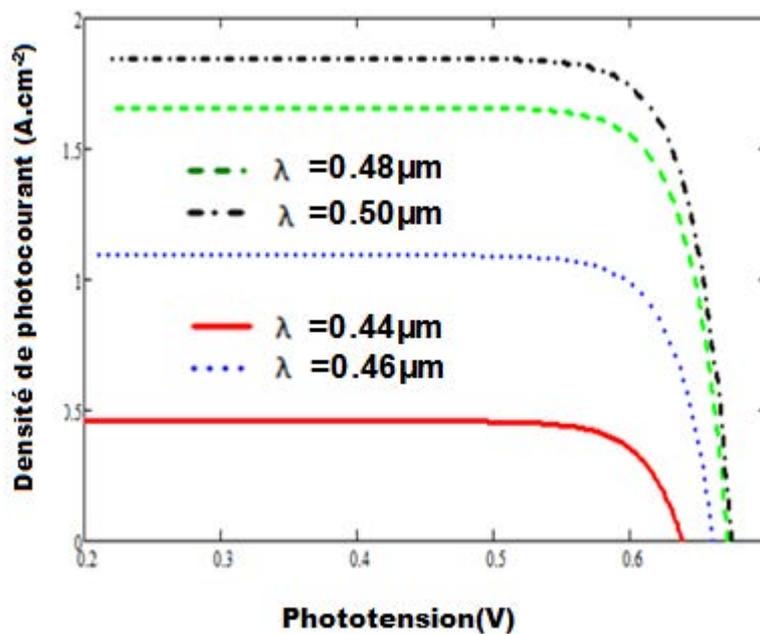


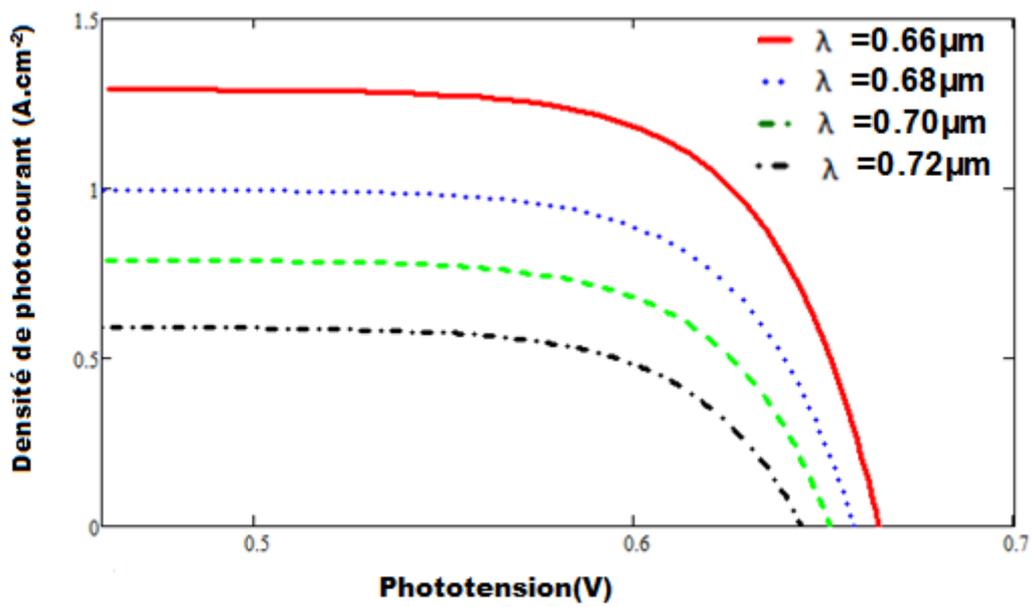
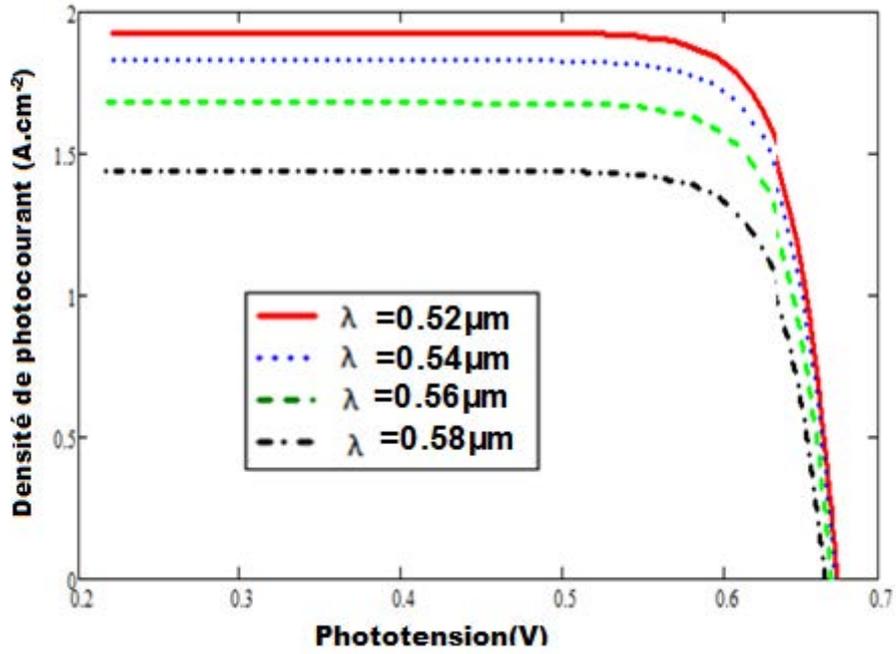
$z=0,0001\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

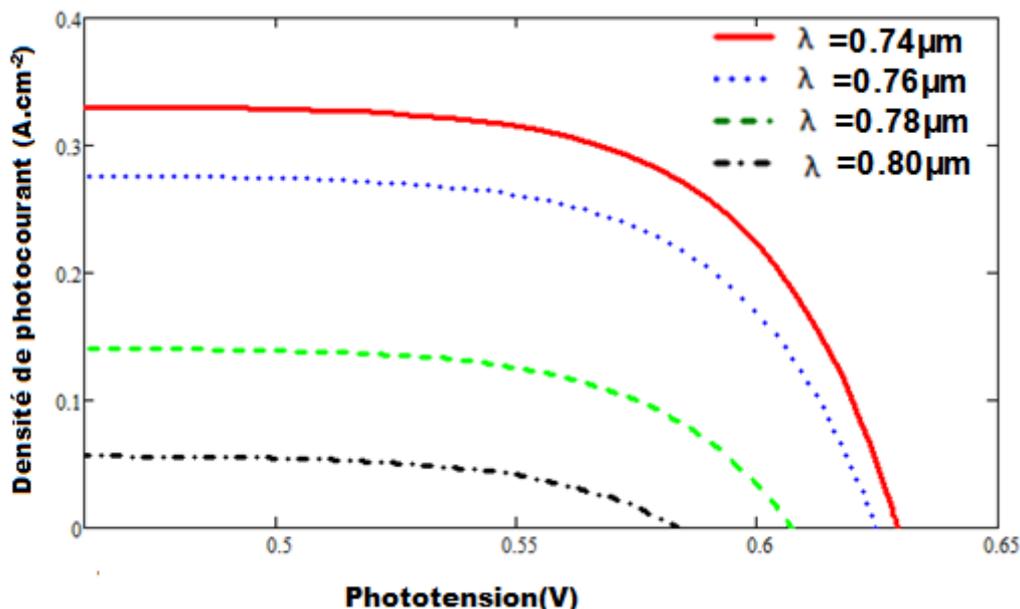
## II.11.Parametres électriques de la photopile

### II.11.1.Caractéristique V-I

Les figures ci-dessous nous montrent le profil de la densité de photocourant en fonction de la phototension.







**Figure II.8** : Caractéristique V-I de la photopile

$z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

L'analyse de la caractéristique montre que la phototension n'est pas indépendante du photocourant. [Sissoko et al, 1998; Samb et al, 2010]

Sissoko et al en ont déduit que la photopile présente deux modes de fonctionnement. La photopile se comporte comme un générateur de tension réel au voisinage du circuit ouvert et comme un générateur de courant réel au voisinage du court-circuit. Pour chaque mode de fonctionnement, un circuit électrique équivalent à la photopile est proposé.

### II.11.2. Résistance shunt

Lorsque la photopile se comporte comme un générateur de courant réel, le circuit électrique équivalent à la photopile est comme suit : [Dione et al, 2009 ; Mbodj et al, 2012]



**Figure II.9** : Circuit équivalent de la photopile (générateur de courant)

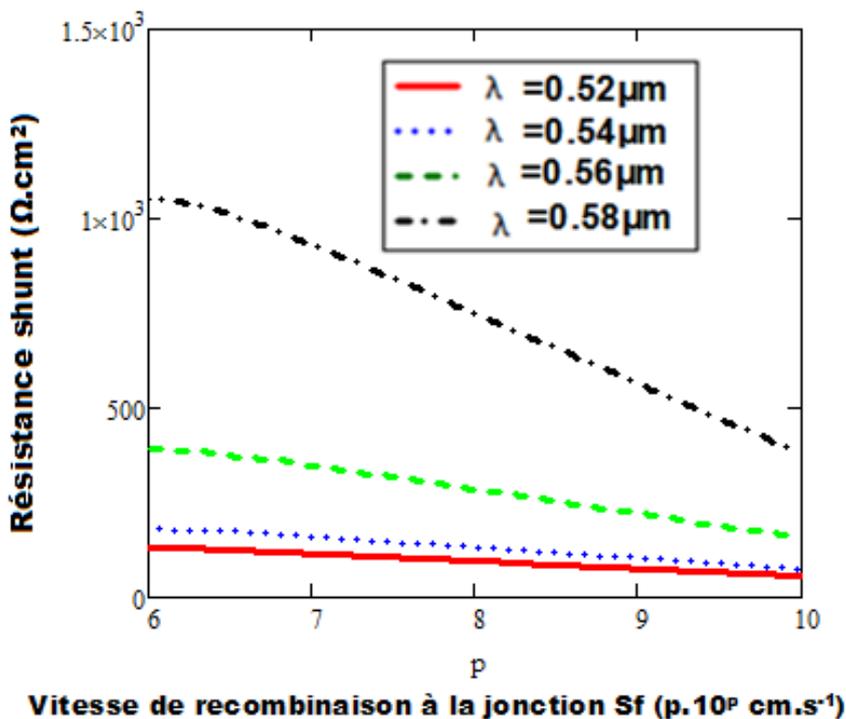
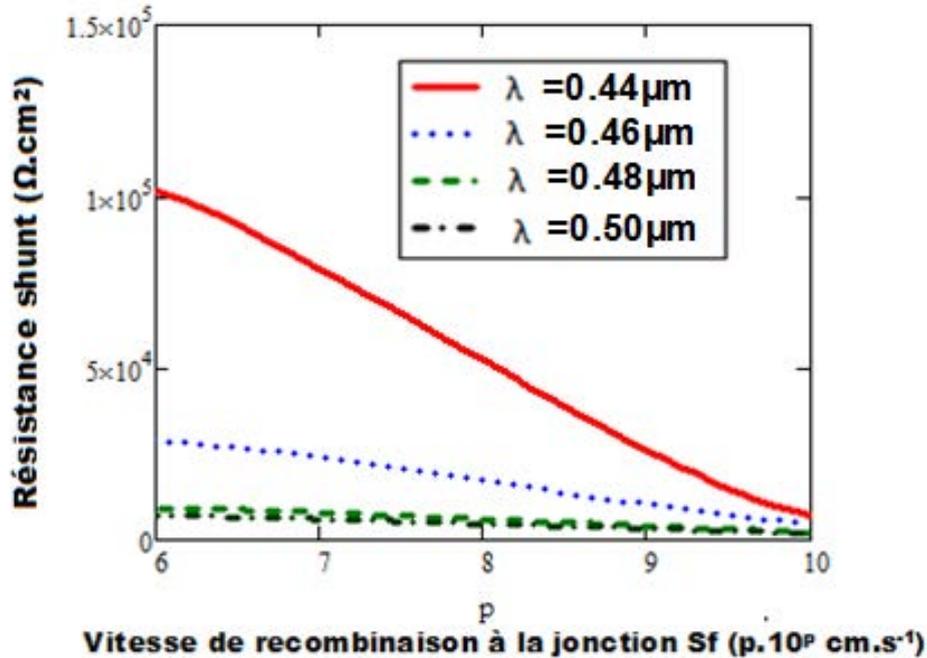
L'étude de ce circuit électrique, nous permet d'établir l'expression de la résistance shunt : [Samb et al ,2010 ;Ly Diallo et al,2012]

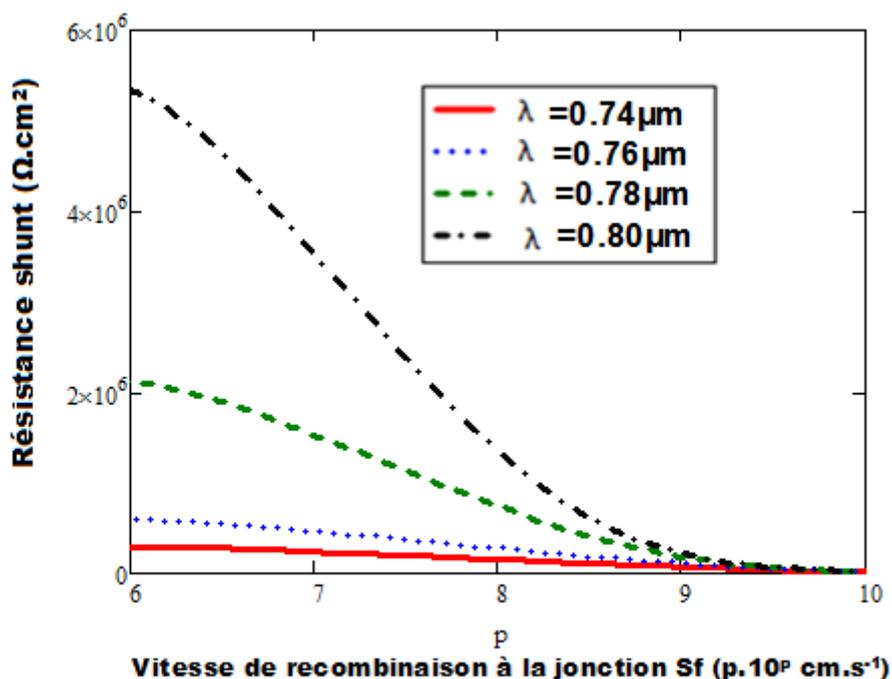
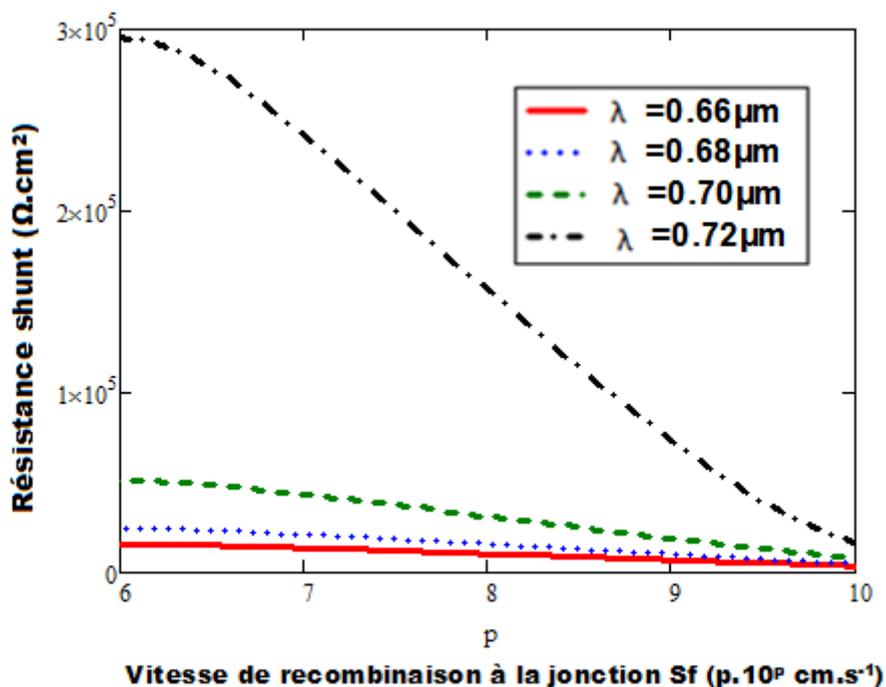
*Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série*

$$R_{SH}(S_f, \lambda, kl, \phi, z) = \frac{V_{PH}(S_f, \lambda, kl, \phi, z)}{J_{CC}(\lambda, kl, \phi, z) - J_{PH}(S_f, \lambda, kl, \phi, z)} \quad (II.19)$$

$J_{CC}$  représente la densité de photocourant en court-circuit.

Les figures ci-dessous représentent le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pour différentes valeurs de longueur d'onde.





**Figure II.10 :** Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$ .  $z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

Pour différentes valeurs de la longueur d'onde, on obtient le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction à la figure 07.

La résistance shunt diminue tout en gardant le même profil lorsque la longueur d'onde  $\lambda$  augmente dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ .

Lorsque la longueur d'onde augmente, on assiste à une croissance du courant de court-circuit.

L'augmentation du courant de court-circuit s'accompagne de l'existence de courants de fuite. La résistance shunt modélisant les courants parasites ; lorsque ceux-ci augmentent de valeur les résistances shunt correspondantes diminuent.

Compte tenu des valeurs de résistances shunt et de phototension obtenues les courants de fuite ont très peu d'impact sur le courant débité par la photopile.

Dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ , c'est l'effet inverse qui est noté.

En donnant à  $S_f$ , vitesse de recombinaison à la jonction, une valeur au voisinage du court-circuit nous pouvons dresser le tableau ci-dessous :

**Tableau II.3.1** : Résistance shunt en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  pour  $S_f= 7.10^7$  cm/s

$S_f$	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,44	0,46	0,48	0,50
$R_{SH}$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	$7,5.10^4$	$2,4.10^4$	$1,2.10^4$	$1,1.10^4$

**Tableau II.3.2** : Résistance shunt en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  pour  $S_f= 7.10^7$  cm/s

$S_f$	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,52	0,54	0,56	0,58
$R_{SH}$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	200	300	450	1100

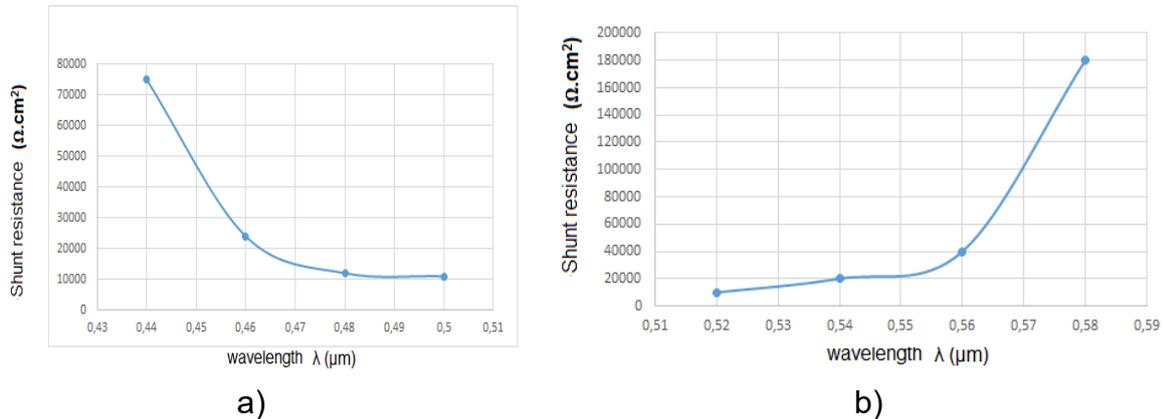
**Tableau II.3.3** : Résistance shunt en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  pour  $S_f= 7.10^7$  cm/s

$S_f$	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,66	0,68	0,70	0,72
$R_{SH}$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	$0.2.10^5$	$0.3.10^5$	$0.5.10^5$	$2.2.10^5$

**Tableau II.3.4** : Résistance shunt en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  pour  $S_f= 7.10^7$  cm/s

$S_f$	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s	$7.10^7$ cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,74	0,76	0,78	0,80
$R_{SH}$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	$0.23.10^6$	$0.4.10^6$	$1.8.10^6$	$3.6.10^6$

Ce qui nous permet de tracer les graphes  $R_{SH}=f(\lambda)$



**Figure II.11** : Résistance shunt en fonction de la longueur d'onde

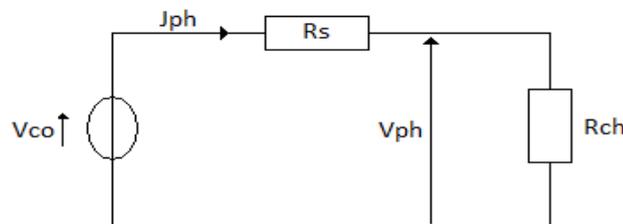
$z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

Dans l'intervalle de longueur d'onde  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ , la densité de photocourant augmente avec la longueur d'onde; ce qui occasionne des courants de fuite plus importants d'où une diminution de la résistance shunt.

Dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$  c'est l'effet inverse qui est noté.

### II.11.3.Résistance série

Le modèle électrique équivalent à la photopile lorsqu'elle fonctionne comme un générateur de tension réel est comme suit : [\[Dione et al, 2009 ; Mbodj et al, 2012\]](#)



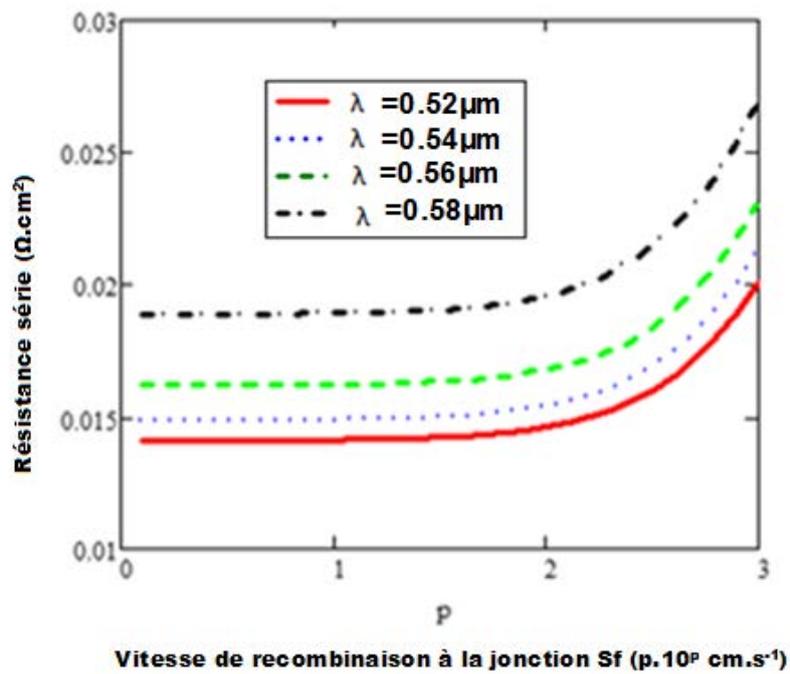
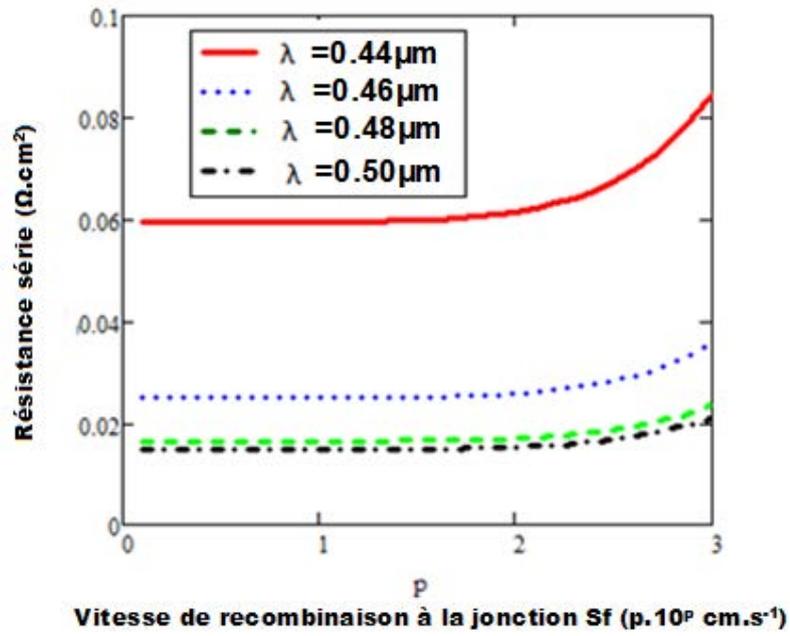
**Figure II.12** : Circuit équivalent de la photopile (générateur de tension)

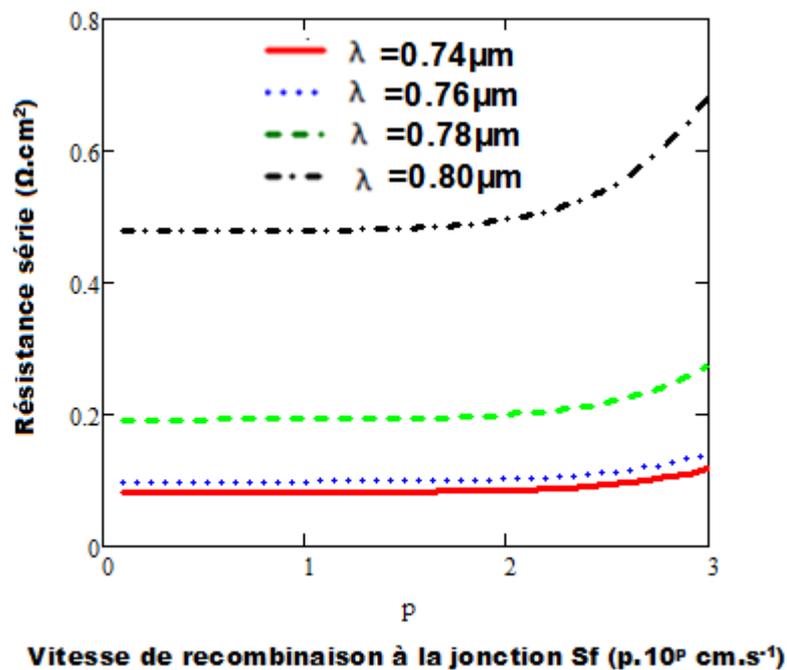
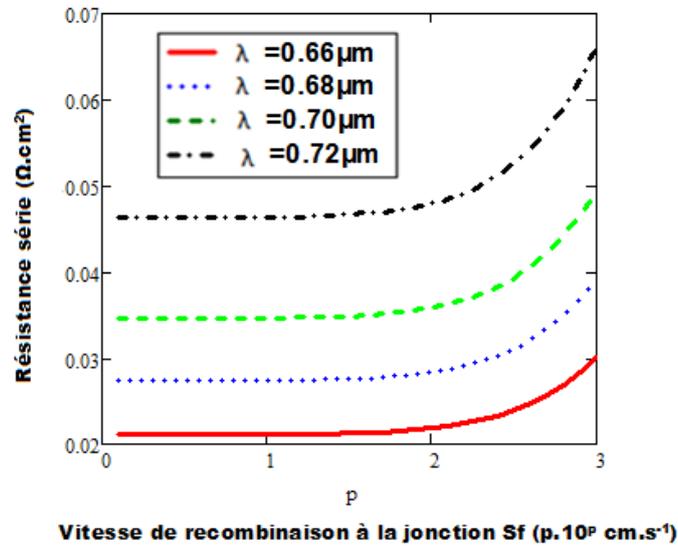
De l'étude de ce circuit électrique, l'expression de la résistance est déduite : [\[Samb et al ,2010 ; Ly Diallo et al, 2012\]](#)

$$R_s(S_f, \lambda, kl, \phi, z) = \frac{V_{CO}(\lambda, kl, \phi, z) - V_{PH}(S_f, \lambda, kl, \phi, z)}{J_{PH}(S_f, \lambda, kl, \phi, z)} \quad (\text{II.20})$$

Les figures ci-dessous représentent le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p.10^p \text{ cm.s}^{-1}$ ) pour différentes valeurs de longueur d'onde.

*Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série*





**Figure II.13 :** Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$ .  
 $z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{MeV}$ ;  $H=0,03\text{cm}$   
 Pour différentes valeurs de la longueur d'onde, on obtient le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction aux figures II.13.  
 Ce profil est le même pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

## Chapitre II : Etude de l'effet de la longueur d'onde sur les résistances shunt et série

Lorsque la longueur d'onde augmente la densité de photocourant augmente dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ , ce qui signifie que les effets résistifs du matériau diminuent donc la résistance série.

Nous avons des effets contraires dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ .

En donnant à  $S_f$ , vitesse de recombinaison à la jonction, une valeur au voisinage du circuit ouvert, nous pouvons dresser le tableau ci-dessous :

**Tableau II.4.1** : Résistance série en fonction de la longueur  $\lambda$  pour  $S_f=10\text{ cm/s}$

$S_f$	10cm/s	10cm/s	10cm/s	10cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,44	0,46	0,48	0,50
$R_s$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	0,06	0,024	0,018	0,016

**Tableau II.4.2** : Résistance série en fonction de la longueur  $\lambda$  pour  $S_f=10\text{ cm/s}$

$S_f$	10cm/s	10cm/s	10cm/s	10cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,52	0,54	0,56	0,58
$R_s$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	0,013	0,015	0,016	0,018

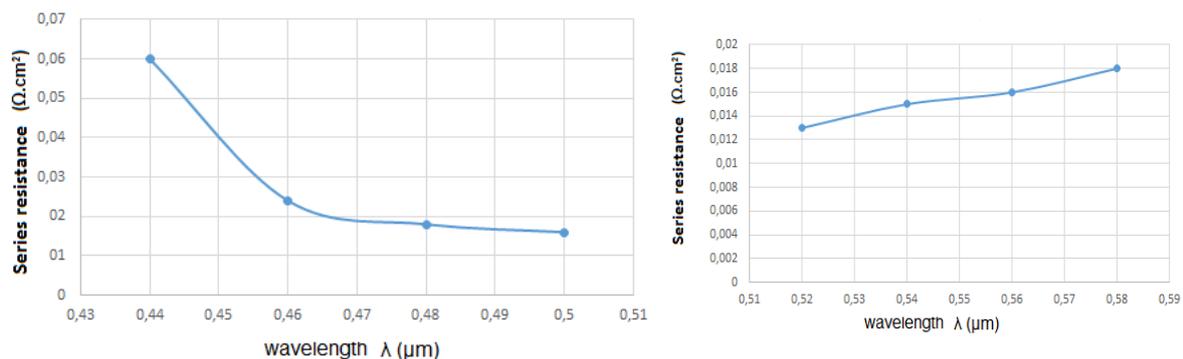
**Tableau II.4.3** : Résistance série en fonction de la longueur  $\lambda$  pour  $S_f=10\text{ cm/s}$

$S_f$	10cm/s	10cm/s	10cm/s	10cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,66	0,68	0,70	0,72
$R_s$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	0.021	0.028	0.035	0.048

**Tableau II.4.4** : Résistance série en fonction de la longueur  $\lambda$  pour  $S_f=10\text{ cm/s}$

$S_f$	10cm/s	10cm/s	10cm/s	10cm/s
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,74	0,76	0,78	0,80
$R_s$ ( $\Omega.\text{cm}^2$ )	0.08	0.1	0.2	0.5

Ce qui nous permet de tracer les graphes  $R_s=f(\lambda)$



**Figure II.14** : Résistance série en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  pour  $S_f=10\text{ cm/s}$   
 $z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_o=0,01\text{cm}$ ;  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\phi=50\text{Mev}$ ;  $H=0,03\text{cm}$

Dans l'intervalle de longueur d'onde  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ , la résistance série diminue avec la longueur d'onde car la densité de photocourant augmente; Ce qui signifie que les pertes de conduction diminuent parce que la résistivité du matériau diminue. Nous avons des effets contraires dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ .

## **CONCLUSION**

La résolution de l'équation de continuité nous a permis d'établir l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile. De cette densité, les expressions de la densité de photocourant et de la phototension en fonction de la longueur d'onde ont été déduites.

A partir de modèles électriques équivalents, les expressions des résistances série et shunt ont été établies.

L'influence de la variation de longueur d'onde sur toutes grandeurs électriques a été étudiée.

L'étude a été faite dans le domaine du visible.

Nous avons noté que dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ , la densité des électrons dans la base augmente avec la longueur d'onde car la génération des porteurs minoritaires dans la base domine les recombinaisons, ce qui a entraîné la croissance du courant de court-circuit, de la phototension en circuit ouvert et une décroissance des paramètres électriques de la photopile.

L'étude théorique nous a révélé que le fonctionnement de la photopile est optimal dans cet intervalle.

Dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ , nous avons noté des phénomènes contraires.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1].Flèche, B. et Delagnes, D., Energie solaire photovoltaïque, STI ELT, juin2007, 18p.
- [2].Ly, I., paramètres électriques d'une photopile bifaciale en régime statique en fonction des vitesses de recombinaison : effet du niveau d'éclairement, Dakar, UCAD, thèse unique, 2012,142p.
- [3]Dème ,M.M., Etude à trois dimensions d'une photopile monofaciale en régime statique sous éclairement polychromatique constant et sous différents angles d'incidence de l'éclairement, Dakar, UCAD, Thèse 3<sup>ième</sup> cycle,2008,102p.
- [4] Sayad, Y., Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière-matiere, Lyon ,INSA ,THESE,2009,136p.
- [5] Sissoko ,G et al., 'A method to determine the solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (Sf)' ,Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 6(2) (2011), pp.103-114
- [6] Ndiaye,M., Détermination des paramètres électriques d'une photopile monofaciale en régime dynamique fréquentiel sous éclairement monochromatique, Dakar,UCAD,Thèse doctorat 3<sup>ieme</sup>,2008,85p.
- [7] DIONE, M.M., Etude en régime statique d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairement monochromatique constant, Dakar, UCAD , mémoire masterII, 2009,53p.
- [8] Sissoko, G.et al., Determination of the Recombinaison and Electrical Paramerers of a Vertical Multijonction Silicon Solar Cell, Research journal of applied sciences,Engineering and technology,Maxwell Scientific Organization,2012,6p.
- [9]. Sissoko, G.et al.,Theoretical Study of the Influence of Irradiation on a Silicon Solar Cell under Multispectral illumination, Research journal of applied sciences,Engineering and technology, Maxwell Scientific Organization,2012,6p.
- [10].F, WISE. Vertical junction solar cell, U.S Patent 3690953, (1970)
- [11] SARR, S., Détermination des paramètres électriques d'une photopile, UCAD, FST, Energie solaire, mémoire masterII, 2005,57p.
- [12] SARR, S., Détermination des paramètres électriques d'une photopile, UCAD, FST, Energie solaire, mémoire masterII, 2005,57p.
- [13]Diallo.H.L, B.Dieng, I.Ly, M.M.Dione ,M.Ndiaye ,O.H.Lemrabott ,Z.N.Bako, A.Wareme, G.Sissoko., Determination of the recombination and electrical parameters of a vertical multijunction silicon solar cell, Research Journal of Applied sciences, Maxwell scientific organization, 2012 , 4(16),pp :2626-2631

[14]SAHIN, G., Détermination des paramètres électriques d'une photopile à jonction verticale sous éclairage monochromatique en modulation de fréquence à partir de la caractéristique I-V, Dakar, UCAD, mémoire masterII ,2011 ,48p.

[15]S.Mbodj, I.Ly, H.L.Diallo, M.M.Dione ,O.Diasse, G.Sissoko., Modeling study of N<sup>+</sup>/P Solar Cell Résistances from Single I-V characteristics curve considérant the Junction recombinaison velocity,Research Journal of Applied sciences, Maxwell scientific organization, 2012.4(1) pp :1-7

[16] G.Sissoko ,E.Nanema,A.Correa,P.M.Biteye,M.Adj,A.L.Ndiaye. , silicon solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic,Renewable energy, vol 3, pp 1848-1851,Elsevier science Ltd, 1998.

[17]M.M.Dione,H.L.Diallo,M.Wade,I.Ly,M.Thiame,F.Toure,A.C.Gueye,N.Dieme, Z.N.Bako,S.Mbodj,F.IBarro,G.Sissoko. ,Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light Proceedings of the 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference (2011)-1CV.6 .pp: :2 5 0 - 2 5 4

[18] M.L.Samb, M.Zoungrana ,F.Toure,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 éclairage multispectral, journal des sciences, Vol 10,N°4 ,2010.pp :23-38

**Chapitre III : Etude de l'effet de l'irradiation sur les paramètres électriques de la photopile**

**Chapitre III : Etude de l'effet de l'irradiation sur les paramètres électriques de la photopile**

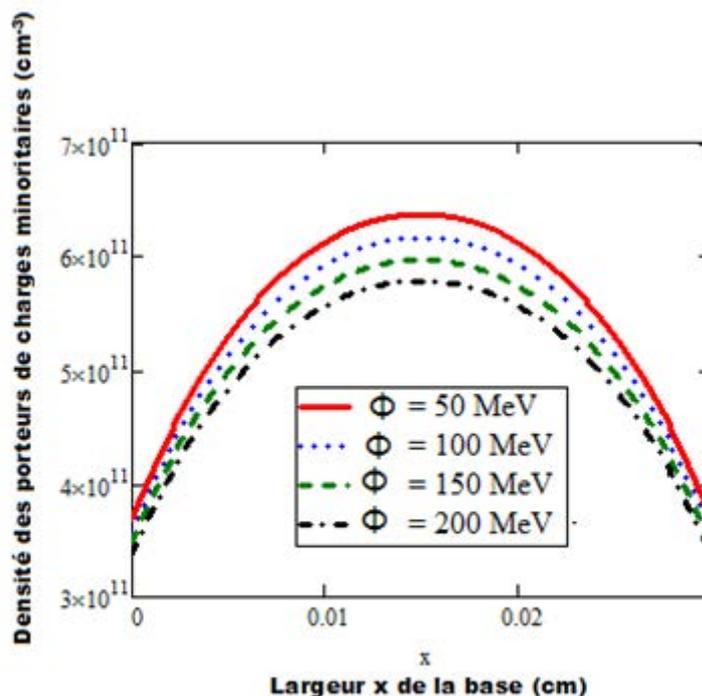
**Introduction**

L'irradiation est un phénomène qui peut être naturel ou artificiel. Dans l'espace comme sur terre les photopiles y sont souvent confrontées et elle a des impacts sur leur fonctionnement normal.

Ce chapitre traite des effets de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage sur la densité des électrons dans la base, la densité de photocourant, la phototension ainsi que les résistances shunt et série.

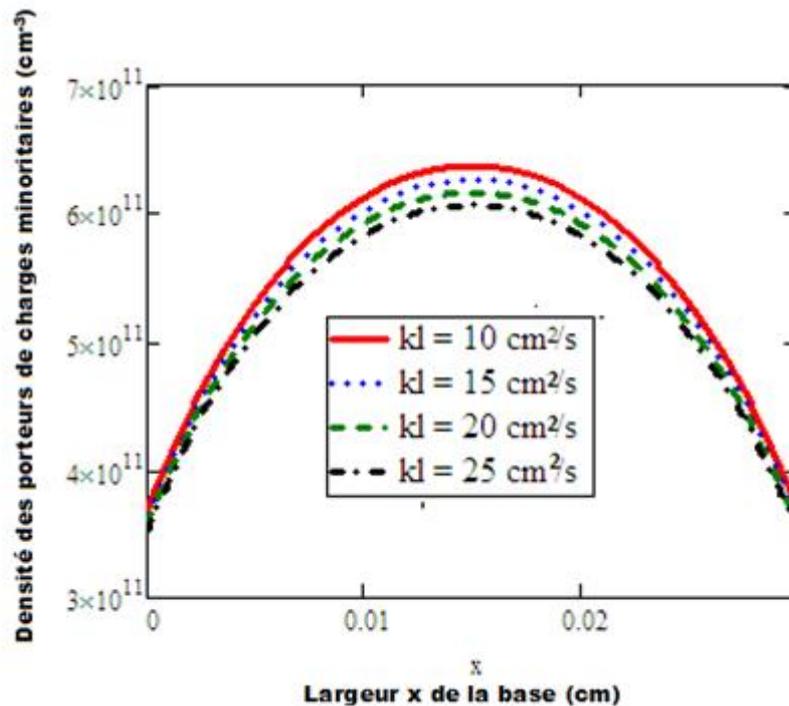
**III.1. Profil de la densité des porteurs minoritaires dans la base :**

Les figures III.1 et III.2 nous montrent le profil de la densité des porteurs de charge minoritaires dans la base en fonction de la largeur  $x$  de celle-ci pour respectivement différentes valeurs du coefficient de dommage et de l'énergie d'irradiation.



**FIGURE III.1 :** profil de la densité des électrons dans la base en fonction de la largeur de la base.

$S_f = 3.10^3 \text{cm/s}$  ;  $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$  ;  $H = 0,03 \text{m}$  ;  $Z = 0,0001 \text{cm}$  ;  $L_0 = 0,01 \text{cm}$ ,  $kl = 10 \text{cm/s}^2$ ,



**FIGURE III.2** : profil de la densité des électrons dans la base en fonction de la largeur de la base.

$S_f = 3.10^3 \text{ cm/s}$  ;  $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$  ;  $H = 0,03 \text{ m}$  ;  $Z = 0,0001 \text{ cm}$  ;  $L_o = 0,01 \text{ cm}$ ,  $kl = 10 \text{ cm}^2/\text{s}^2$

La densité des électrons est minimale au niveau des jonctions ( $x=0$  et  $x=H$ ) et maximale au milieu de la base.

Nous constatons aussi que la densité diminue lorsque le coefficient de dommage augmente. Le même constat est fait avec l'énergie d'irradiation.

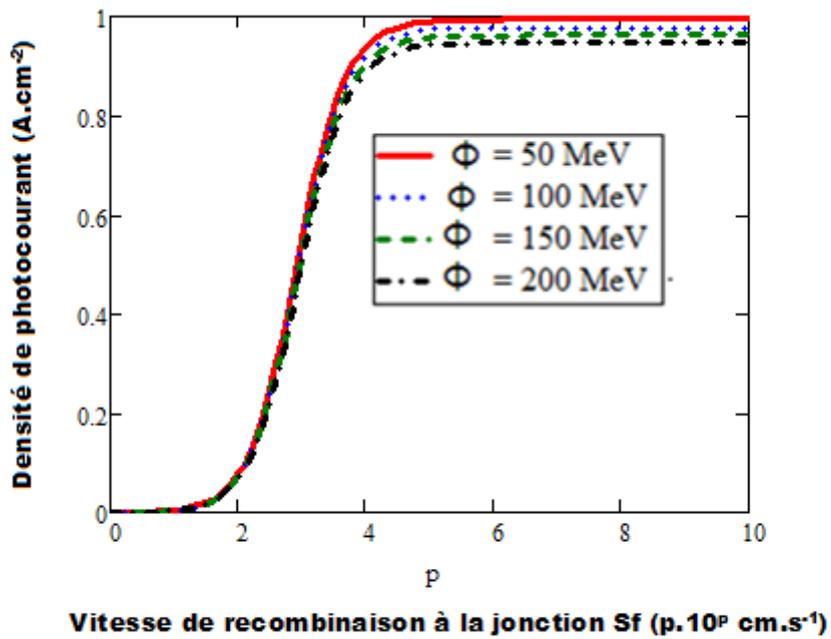
Au niveau des jonctions, les recombinaisons surfaciques sont très fortes à cause notamment des trous venant du côté de la zone de charge d'espace situé dans la base et qui sont propulsés par le champ électrique interne.

Au milieu de la base la densité est maximale parce que les phénomènes de recombinaison y sont moins développés.

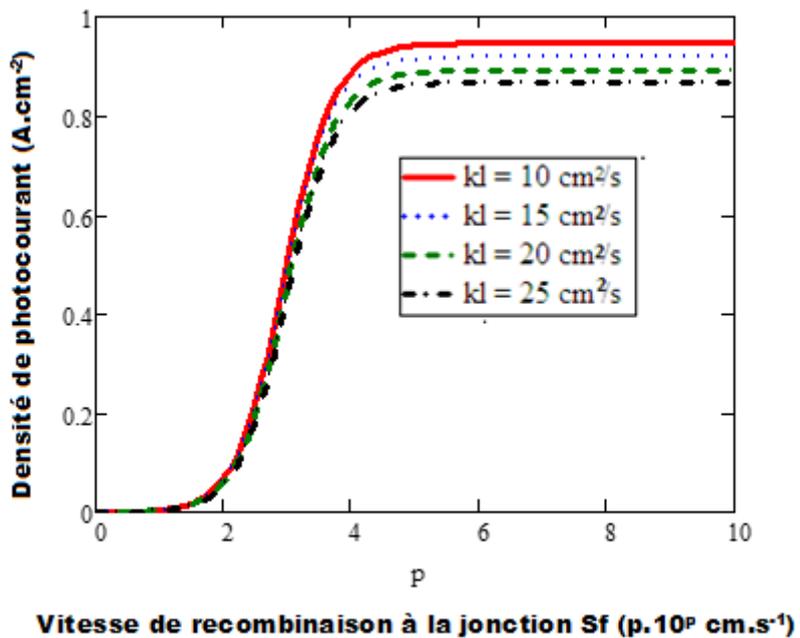
L'irradiation provoque la multiplication des centres de recombinaison, ce qui a pour effet de réduire la densité des porteurs minoritaires dans la base.

### III.2. Profil de densité de photocourant :

Les figures III.3 et III-4 représentent le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour respectivement différentes valeurs de l'énergie d'irradiation et le coefficient de dommage.



**FIGURE III.3** : profil de la densité de photocourant en fonction de Sf  
 $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_0= 0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm}^2/\text{s}^2$



**FIGURE III.4** : profil de la densité de photocourant en fonction de Sf  
 $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_0= 0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$

### Chapitre III : Effet de l'irradiation sur les résistances shunt et série

Lorsque  $S_f$  prend de faibles valeurs, la densité de photocourant est quasi nulle, ce qui traduit le fonctionnement de la photopile en circuit ouvert.

Pour les grandes valeurs de  $S_f$ , la densité de photocourant prend une valeur asymptotique correspondant au courant de court-circuit mettant en évidence une traversée massive des électrons au niveau des jonctions.

Le courant de court-circuit diminue avec les paramètres d'irradiation parce que la densité des électrons dans la base diminue.

#### III.3. Influence de l'irradiation sur $S_{fCC}$

**TABLEAU III.1:** Variation de  $S_{fCC}$  en fonction du coefficient de dommage

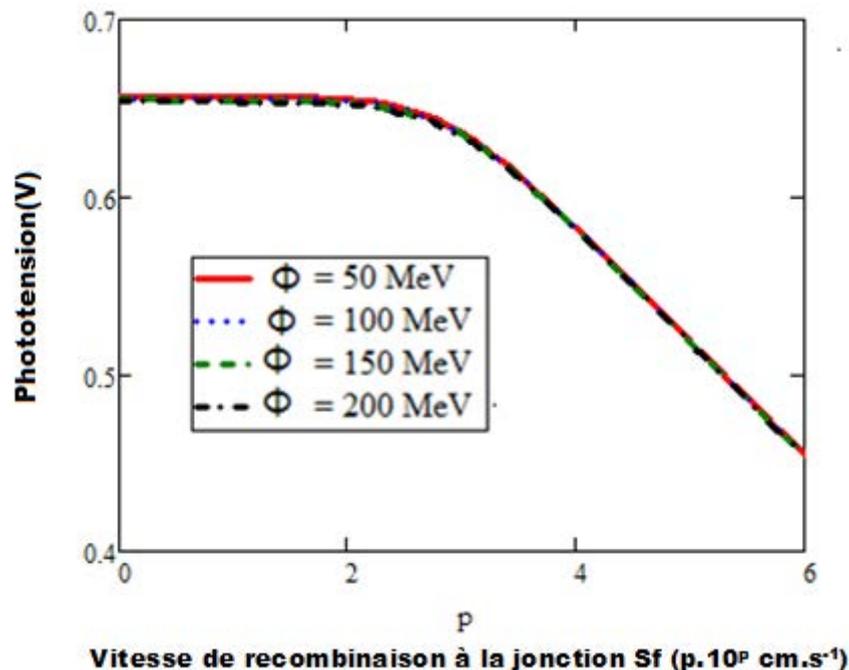
$kl$ ( $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ )	0.9010	15	20	25
$J_{CC}$ ( $\text{A}.\text{cm}^2$ )	0.95	0.90	0.85	0.82
$S_{fCC}$ ( $\text{cm}.\text{s}^{-1}$ )	$5.8 \cdot 10^6$	$6.2 \cdot 10^7$	$6.5 \cdot 10^7$	$6.9 \cdot 10^7$

**TABLEAU III.2:** Variation de  $S_{fCC}$  en fonction de l'énergie d'irradiation

$\Phi$ (MEV)	50	100	150	200
$J_{CC}$ ( $\text{A}.\text{cm}^2$ )	1.00	0.98	0.94	0.86
$S_{fCC}$ ( $\text{cm}.\text{s}^{-1}$ )	$5.2 \cdot 10^5$	$9.8 \cdot 10^5$	$6.4 \cdot 10^6$	$5.7 \cdot 10^7$

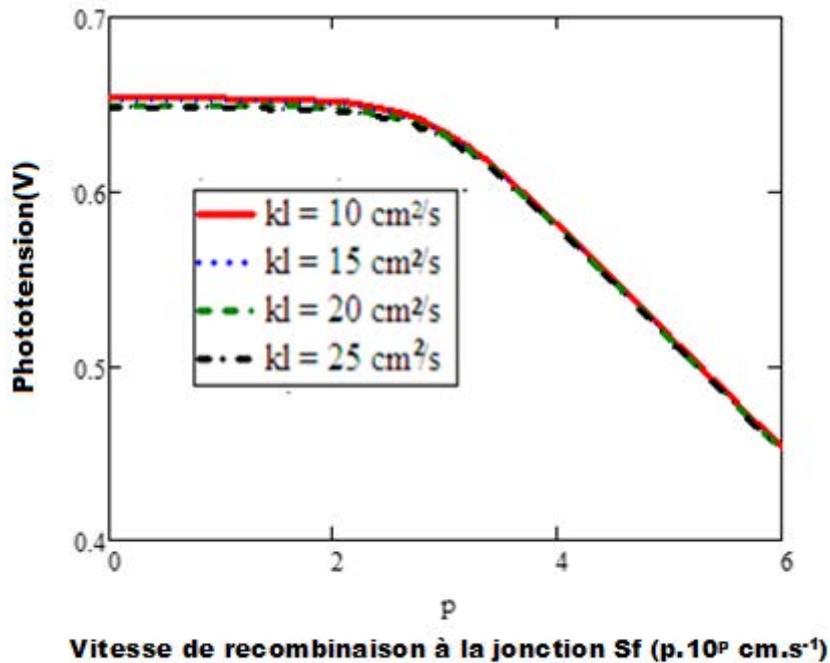
La vitesse de recombinaison à la jonction en court-circuit augmente avec le coefficient de dommage de même qu'avec l'énergie d'irradiation. L'irradiation multiplie les centres de recombinaisons.

#### III.4. Profil de la phototension



**FIGURE III.5 :** profil de la phototension en fonction de  $S_f$

$\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$



**FIGURE III.6** : profil de la phototension en fonction de Sf

$\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$

Pour les faibles valeurs de Sf, la phototension est constante et correspond à la tension de circuit ouvert.

Le fonctionnement de la photopile au voisinage du circuit ouvert traduit un stockage massif de charges de part et d'autre des jonctions.

La phototension en circuit ouvert diminue avec les paramètres d'irradiation car la densité des électrons diminue lorsque l'énergie d'irradiation ou le coefficient d'irradiation augmente.

A cause de l'augmentation du taux de recombinaison entretenu par l'irradiation, la quantité de charges stockées de part et d'autre de la jonction diminue entraînant celle de la phototension en circuit ouvert.

### III.5. Influence de l'irradiation sur $S_{fCO}$

**TABLEAU III.3:** Variation de  $S_{fCO}$  en fonction du coefficient de dommage

$kl$ ( $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ )	10	15	20	25
$V_{CO}$ (V)	0.67	0.66	0.65	0.63
$S_{fCO}$ ( $\text{cm}.\text{s}^{-1}$ )	$2,00.10^2$	$2,64.10^2$	$3,79.10^2$	$5,26.10^2$

**TABLEAU III.4:** Variation de  $S_{fCO}$  en fonction de l'énergie d'irradiation

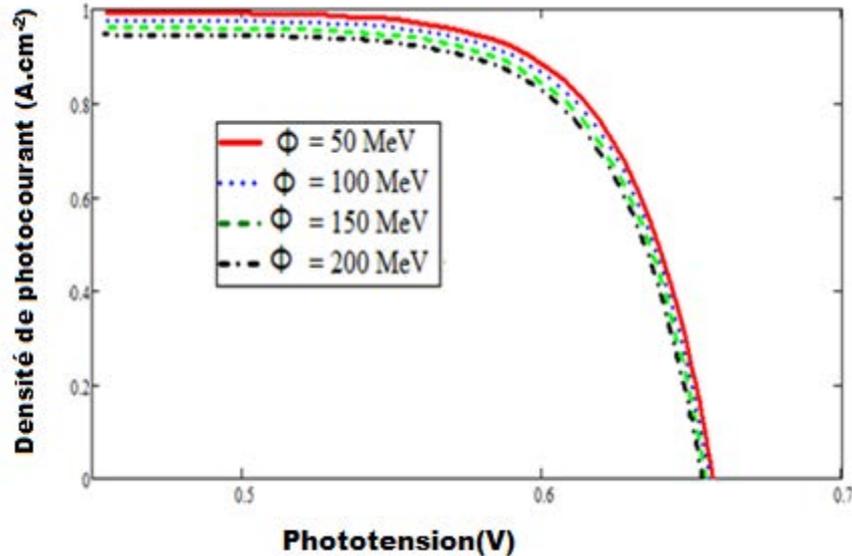
$\Phi$ (MEV)	50	100	150	200
$V_{CO}$ (V)	0.658	0.655	0.654	0.652
$S_{fCO}$ ( $\text{cm}.\text{s}^{-1}$ )	$1.43.10^2$	$2,64.10^2$	$3,79.10^2$	$5,26.10^2$

Les tableaux III.3 et III.4 montrent que l'irradiation a pour effet d'augmenter la vitesse de recombinaison à la jonction en circuit ouvert  $S_{fCO}$ . Cela confirme que l'irradiation multiplie les centres de recombinaisons.

### III.6. Paramètres électriques de la photopile

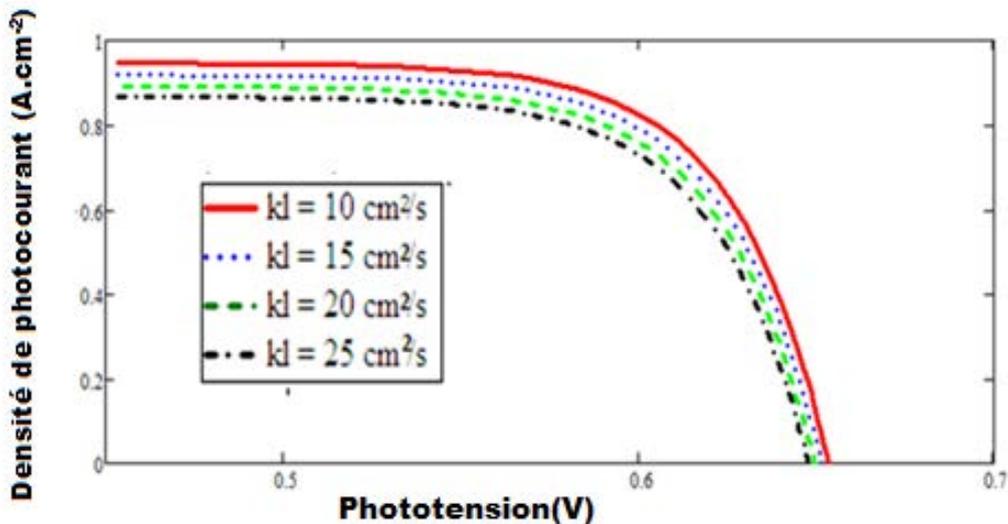
#### III.6.1. Caractéristique V-I

Les figures III.7 et III.8 ci-dessous nous montrent le profil de la densité de photocourant en fonction de la phototension qui reste le même lorsque la photopile est sous irradiation.



**FIGURE III.7** : caractéristique V-I de la photopile

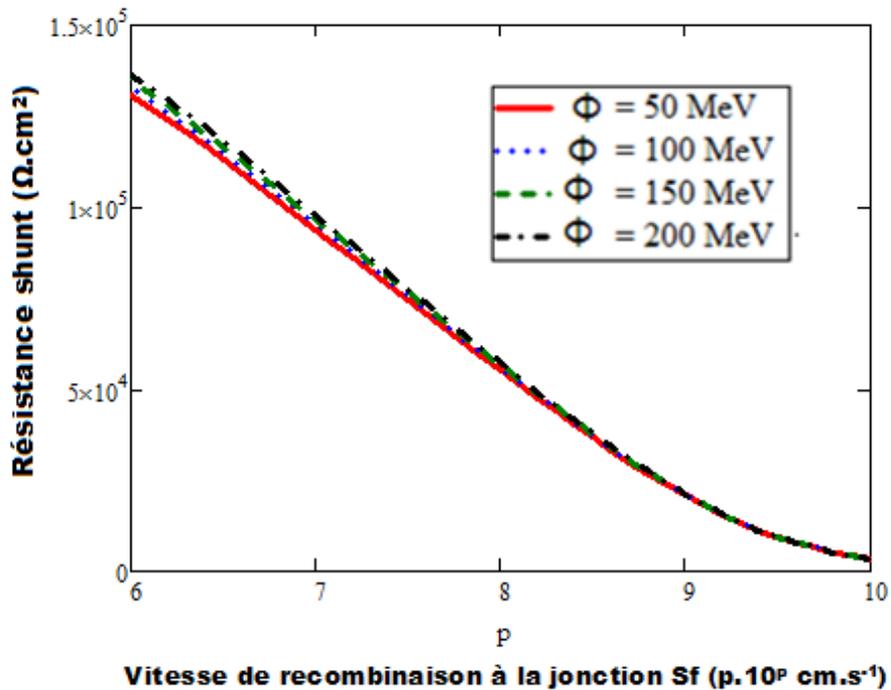
$\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm}^2/\text{s}^2$ ,



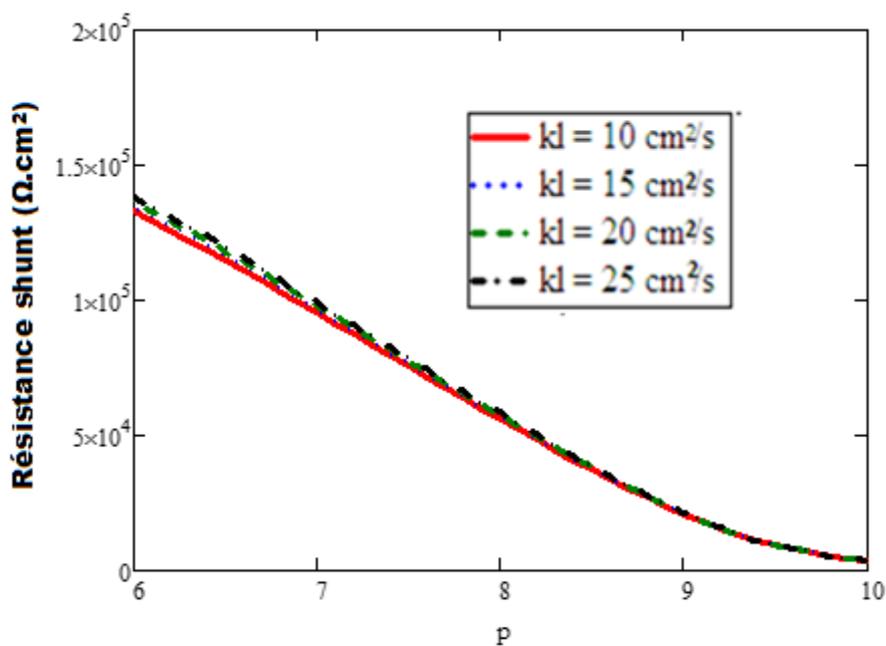
**FIGURE III.8** : caractéristique V-I de la photopile :  $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$

### III.7. Profil de la résistance shunt

Les figures III.9 et III.10 représentent le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pour respectivement différentes valeurs de l'énergie d'irradiation et le coefficient de dommage.



**FIGURE III.9** : profil de la résistance shunt en fonction de  $S_f$   
 $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm/s}^2$



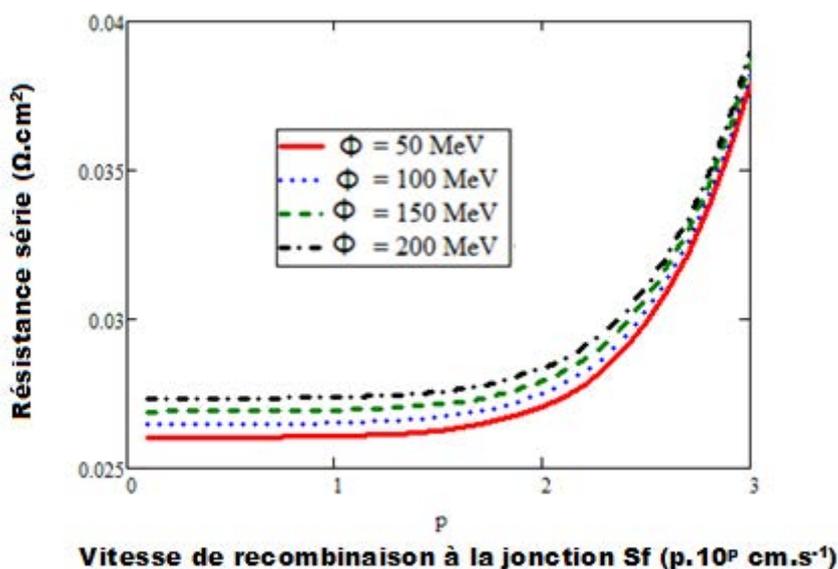
Vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

**FIGURE III.10** : profil de la résistance shunt en fonction de  $S_f$   
 $\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$

Les graphes nous montrent que la résistance shunt augmente avec les paramètres d'irradiation. L'irradiation réduit les courants de fuite en augmentant le taux de recombinaison.

### III.8. Profil de la résistance série

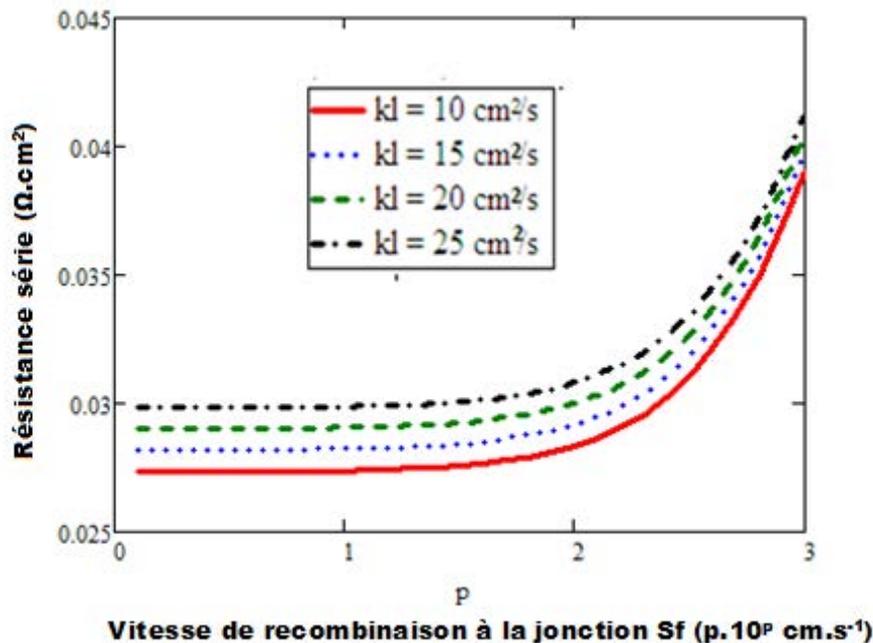
Les figures III.11 et III.12 représentent le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pour respectivement différentes valeurs de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage.



Vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

**FIGURE III.11:** profil de la résistance série en fonction de Sf

$\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$



**FIGURE III.12 :** profil de la résistance série en fonction de Sf

$\lambda=0,7\mu\text{m}$  ;  $H=0,03\text{m}$  ;  $Z=0,0001\text{cm}$  ;  $L_o= 0,01\text{cm}$ ,  $\phi=50\text{Mev}$

Les graphes nous montrent que l'irradiation fait croître la résistance série. Ce qui signifie que l'irradiation augmente les effets résistifs du matériau.

Si la résistivité du matériau augmente, le courant débité par la photopile diminue.

Effectivement au voisinage du circuit ouvert, notre étude a montré que le courant débité par la photopile diminue lorsque l'irradiation augmente.

## **CONCLUSION**

Au terme de ce chapitre l'influence de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage sur la densité des porteurs minoritaires de charge dans la base, la densité de photocourant, la phototension et les résistances série et shunt a été étudiée.

L'étude a montré que l'irradiation faisait diminuer la densité de porteurs minoritaires, la phototension et de la densité de photocourant du fait d'un accroissement des recombinaisons.

Les résistances shunt et série augmentent avec l'irradiation car les courants de fuite diminuent et les effets résistifs du matériau de base de la photopile augmente.

Ce chapitre nous a montré que les performances des composants électroniques et plus particulièrement les photopiles sont sérieusement affectées par les effets de l'irradiation.

**BIBLIOGRAPHIE :**

[1]S. Madougou, B. Dieng, A. Diao, I.F. Barro, G. Sissoko. Electrical parameters for bifacial silicon solar cell studied in modeling: space charge region width determination. JSPI N°5, January 2005, pp.34-39 (Senegal).

[2] M. M. Dione, S. Mbodji, M. L. Samb, M. Dieng, M. Thiame, S. Ndoye, F. I.Barro, G. Sissoko Vertical junction under constant multispectral light: determination of recombination parameters Proceedings of the 24th European photovoltaic solar energy conference and exhibition,Hamburg, Germany (sept 2009), 465 – 468.

[3]R.J.Walters and G.P.Sammers.Space radiation effects in advanced solar cell materials and devices.Mat.Res.Soc.Symp.Proc.Vol.692  
approach.Vaccum,64: 33-36

[4]G.Sissoko,G.Museruka,A.Correa,I.Gaye,A.L.Ndiaye.Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell.World renewable energy congress, part III,pp 1487-1490,1996

[5] M.A. Ould El Moujtaba, M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiame, I.F. Barro and G. Sissoko, (2012). Théoretical study of the influence of irradiation on a silicon solar cell under multispectral illumination. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 4(23), 5068-5073, ISSN : 2040-7467

[6]Gaye.I ,M.A.O.EL MOUTJTABA, N.THIAM,I.TALL and G.SISSOKO.influence of irradiation and damage coefficient on the minority density in the transient reponse for a bifacial silicon solar cell.Current Trends in technology science. ISSN :XXXX-XXXX.Volume XX,ISSUE :XXX.2012

[7] J.D.Arora,S.N.Singh, P.C.Mathur., surface recombinaison effects on the performance of N<sup>+</sup>p step and diffused junction silicon solar cell,Solid state electronics,1981,24(8),pp : 739-749

[8] G.Sissoko ,E.Nanema,A.Correa,P.M.Biteye,M.Adj,A.L.Ndiaye. , silicon solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic,Renewable energy, vol 3, pp 1848-1851,Elsevier science Ltd, 1998.

[9]S.Mbodj, I.Ly, H.L.Diallo, M.M.Dione ,O.Diasse, G.Sissoko., Modeling study of N<sup>+</sup>/P Solar Cell Résistances from Single I-V characteristics curve considéring the Junction recombinaison velocity,Research Journal of Applied sciences, Maxwell scientific organization, 2012.4(1) pp :1-7

[10]G.Sissoko,G.Museruka,A.Correa,I.Gaye,A.L.Ndiaye.Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell.World renewable energy congress, part III,pp 1487-1490,1996

[11]Diallo.H.L, B.Dieng, I.Ly, M.M.Dione ,M.Ndiaye ,O.H.Lemrabott ,Z.N.Bako, A.Wareme, G.Sissoko., Determination of the recombination and electrical

parameters of a vertical multijunction silicon solar cell, Research Journal of Applied sciences, Maxwell scientific organization, 2012 , 4(16),pp :2626-2631

[12]Kraner.H.W.,radiation damage in silicon detectors, 2<sup>nd</sup>e Pisa meeting on Advanced Detectors, Grosseto, Italy,June 3-7,1983.

[13] Bousse.L,Mostarshed.J.,Hafeman.D,Jurtor.M.,Adami.M and Nicolini.C, investigation of carrier transport through silicon wafers by photocurrent measurements, J.App.Phys.Vol 75(8), 1994,pp4000-4008.

[14]G.Sissoko,A.correa,E.Nanema,M.N.Diarra,A.L.Ndiaye and M.Adj, Proceeding of world renewable energy congress, Vol 3,pp 1856-1859,Florence, Italy,1998.

[15]R.K.Arienkel,D.J.Dunvaly,H.C.Hamaker,R.T.Green ,G.R.Lewis, R.E.Hayes and H.Fardy, time of flight studies of minority carrier diffusion in  $Al_xGa_{1-x}As$  homojunctions, J.Appl.Phys, 49(12),1986

[16]Hu,CC.2010,Modem semi-conductor devices for integrated circuits, Pearson/Princeticehall, Newjersey

[17]Bouzidi, K.,M.chegaar and A. Bouhemadou, 2007.Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance.Solar Energ.Mater.Solar cells,91:1647-1651

[18]Bashahu, M.and A.Habyarimana,1995.Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance.Renew Energy.6(2):127-138

**CHAPITRE IV: Etude de l'influence de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion**

## **CHAPITRE IV: Etude de l'influence de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion**

### **Introduction**

La capacité de diffusion de la photopile est considérée comme étant la capacité résultant de la variation de charge lors du processus de diffusion au sein de la photopile.

Le stockage de charges de part et d'autre de la jonction base-émetteur transforme la zone de charge d'espace en un condensateur plan dont la capacité dépend de paramètres intrinsèques et extrinsèques de la photopile.

Dans ce chapitre, nous établirons l'expression de la capacité de diffusion à partir de celles de la densité des porteurs minoritaires dans la base et de la phototension.

Les expressions des capacités de diffusion en circuit-ouvert, en court-circuit et du rendement de la capacité seront déduites.

L'influence de la longueur d'onde sur ces différentes capacités, sur le rendement et sur la capacité de diffusion sous obscurité sera étudiée.

### **IV.1.Expression de capacité de diffusion**

L'expression de la capacité de ce condensateur est donnée par la relation qui suit

[G. Sissoko et al, 1998] (IV.1):

$$C = \frac{dQ}{dV} = q \frac{d\delta(x=0)}{dV} = q \frac{d\delta(x=0)}{dSf} \times \frac{1}{\frac{dV}{dSf}} \quad (\text{IV.1})$$

C

D'où après calcul, il vient:

$$C = q \frac{n_o^2}{V_T \cdot N_B} + q \frac{\delta(x=0)}{V_T} \quad (\text{IV.2})$$

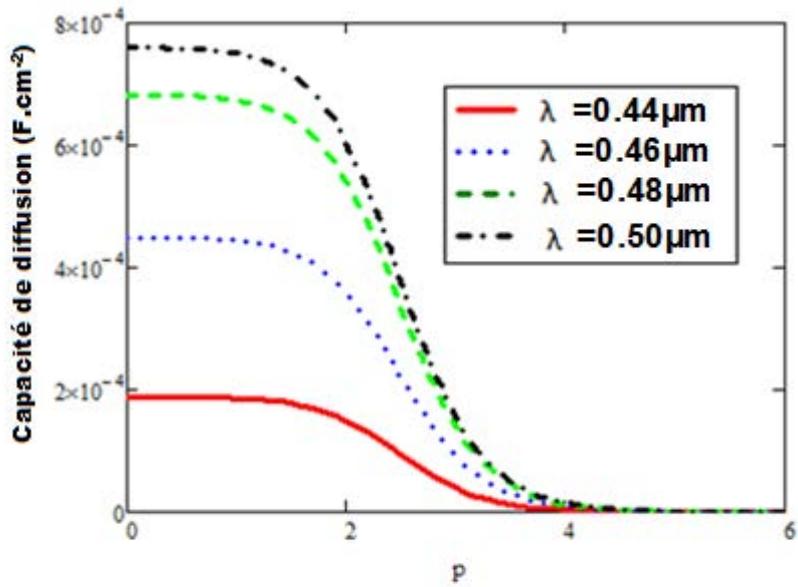
Le premier terme désigne la capacité à l'obscurité  $C_0$ ; elle dépend de la nature du matériau (substrat) à travers ( $n_0$ ), du dopage à travers ( $N_b$ ) et de la température à travers ( $V_T$ ) qui est la tension thermique.

Alors que le deuxième terme dépend de la température ( $V_T$ ), de l'éclairement, du point de fonctionnement  $S_f$ , de la profondeur  $z$  de la photopile et des paramètres d'irradiation.

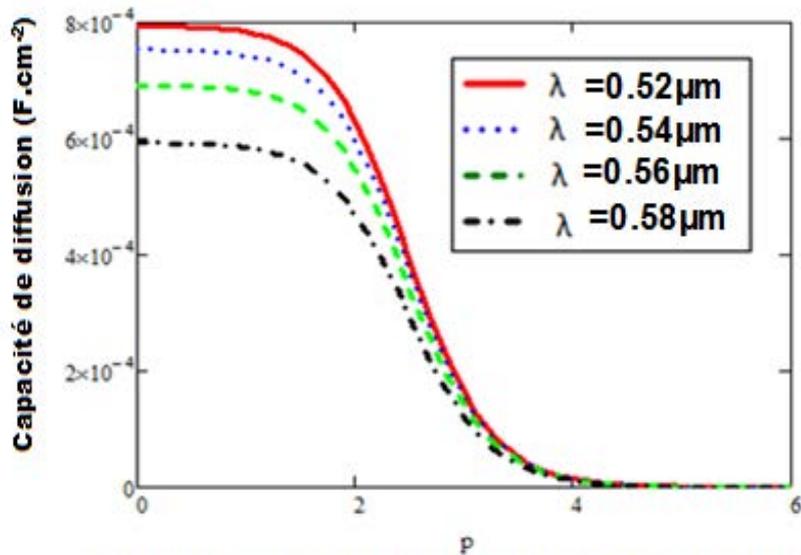
### **IV.2. Influence de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion:**

Les figures ci-dessous représentent le profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p.10^9 \text{ cm.s}^{-1}$ ) pour différentes valeurs de longueur d'onde.

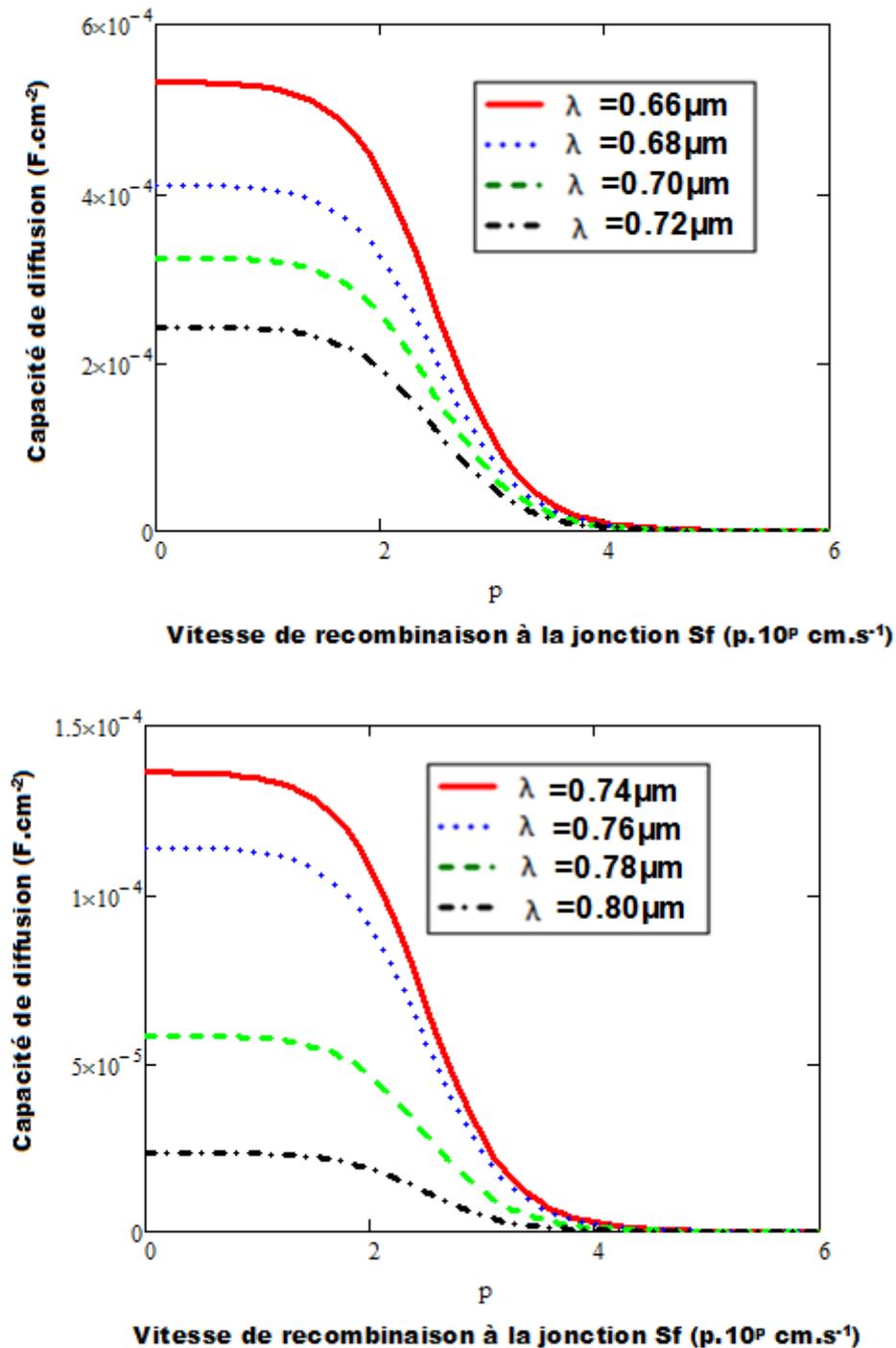
*Chapitre IV : Effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion*



Vitesse de recombinaison à la jonction Sf ( $p \cdot 10^p \text{ cm.s}^{-1}$ )



Vitesse de recombinaison à la jonction Sf ( $p \cdot 10^p \text{ cm.s}^{-1}$ )



**FIGURE IV.1:** Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $\lambda$ .

$H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$

Pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la capacité de diffusion est constante et correspond à la capacité en circuit-ouvert.

En situation de circuit-ouvert, on assiste à un stockage de charges de part et d'autre de la jonction.

Pour les grandes valeurs de Sf, la capacité est quasi nulle et correspond à la capacité en court-circuit.

## Chapitre IV : Effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion

Dans l'intervalle  $[0, 44\mu\text{m}-0, 50\mu\text{m}]$ , la capacité de diffusion augmente avec la longueur d'onde pour les deux modes de fonctionnement de la photopile.

L'augmentation de la capacité correspond à une réduction de la largeur de la zone de déplétion.

En effet, nous avons la relation:  $C = \frac{\epsilon S}{X}$  (IV.3), avec X la largeur de la zone de charge d'espace.

La base étant moins dopée que l'émetteur, la zone de charge d'espace est plus étendue du côté de la base que de l'émetteur.

La génération de paires élection-trous, aussi bien dans la base que dans la zone de charge d'espace, est très importante pour des valeurs de longueurs d'onde de cet intervalle.

Les porteurs générés dans la base ont, selon la loi de Planck, suffisamment d'énergie pour parvenir à la jonction.

Cela a pour conséquence un resserrement de la zone de déplétion du fait de recombinaisons de plus en plus fortes dans la zone de charge d'espace, lorsque la longueur d'onde augmente dans cet intervalle.

Pour les grandes longueurs d'onde, la capacité de diffusion diminue lorsque la longueur d'onde augmente.

La génération des électrons diminue dans la base et dans la zone de charge d'espace selon la loi de Planck dans la gamme des grandes longueurs d'onde et à cela s'ajoutent les effets de l'irradiation qui multiplie les centres de recombinaisons.

Une extension de la zone de déplétion est notée pour les grandes longueurs d'onde

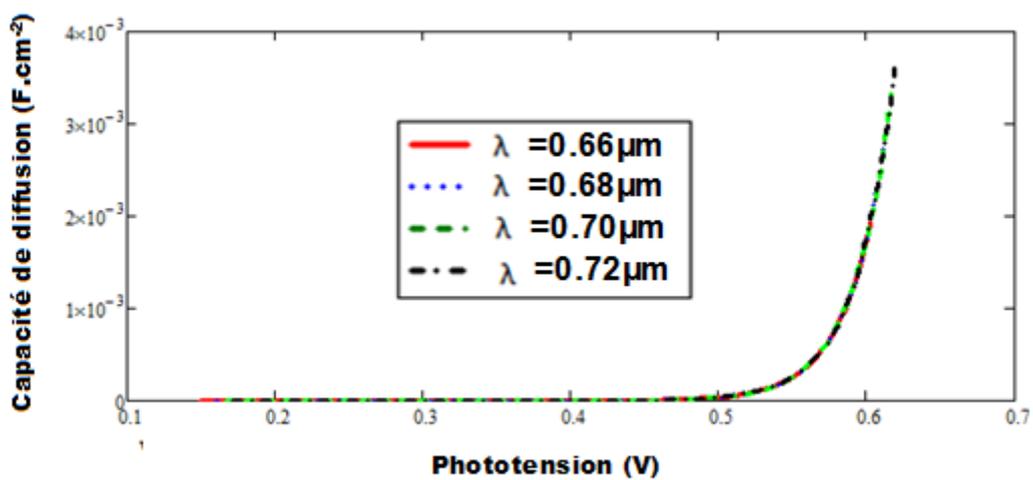
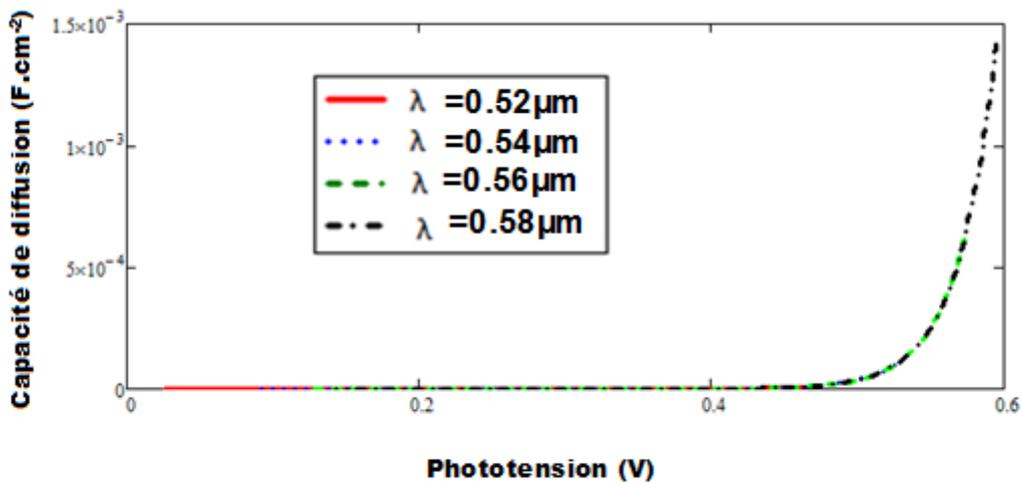
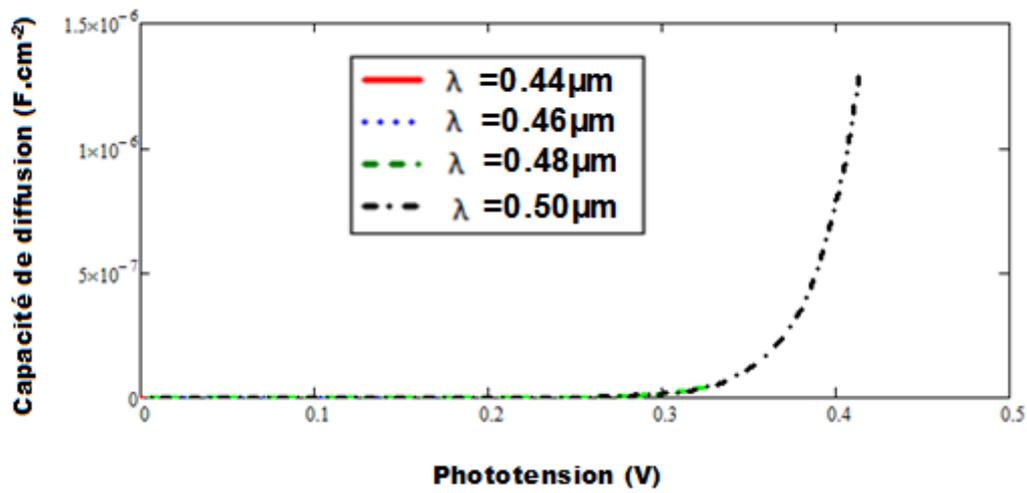
### **IV.3.Profil de la capacité en fonction de la phototension**

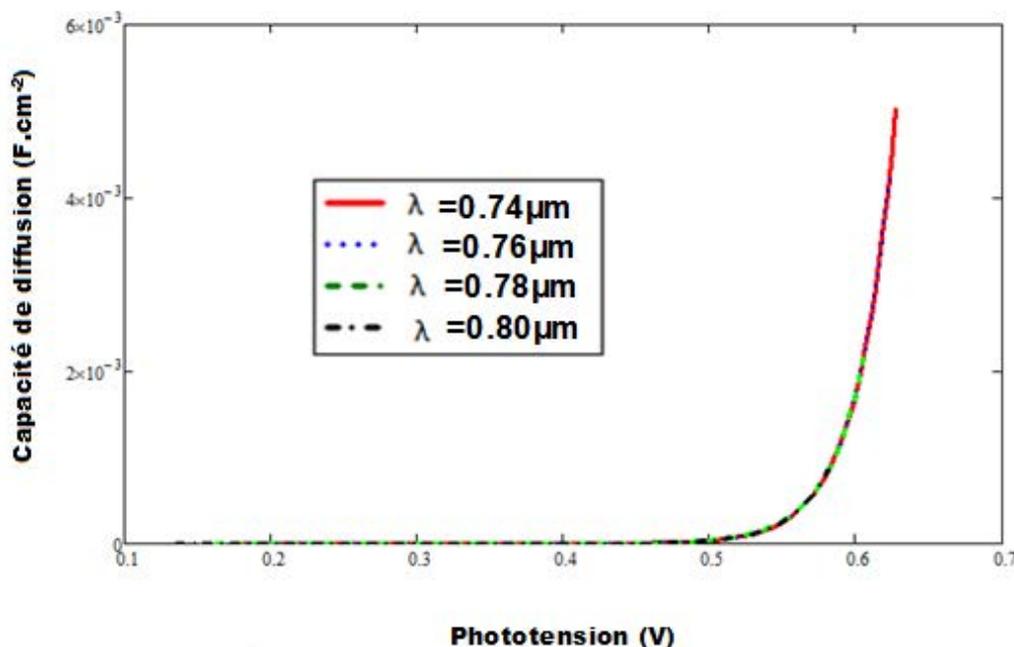
En combinant les expressions de la capacité de diffusion (IV.2) et de la phototension

$$(II.14), \text{ il vient : } C = q \cdot \frac{n_o^2}{V_T \cdot N_B} \cdot e^{\frac{V_{PH}}{V_T}} \quad \text{où} \quad C = C_o \cdot e^{\frac{V_{PH}}{V_T}} \quad (IV.4)$$

Cette relation nous a permis d'obtenir le profil de la capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

*Chapitre IV : Effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion*





**FIGURE IV.2 :** Profil de la capacité en fonction de la phototension

$H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$

Le profil de la capacité de diffusion en fonction de la phototension ne change pas lorsque la longueur d'onde augmente. Pour les faibles valeurs de la phototension la capacité de diffusion est très faible et nous constatons que le seuil à partir de laquelle la capacité augmente de façon exponentielle varie avec la longueur d'onde.

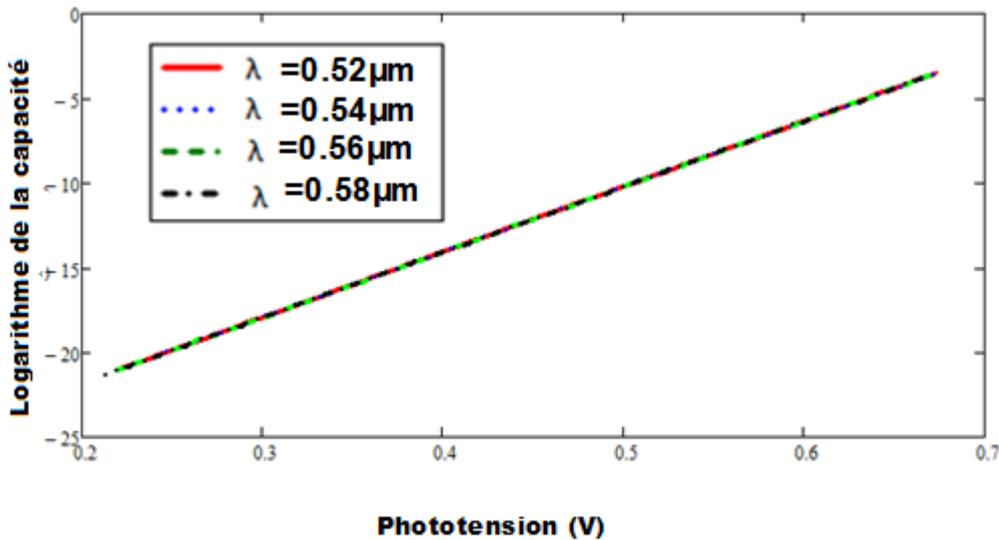
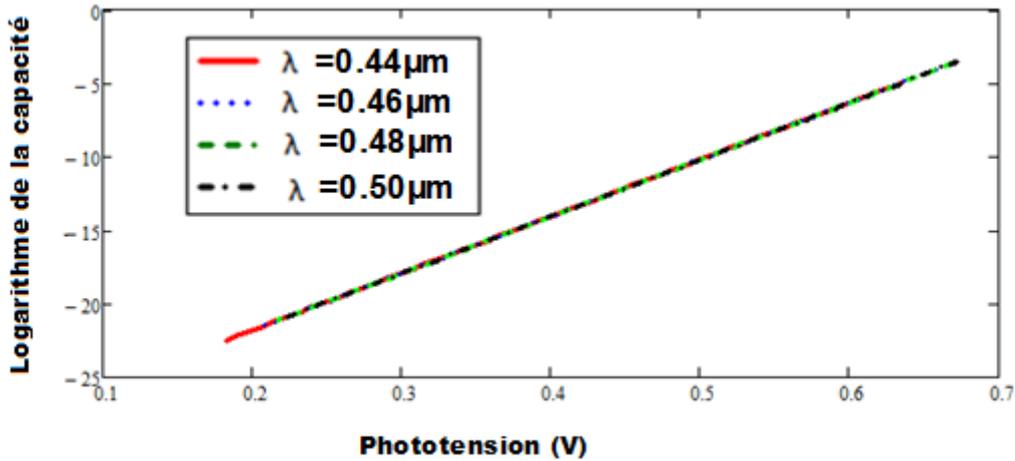
En effet les faibles valeurs de la phototension correspondent au fonctionnement de la photopile au voisinage du court-circuit où le stockage de charges de part et d'autre de la jonction est très faible.

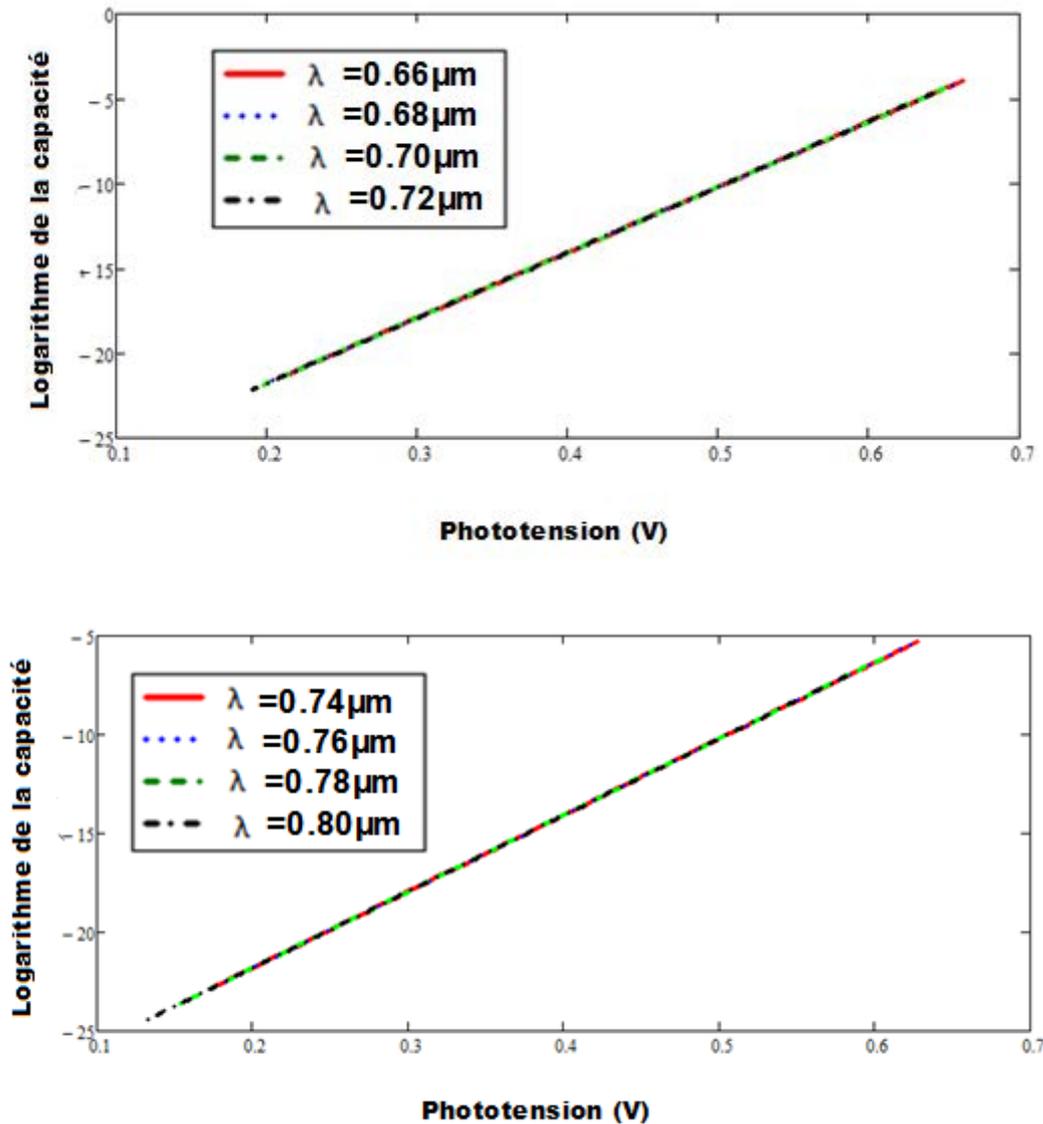
Dans l'intervalle de longueurs d'onde  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ , la phototension augmente en fonction de la longueur d'onde, ce qui fait que la photopile atteint plus rapidement son fonctionnement au voisinage du circuit ouvert.

Dans l'intervalle  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ , la phototension diminue en fonction de longueur d'onde, ce qui fait que le seuil à partir de laquelle la capacité croît exponentiellement augmente avec la longueur d'onde. Le fonctionnement de la photopile au voisinage du circuit ouvert est retardé lorsque la longueur d'onde augmente.

**IV.4. Influence de la longueur d'onde sur la capacité à l'obscurité :**

A partir de la relation (IV.4), nous montrons que la courbe  $\ln(C) = f(V)$  est une application affine de pente  $1/V_T$  et d'ordonnée à l'origine  $\ln C_0$ . Ce qui permet d'étudier l'impact de la variation de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion sous obscurité.





**FIGURE IV.3 :** Profil du logarithme décimal de la capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la longueur d'onde  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=10\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$

Par extrapolation des courbes, nous obtenons les coordonnées des points d'intersection avec l'axe des ordonnées. Lesquelles coordonnées nous ont permis de constater que la capacité sous obscurité n'est pas affectée par la variation de la longueur d'onde. Elle demeure constante de valeur, pour notre étude,  $C_0=2.09.10^{-9} \text{ F.cm}^{-2}$ .

**IV.5. Profil de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction de la longueur d'onde:**

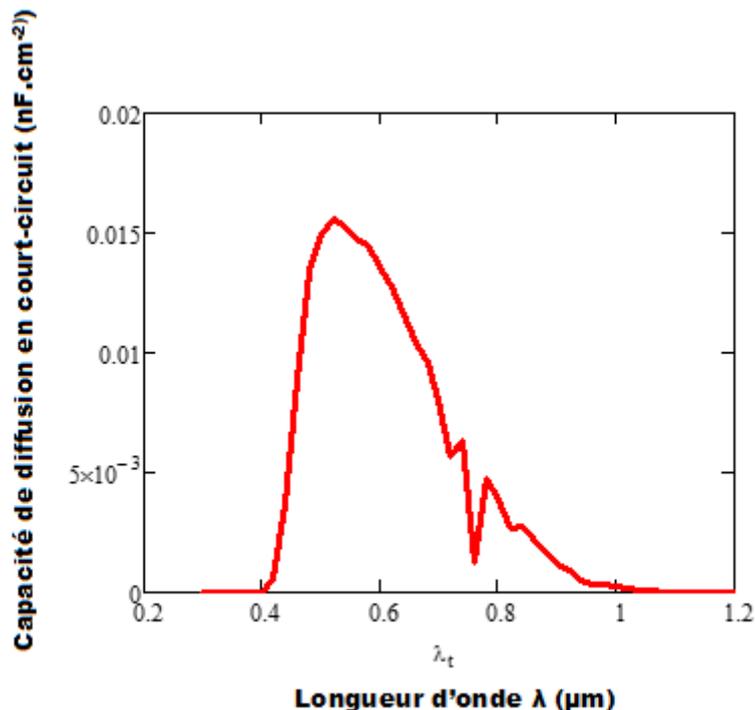
A partir de l'expression de la vitesse de recombinaison à la jonction en court-circuit et de la capacité de diffusion, nous avons établi l'expression de la capacité en court-circuit :

*Chapitre IV : Effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion*

$$C_{CC}(\lambda, kl, \phi, z) = \frac{q \cdot n_o^2}{V_T \cdot N_B} + \frac{q \cdot \left( \frac{\alpha \cdot F(1-R) \cdot L^3 \cdot Sf_{CC} \cdot e^{-\alpha z}}{Sf_{CC} \cdot D \cdot L + D \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)} \right) + \frac{qL^2 \cdot \alpha \cdot F(1-R) \cdot e^{-\alpha z}}{D}}{V_T}$$

**(IV.4)**

Le graphe ci-dessous est le profil de la capacité en court-circuit de la photopile en fonction de la longueur d'onde:



**Figure IV.4:** Variation de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction de la longueur d'onde λ

H=0,03cm, kl=5cm<sup>2</sup>/s, φ= 50 MeV, z=0,0001cm, Sf=7.10<sup>7</sup> cm/s, L<sub>o</sub>=0,01cm

La capacité de diffusion en situation de court-circuit augmente avec la longueur d'onde dans la gamme des courtes longueurs d'onde. Elle atteint sa valeur maximale au voisinage de λ=0, 50μm puis diminue progressivement lorsqu'on aborde les grandes longueurs d'onde.

Cette situation s'explique par les effets de la génération d'électrons régie par la loi de Planck et par les recombinaisons accentuées par l'irradiation.

Pour les courtes longueurs d'onde, nous notons une diminution de la largeur de la zone de charge d'espace et une extension de celle-ci aux grandes valeurs de longueurs d'onde.

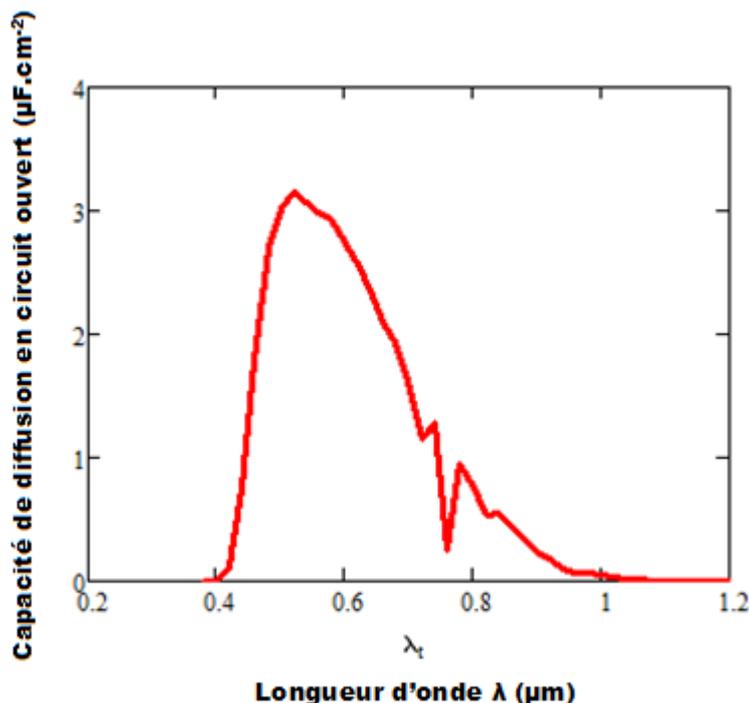
**IV.6. Profil de la capacité de diffusion en court-ouvert en fonction de la longueur d'onde:**

A partir de l'expression de la vitesse de recombinaison à la jonction en circuit ouvert et de la capacité de diffusion, nous avons établi l'expression de la capacité en circuit ouvert :

$$C_{CO}(\lambda, kl, \phi, z) = \frac{q.n_o^2}{V_T.N_B} + \frac{q \left( \frac{\alpha.F(1-R).L^3.Sf_{CO}.e^{-\alpha z}}{Sf_{CO}.D.L + D \tanh\left(\frac{H}{2L}\right)} \right) + \frac{qL^2.\alpha.F(1-R).e^{-\alpha z}}{D}}{V_T}$$

**(IV.5)**

Le graphe ci-dessous est le profil de capacité en circuit ouvert de la photopile en fonction de la longueur d'onde:



**Figure IV.5:** Variation de la capacité de diffusion en circuit ouvert en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$

$H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $Sf=10 \text{ cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$

La capacité de diffusion en situation de circuit ouvert augmente avec la longueur d'onde dans la gamme des courtes longueurs d'onde. Elle atteint sa valeur maximale au voisinage de  $\lambda=0, 50\mu\text{m}$  puis diminue progressivement lorsqu'on aborde les grandes longueurs d'onde.

Cette situation s'explique par les effets de la génération des électrons régie par la loi de Planck et par les recombinaisons accentuées par l'irradiation.

## *Chapitre IV : Effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion*

Pour les courtes longueurs d'onde, nous notons une diminution de la largeur de la zone de charge d'espace et une extension de celle-ci aux grandes valeurs de longueurs d'onde.

Compte tenu du fait que les valeurs de la capacité en circuit ouvert sont plus grandes que celles en court-circuit, l'extension comme la diminution de largeur de la zone de charge d'espace est plus importante en situation de court-circuit qu'en circuit ouvert.

### **IV. 7. Rendement de la capacité de diffusion**

#### **IV.7.1. Expression**

Le rendement de la capacité de diffusion a pour expression:  $\eta = 1 - \frac{C_{cc}}{C_{co}}$  (IV.4)

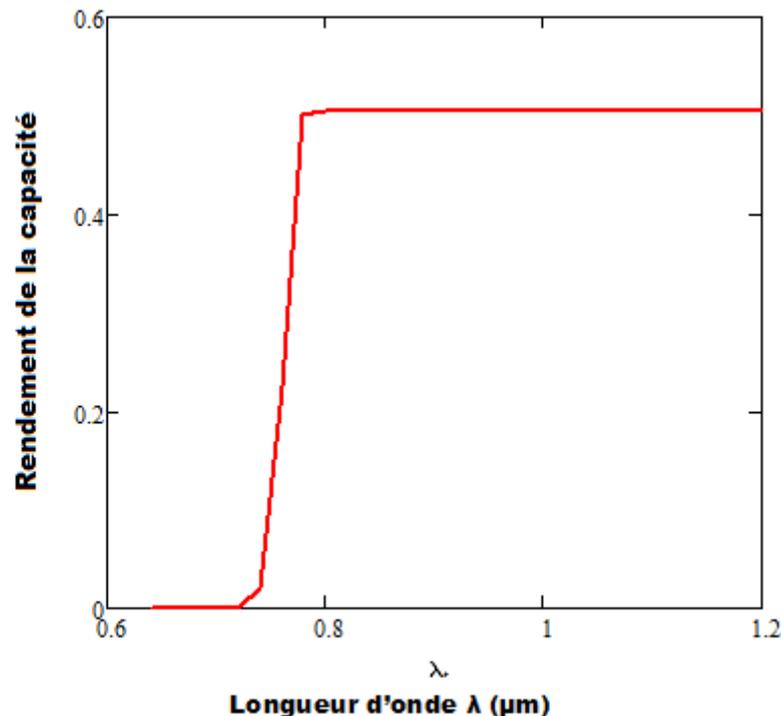
[M.NDIAYE et al, 2010]

où  $C_{cc}$  désigne la capacité en situation de court-circuit et  $C_{co}$  la capacité en situation de circuit ouvert.

Cette expression du rendement nous a permis d'étudier par la suite la variation du rendement en fonction de la longueur d'onde

#### **IV.7.2. Profil du rendement en fonction de la longueur d'onde:**

La figure IV.6 ci-dessous nous montre le profil du rendement de la capacité de diffusion en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .



**FIGURE IV.6:** Rendement de la capacité de diffusion en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$

$H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$

## *Chapitre IV : Effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion*

Le rendement de la capacité est quasi nul dans le domaine des courtes longueurs d'onde car la capacité en circuit ouvert augmente progressivement et les valeurs de la capacité en court-circuit sont très faibles.

Le rendement de la capacité augmente avec la longueur d'onde dans l'intervalle  $[0, 7\mu\text{m}-0, 8\mu\text{m}]$  correspondant à une diminution des valeurs des capacités de court-circuit et circuit ouvert.

Pour les grandes longueurs d'onde, le rendement est quasi constant car les variations des capacités de court-circuit et circuit ouvert sont faibles.

### **CONCLUSION**

Au terme de ce chapitre, nous avons étudié l'effet de la variation de la longueur d'onde sur cette capacité et les capacités en court-circuit et en circuit ouvert, puis sur le rendement de la capacité.

Nous avons constaté que dans l'intervalle  $[0, 44\mu\text{m}-0, 50\mu\text{m}]$ , la capacité de diffusion augmente avec la longueur d'onde, et ce malgré l'irradiation, selon la loi de Planck, dans les deux modes de fonctionnement de la photopile.

Pour les grandes longueurs d'onde, la capacité de diffusion diminue lorsque la longueur d'onde augmente car la génération de porteurs diminue et à cela s'ajoutent les recombinaisons amplifiées par l'irradiation.

Dans l'intervalle  $[0, 44\mu\text{m}-0, 50\mu\text{m}]$ , le rendement est quasi nul puis il augmente progressivement et pour les grandes longueurs d'onde, il est constant.

Nous avons aussi montré que la variation de la longueur d'onde n'affectait pas la capacité de diffusion sous obscurité.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1]S. Madougou, B. Dieng, A. Diao, I.F. Barro, G. Sissoko. Electrical parameters for bifacial silicon solar cell studied in modeling: space charge region width determination. JSPI N°5, January 2005, pp.34-39 (Senegal).
- [2]S. Mbodji, B. Mbow, F.I. Barro and G. Sissoko. A 3D Model of Thickness and Diffusion Capacitance of Emitter-base Junction Determination in a Bifacial Polycrystalline Solar Cell Under Real Operating Condition. Turk J Phys vol 35, pp 281-291.
- [3] M. M. Dione, S. Mbodji, M. L. Samb, M. Dieng, M. Thiame, S. Ndoye, F. I.Barro, G. Sissoko Vertical junction under constant multispectral light: determination of recombination parameters Proceedings of the 24th European photovoltaic solar energy conference and exhibition,Hamburg, Germany (sept 2009), 465 – 468.
- [4] A. Thiam, M. Zoungrana, H. Ly Diallo, A Diao, N. Thiam, S. Gueye, M.M. Deme,M. Sarr and G. Sissoko,Influence of Incident Illumination Angle on Capacitance of a Silicon Solar Cell under Frequency Modulation,Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(4): 1123-1128, 2013
- [5]S.Mbodj,M.Dieng,B.Mbow,F.I.Barro and G.Sissoko,Influence of grain boundary recombination velocity on the diffusion capacitance of polycrystalline bifacial silicon solar cell,Journal des sciences pour l'ingénieur, 2009,N°11.pp64-69
- [6]A.Moissi,M.Zoungrana,A.Diallo,S.Mbodj,H.L.Diallo,A.Hamidou,M.Ndiaye and G.Sissoko, Base Transceiver (BTS) Antenna Electric Field Influence on the space charge region in a silicon solar cell, Research journal of Applied sciences, Maxwell scientific organization,2013.
- [7]M.Ndiaye,A.Diao,M.Thiame,M.M.Dione,H.L.Diallo,M.L.Samb,I.Ly,C.Gassama,S .MbodjF.I.Barro and G.Sissoko, 3D Approach for a modelling study of diffusion capacitance's efficiency of the solar cell, 25th European photovoltaic solar energy conference and exhibition,5<sup>th</sup> world conference of photovoltaic energy conversion, 6-7 September 2010, Valencia-Spain
- [8]G.Sissoko,C.Museruka,A.Correa,I.Gaye,A.L.Ndiaye.Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell.World renewable energy congress, part III,pp 1487-1490,1996

[9] Bousse.L,Mostarshed.J.,Hafeman.D,Jurtor.M.,Adami.M and Nicolini.C, investigation of carrier transport through silicon wafers by photocurrent measurements, J.App.Phys.Vol 75(8), 1994,pp4000-4008.

[10]G.Sissoko,A.correa,E.Nanema,M.N.Diarra,A.L.Ndiaye and M.Adj, Proceeding of world renewable energy congress, Vol 3,pp 1856-1859,Florence, Italy,1998.

[11]R.K.Arienkel,D.J.Dunvaly,H.C.Hamaker,R.T.Green ,G.R.Lewis, R.E.Hayes and H.Fardy, time of flight studies of minority carrier diffusion in  $Al_xGa_{1-x}$ -As homojunctions, J.Appl.Phys, 49(12),1986

[12]Hu,CC.2010,Modem semi-conductor devices for integrated circuits, Pearson/Princeticehall, Newjersey

[13] S. Madougou, B. Dieng, A. Diao, I. F. Barro, Nzonzolo, G. Sissoko, Electrical parameters for bifacial silicon solar cell study in modelling : capacitance and space charge region width determination, Journal des Sciences pour l'ingénieur, (2005).

[14] J. Philibert, Diffusion et transport de matière dans les solides, Les éditions de physique, ISBN 2-86883-004-8, 472 p. (1991).

[15] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga Optimisation du rendement d'une photopile,Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306

[16] K. W. Böer, *“Introduction to Space Charge Effects in Semiconductors”*, Springer-Verlag, 2010.

[17] F. I. Barro, A. S. Maiga, A. Wereme et G. Sissoko, *“Determination of recombination parameters in the base of a bifacial silicon solar cell under constant multispectral light”*, Phys. Chem. News 56, pp.76-84, 2010.

[18] H. Mathieu et H. Fanet, *“Physique des semiconducteurs et des composants électroniques”*, 6ème Ed, Dunod, 2009.

[19] Bernard Ecquer, *“Energie Solaire Photovoltaïque : Physique des convertisseurs photovoltaïque”*, Ecole d'Eté de l'UNESCO, 1ère édition Paris, (1993)

[20] J. Philibert, *“Diffusion et transport de matière dans les solides”*, Les éditions de physique, ISBN 2-86883-004-8, (1991), p.472

**Chapitre V: Etude de l'influence de l'irradiation sur la capacité de diffusion**

## **Chapitre V: Etude de l'influence de l'irradiation sur la capacité de diffusion**

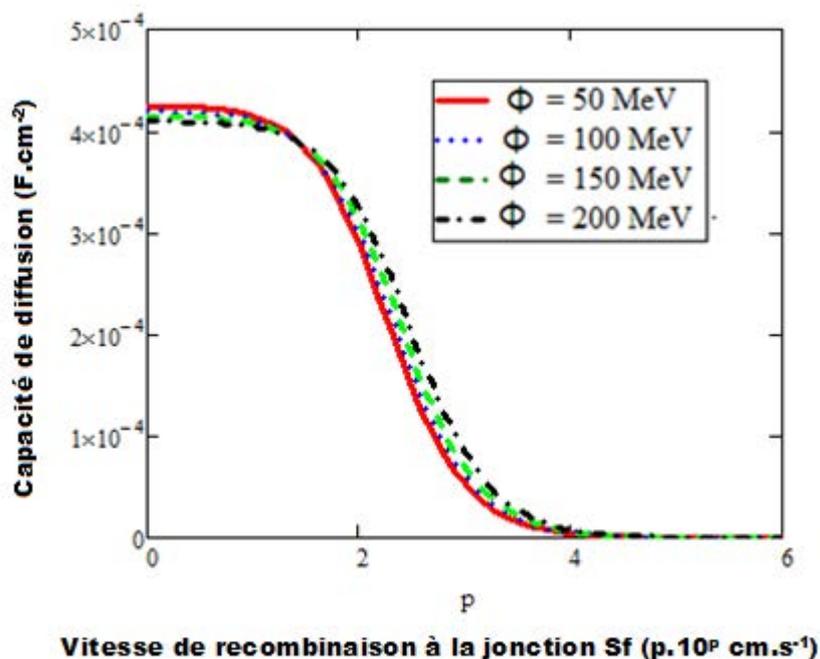
### **Introduction:**

Nous avons dans les chapitres précédents mis en évidence l'impact de l'irradiation sur la densité de photocourant, la phototension ainsi que les résistances shunt et série.

Ce chapitre traite de l'influence de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage sur la capacité de diffusion, les capacités de diffusion en court-circuit et en circuit ouvert. Enfin l'impact de l'irradiation sur le rendement de la capacité de diffusion sera étudié.

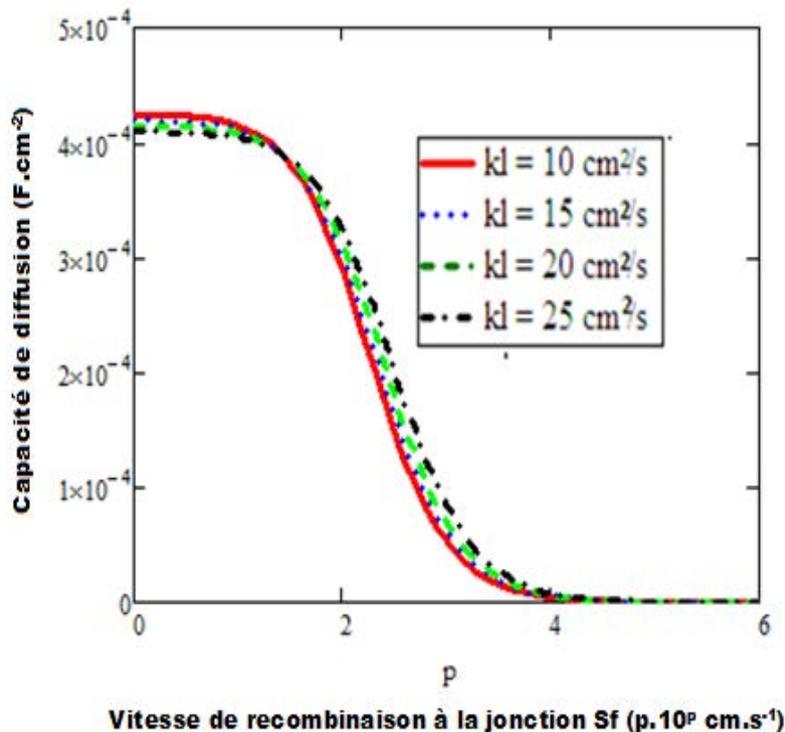
### **V.1.Profils de la capacité de diffusion:**

Les figures V.1 et V.2 représentent le profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  ( $p \cdot 10^p \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pour respectivement différentes valeurs de l'énergie d'irradiation et le coefficient de dommage.



**FIGURE V.1:** Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation.

$H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_0=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$



**FIGURE V.2:** Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du coefficient de dommage.

$H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_0=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $\phi=50\text{MeV}$

Les figures **V.1** et **V.2** nous montrent que la capacité de diffusion est constante et maximale pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction correspondant au fonctionnement de la photopile en circuit ouvert.

Elle est quasi nulle pour les grandes valeurs de  $S_f$  correspondant à l'état de court-circuit.

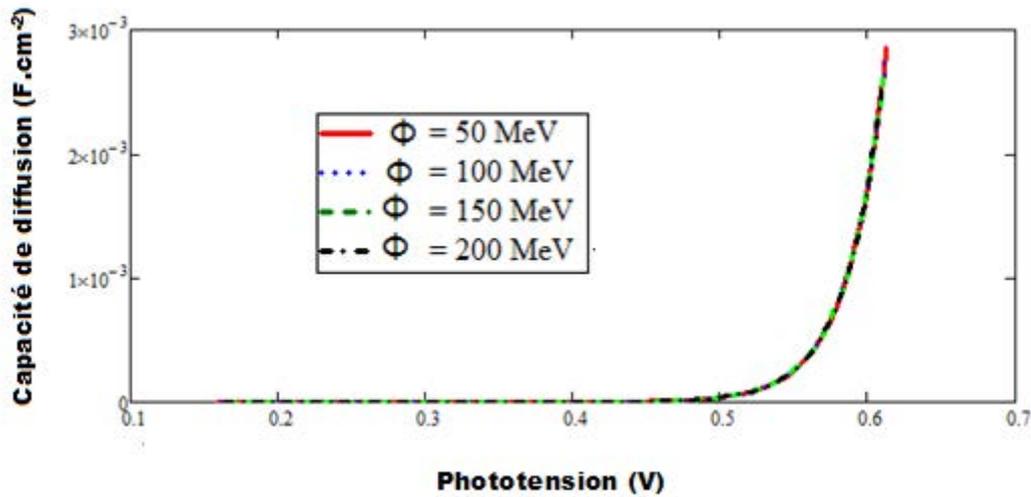
En situation de circuit ouvert tout comme en court-circuit, l'irradiation fait diminuer la quantité de charges stockées de part et d'autre de la jonction en réduisant la longueur de diffusion des porteurs photogénérés, ce qui accroît le taux de recombinaison et fait diminuer la capacité de diffusion.

Dans les deux modes de fonctionnement de la photopile, la diminution de la capacité correspond à un élargissement de la zone de charge d'espace puisque  $C = \frac{\epsilon S}{X}$ ,

avec  $X$  la largeur de la zone de charge d'espace.

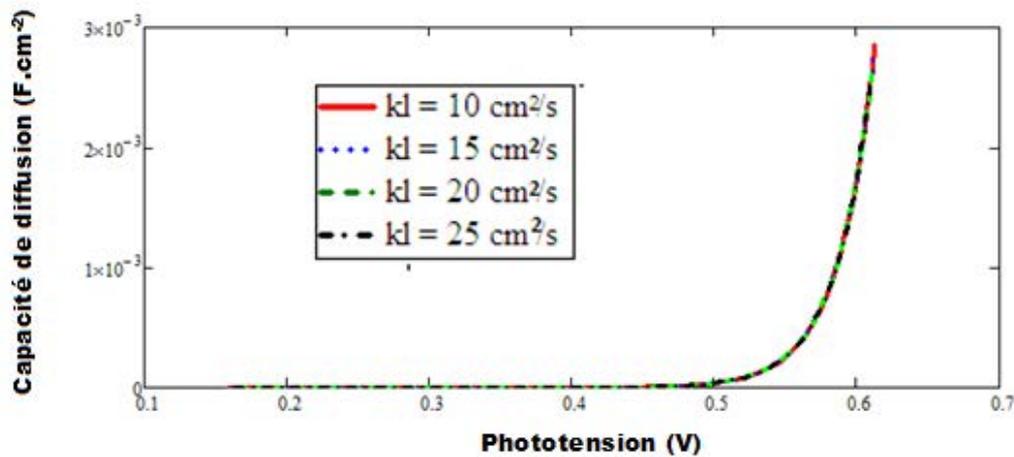
En effet l'irradiation, en boostant le taux de recombinaison, augmente du coup la largeur de zone dépourvue de charges mobiles qui est la zone de charges d'espace.

**V.2.Profil de la capacité en fonction de la phototension**



**Figure V.3:** Capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation

H=0,03cm, z=0,0001cm, L<sub>o</sub>=0,01cm, λ=0, 6μm, kl=5cm<sup>2</sup>/s



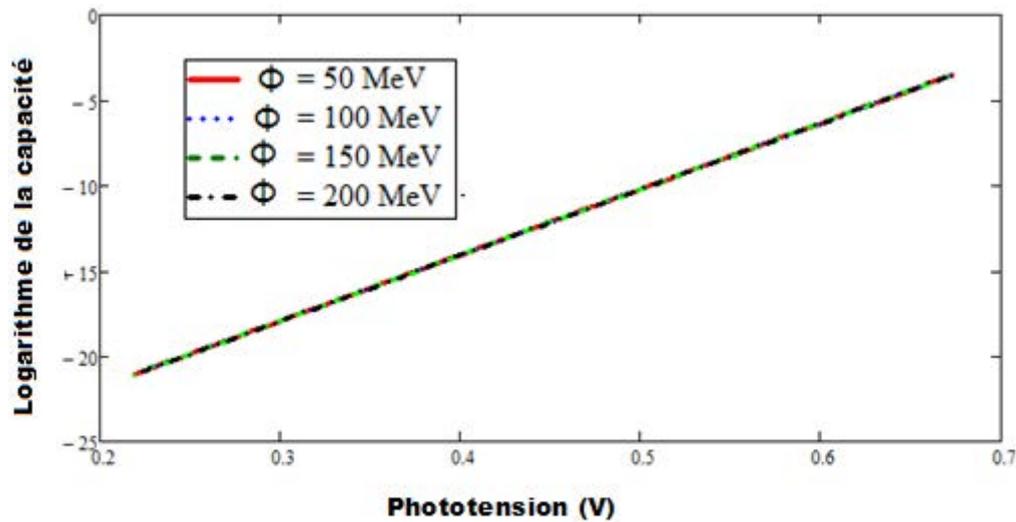
**Figure V.4:** Capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs du coefficient de dommage

H=0,03cm, z=0,0001cm, L<sub>o</sub>=0,01cm, λ=0, 6μm, φ= 50 MeV

La variation des paramètres d'irradiation ne change pas le profil de la capacité de diffusion en fonction de la phototension.

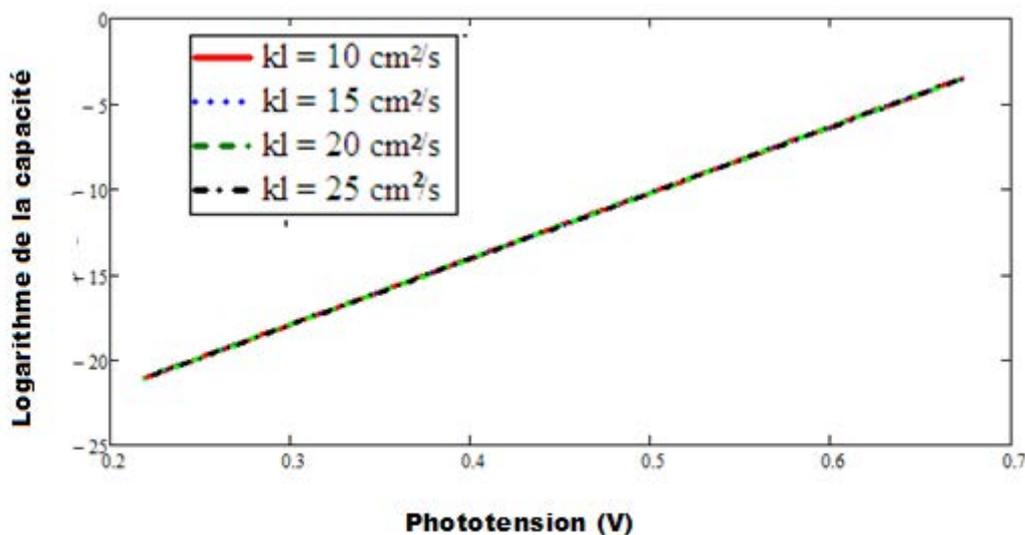
L'augmentation de l'énergie d'ionisation ou du coefficient de dommage n'a aucun effet sur la variation de la capacité de diffusion en fonction de la phototension

**V.3. Influence de l'irradiation sur la capacité à l'obscurité**



**Figure V.5:** Profil du logarithme décimal de la capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation

$H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_0=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$



**Figure V.6:** Profil du logarithme décimal de la capacité de diffusion en fonction de la phototension pour différentes valeurs du coefficient de dommage

$H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $L_0=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $\phi=50\text{ MeV}$

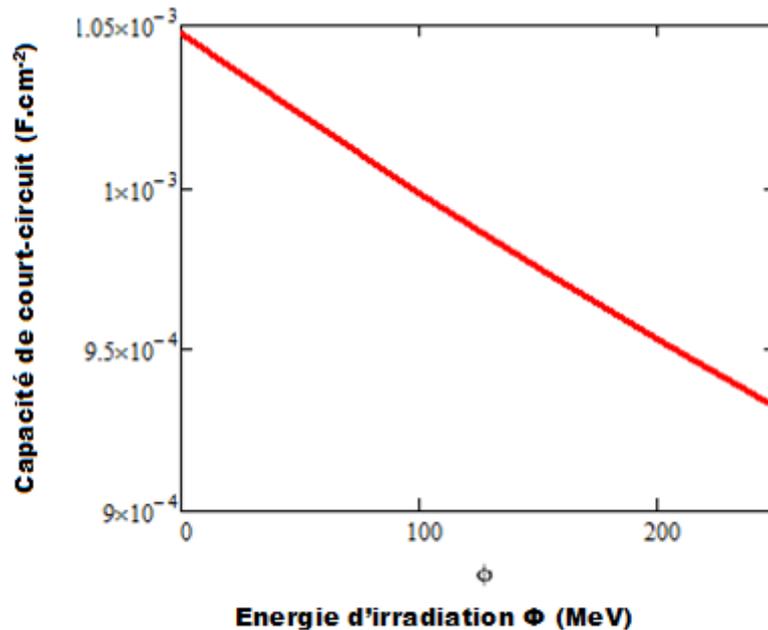
L'analyse de ces deux courbes montrent que l'irradiation ne change pas la valeur de la capacité de diffusion de la photopile sous obscurité.

## Chapitre V : Effet de l'irradiation sur la capacité de diffusion

En effet la densité des porteurs libres dans le semi-conducteur intrinsèque n'est pas modifiée à l'équilibre thermique lorsque la photopile est sous irradiation.

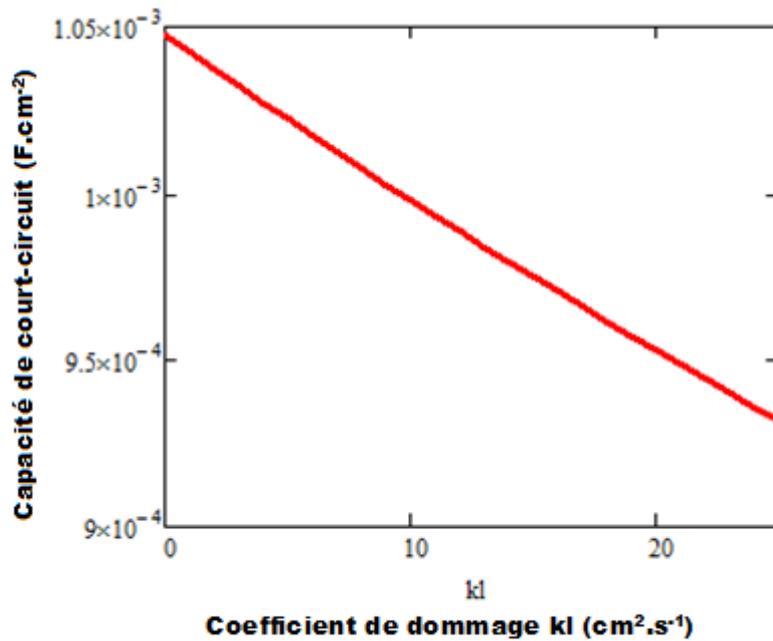
### V.4.Profil de la capacité en court-circuit:

Les figures V.7 et V.8 représentent les profils de la capacité de court-circuit en fonction respectivement de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage.



**Figure V.7:** Variation de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction de l'énergie d'irradiation

$H=0,03cm$ ,  $z=0,0001cm$ ,  $Sf=7 \cdot 10^7 cm/s$ ,  $L_o=0,01cm$ ,  $\lambda=0,6\mu m$ ,  $kl=5cm^2/s$

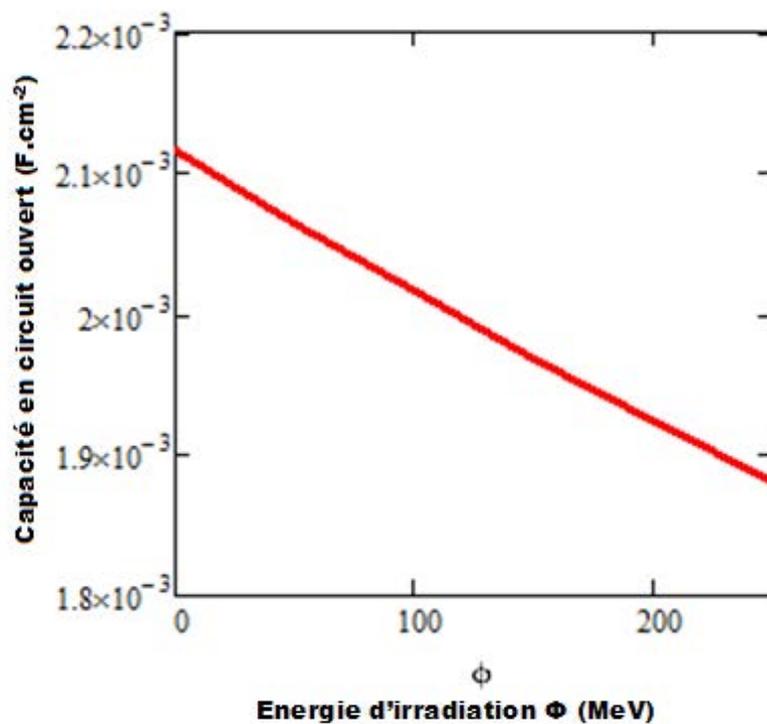


**Figure V.8:** Variation de la capacité de diffusion en court-circuit en fonction respectivement de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage  $H=0,03\text{cm}$ ,  $z=0,0001\text{cm}$ ,  $S_f=7.10^7 \text{ cm/s}$ ,  $L_o=0,01\text{cm}$ ,  $\lambda=0,6\mu\text{m}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$   
Les figures **V.7** et **V.8** montrent que la capacité en situation de court-circuit diminuent avec l'énergie d'irradiation et le coefficient de dommage.

Lorsque l'énergie d'irradiation ou le coefficient de dommage augmente, la longueur de diffusion des porteurs de charge diminue, ce qui se traduit par une augmentation du taux de recombinaison et une diminution de la quantité de charges stockées de part et d'autre de la jonction.

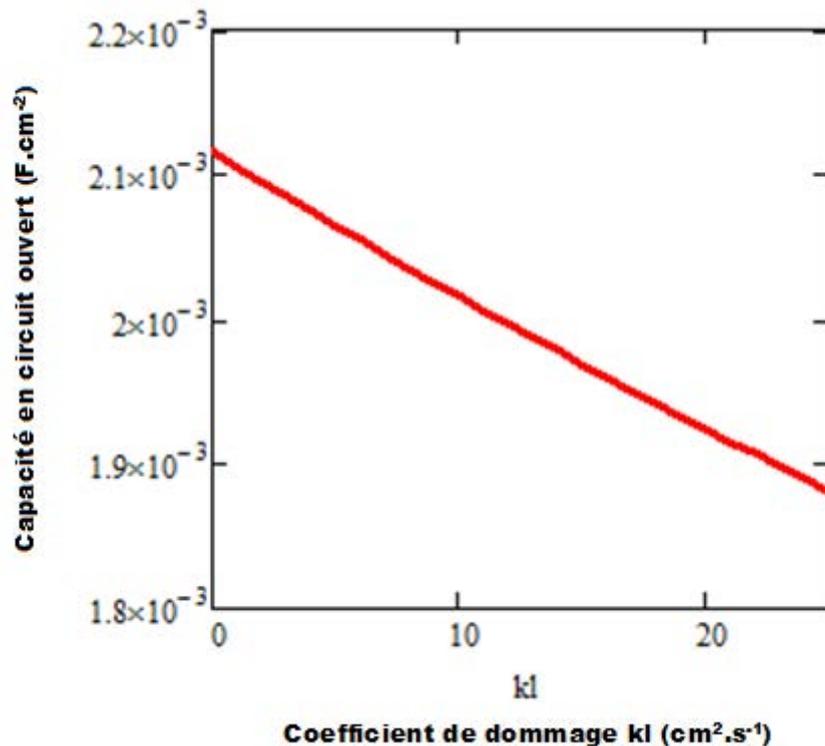
### **V.3.Profils de la capacité en circuit ouvert:**

Les figures **V.9** et **V.10** représentent les profils de la capacité de circuit ouvert en fonction respectivement de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage



**Figure V.9:** Variation de la capacité de diffusion de circuit ouvert en fonction de l'énergie d'irradiation

H=0,03cm, z=0,0001cm, Sf= 10cm/s, L<sub>o</sub>=0,01cm,  $\lambda$ =0,6 $\mu$ m, kl=5cm<sup>2</sup>/s



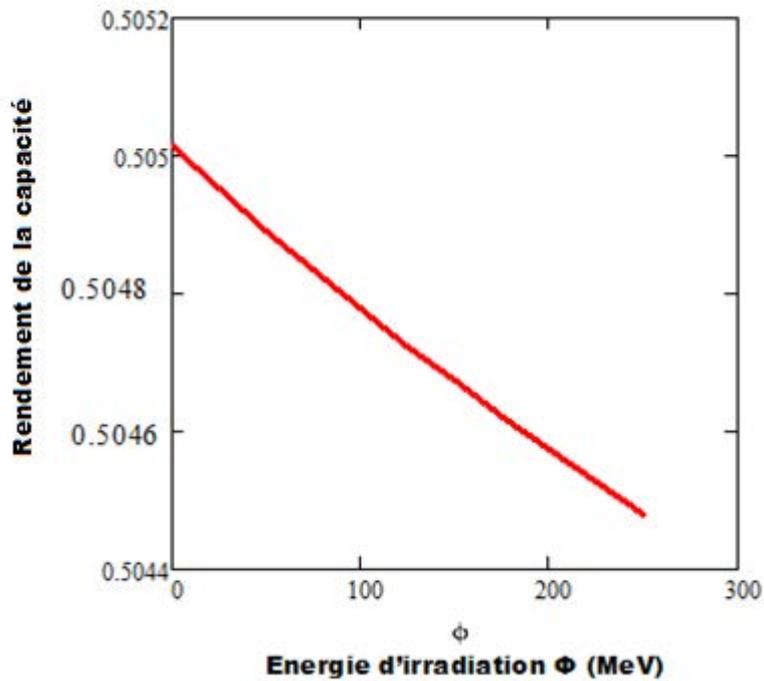
**Figure V.10:** Variation de la capacité de diffusion de circuit ouvert en fonction du coefficient de dommage

$H=0,03cm$ ,  $z=0,0001cm$ ,  $Sf= 10cm/s$ ,  $L_o=0,01cm$ ,  $\lambda=0,6\mu m$ ,  $\phi= 50 MeV$

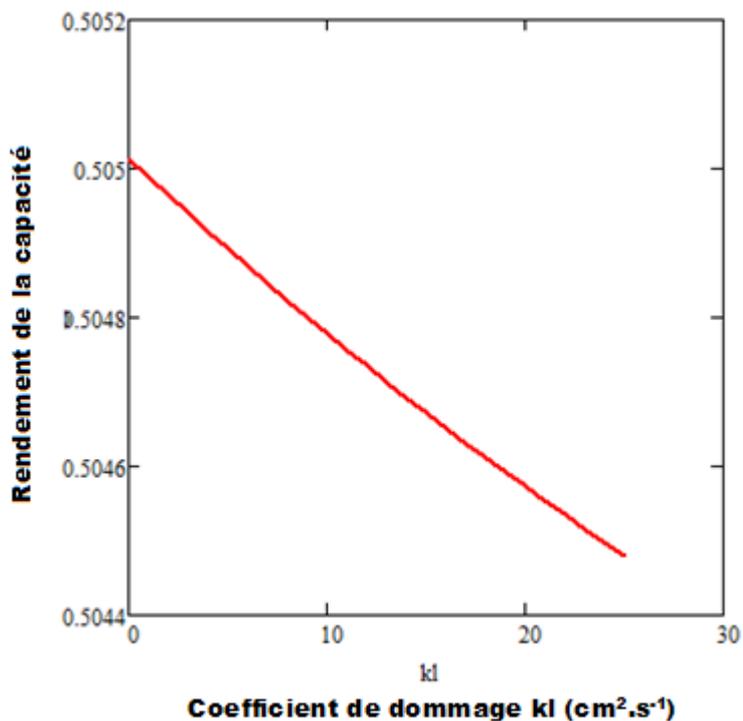
Nous constatons que l'augmentation de l'énergie d'irradiation tout comme celle du coefficient de dommage a les mêmes effets sur la capacité de diffusion au voisinage du circuit ouvert. La multiplication des centres de recombinaison favorisée par l'irradiation fait décroître très rapidement la quantité de charges stockées de part et d'autre de la jonction d'où la diminution de la capacité de diffusion.

#### **V.4.Profils du rendement de la capacité**

Les figures V.11 et V.12 nous montrent les profils du rendement de la capacité de diffusion en fonction respectivement de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage.



**FIGURE V.11 :** Variation du rendement de la capacité en fonction du coefficient de dommage  
 $z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_0=0,01\text{cm}$ ,  $H=0,03\text{cm}$ ,  $kl=5\text{cm}^2/\text{s}$



**FIGURE V.12 :** Variation du rendement de la capacité en fonction du coefficient de dommage  
 $z=0,0001\text{cm}$ ;  $L_0=0,01\text{cm}$ ,  $H=0,03\text{cm}$ ,  $\phi= 50 \text{ MeV}$

## Chapitre V : Effet de l'irradiation sur la capacité de diffusion

Le rendement de la capacité diminue lorsque l'énergie d'irradiation ou le coefficient de dommage augmente.

Au voisinage du circuit ouvert, la quantité de charges stockée de part et d'autre de la jonction est plus importante qu'au voisinage du court-circuit. L'impact de l'irradiation sur la capacité de diffusion en circuit ouvert est plus prononcé sur la capacité de diffusion en circuit ouvert que sur la capacité de diffusion en court-circuit; cela a pour effet de réduire le rendement de la capacité de diffusion.

En considérant les expressions des capacités de diffusion en court-circuit et en circuit ouvert  $C_{cc} = \frac{\varepsilon S}{X_{cc}}$  et  $C_{co} = \frac{\varepsilon S}{X_{co}}$ , le rendement de la capacité dépend de l'extension de la zone de charge d'espace.

L'irradiation a pour effet d'augmenter l'extension de cette zone de déplétion.

Cet extension étant plus importante au voisinage du court-circuit qu'en circuit ouvert, d'où la réduction du rendement.

### **CONCLUSION**

Au terme de ce chapitre, nous avons mis en exergue l'influence des paramètres d'irradiation sur la capacité de diffusion, les capacités de diffusion en court-circuit et en circuit ouvert ainsi que la capacité sous obscurité.

Le rendement de la capacité, dépendant des capacités en circuit ouvert et en court-circuit, varie en fonction des paramètres d'irradiation.

La phototension tout comme la densité des porteurs minoritaires de charges dans la base diminue en fonction de l'irradiation, cela a pour effet de réduire les différentes capacités qui ont été étudiées dans ce chapitre à l'exception de la capacité sous obscurité qui n'est modifiée.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] I. Ly, M. Wade, H. Ly Diallo, M.A. El Moujtaba, O.H. Lemrabott, S. Mbodji, O. Diasse, A. Ndiaye, I. Gaye, F.I. Barro, A. Wereme, G. Sissoko, Irradiation Effect on the Electrical Parameters of A Bifacial Silicon Solar Cell Under Multispectral Illumination, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2011), pp. 785 - 788
- [2] G. Sissoko, B. Dieng, A. Correa, M. Adj and D. Azilinin, silicon solar cell space charge region determination by modelling study, proceeding of the world renewable energy conference and exhibition, 1998, Florence, Italy, pp 1852-1855.
- [3] M.M. Deme, S. Mbodji, A. Thiam, A. Dieng, G. Sissoko, revues des énergies renouvelables, Vol 13, N°1, 2010, pp 109-121.
- [4] F.I. Barro, M. Ndiaye, M. Deme, S. Mbodji, E. Ba, G. Sissoko, Influence of grains size and grains boundaries recombination on the space charge layer thickness Z of emitter-base junction's n<sup>+</sup>-p-p solar cell, proceeding of the 23rd European photovoltaic solar energy conference and exhibition, pp 604-607, Valencia, Spain, 2008.
- [5] Ndiaye, M., Détermination des paramètres électriques d'une photopile monofaciale en régime dynamique fréquentiel sous éclairage monochromatique, Dakar, UCAD, Thèse doctorat 3<sup>ème</sup>, 2008, 85p.
- [6] Samira, B., étude des paramètres limitant le rendement d'une photopile à base d'une structure MIS, Batna, UHLB, mémoire master II, 2009, 73p.
- [7] Dème, M.M., Etude à trois dimensions d'une photopile monofaciale en régime statique sous éclairage polychromatique constant et sous différents angles d'incidence de l'éclairage, Dakar, UCAD, Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, 2008, 102p.
- [8] S. Mbodji, M. Dieng, B. Mbow, F.I. Barro, G. Sissoko, three dimensional modelling simulated of diffusion capacitance of polycrystalline bifacial solar cell, journal of Applied sciences and technology (JAST), Vol 15, N° 1&2, 2010, pp 109-114.
- [9] A. Hamidou, A. Diao, S.A. Douani, A. Moissi, M. Thiam, F.I. Barro, G. Sissoko, Capacitance determination parallel junction solar cell under multispectral illumination in steady state, international journal innovation technology .Expl. Eng, 2(3), 2013.
- [10] Mané, R., Etude d'une photopile à jonction verticale parallèle sous éclairage polychromatique et sous irradiation, Dakar, UCAD, mémoire master II, 2013, 48p.
- [11] Gaye, I., Influence de l'irradiation et du coefficient de dommage sur les paramètres électriques d'une photopile au silicium en régime transitoire, Dakar, UCAD, Thèse unique, 2013, 85p.
- [12] A. Thiam, M. Zougrana, H. Ly Diallo, A. Diao, N. Thiam, S. Gueye, M.M. Deme, M. Sarr et G. Sissoko, "Influence of Incident Illumination Angle on Capacitance of a

*Silicon Solar Cell under Frequency Modulation*", Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol .5(04), pp. 1123-1128, 2012.

[13] C. C. Hu, *"Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits"*, United States Edition, New Jersey, 351 pages, 2010.

[14] ] J. P. Colinge et C. A. Colinge, *"Physics of semiconductor devices"*, Kluwer Academic Publishers, 2002.

[15] K. W. Böer, *"Introduction to Space Charge Effects in Semiconductors"*, Springer-Verlag, 2010.

[16] I. Gaye, R. Sam, A. D. Seré, I. F. Barro, M. A. Ould El Moujtaba, R. Mané et G. Sissoko, "Effect of irradiation on the transient response of a silicon solar cell", International Journal of Emerging Trends and Technology in Computer Science, Volume 1, Issue 3, September – October, ISSN 2278-6856, pp. 210-214, 2012.

[17] H. L. Diallo, A. Wereme, A. S. Maiga et G. Sissoko, *"New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell"*, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 42, pp. 203–211, 2008.

[18] M. Ndiaye, *"Etude en regime dynamique frequenciel d`une photopile bifaciale sous eclairement monochromatique determination des parametres electriques"*, Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 2010.

[19] H. El Ghitani and S. Martinuzzi, "influence of junction parameters on the open circuit voltage decayin solat cells", J. Appl. Phys. 66(4), 1989, pp. 1717\_1722.

[20] H. J. Möller, A. house, *"Semiconductors for solar cells"*, Spectroscopy, Solar Cells, Boston 1993, ISBN 0-89006-574-8, pp. 343

### **Conclusion Générale**

Confrontés à l'accroissement incessant des coûts des énergies d'origine fossile, plusieurs pays se tournent vers l'exploitation des énergies renouvelables parmi lesquelles l'énergie solaire occupe une place importante.

La conversion photovoltaïque permet d'obtenir de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. La photopile est le dispositif technique permettant de réaliser cette conversion. La science a mis en œuvre des solutions afin d'améliorer les rendements des différentes photopiles.

Pour notre part nous nous sommes focalisé sur l'étude d'une photopile en silicium à jonction verticale parallèle sous éclairage monochromatique constant, en régime statique et sous irradiation.

L'étude a été réalisée à une dimension et dans le domaine du visible pour les radiations monochromatiques. L'éclairage parallèle à la jonction est uniforme.

Au cours de notre étude nous avons fait la présentation de la photopile constituée de trois grandes parties, décliné son mode de fonctionnement basé sur l'effet photovoltaïque et terminé par une étude théorique.

Dans l'étude théorique, l'expression de la densité de porteurs minoritaires à la base a été déterminée, son comportement lorsqu'on fait varier l'épaisseur de la base a été étudiée.

Les effets de la longueur d'onde et de l'irradiation sur la densité des porteurs minoritaires dans la base, le photocourant, la phototension, les résistances shunt et série ainsi que la capacité de diffusion ont été étudiés. Pour tous ces paramètres électriques, on a étudié leurs profils en fonction de la vitesse de recombinaison par simulation informatique.

L'augmentation de la longueur d'onde provoque une croissance du photocourant, de la phototension, de la capacité et une réduction des paramètres résistifs de la photopile (résistance série et résistance shunt) dans l'intervalle  $[0,40\mu\text{m} ; 0,50\mu\text{m}]$ .

Dans l'intervalle de longueurs d'onde  $[0,52\mu\text{m} ; 0,80\mu\text{m}]$ , nous avons obtenu des résultats contraires.

L'irradiation réduit toutes les grandeurs électriques que nous avons étudiées dans cette thèse à l'exception des résistances shunt et série.

L'on pourra éventuellement étendre l'étude :

- A trois dimensions
- En faisant varier l'angle d'incidence des rayons lumineux
- En incluant un champ magnétique
- En appliquant un champ électrique extérieur
- En régime dynamique fréquentiel ou dynamique transitoire

## BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- [1] E. Nanéma, *“Modélisation d’une photopile bifaciale au silicium : méthodes de détermination des paramètres de recombinaison”*, Thèse de 3ème cycle, UCAD, Sénégal, 1996.
- [2] G. C. Jain, S.N. Singh and R. K. Kotnala, *“Diffusion length determination in n<sup>+</sup>-p<sup>+</sup>-p<sup>+</sup> structure based silicon solar cells from the intensity dependence of the short-circuit current for illumination from the p<sup>+</sup> side”*, Solar cells, 8, pp.239 – 248, 1983.
- [3] J. S. Park, F. A. Lindholm and A. Neugroschel, *“An analytical study of the p/n junction spacecharge region under high forward voltage”*, J. Appl. Phys. 62(3), pp. 948 - 953, 1987.
- [4] A. Zondervan, L. Verhoef, F. A. Lindholm and A. Neugroschel, *“Electrical short-circuit current decay: Practical utility and variations of the method”*, J. Appl. Phys. 63, 5563, doi: 10.1063/1.340333, 1988.
- [5] U. C. Ray and S. K. Agarwal, *“Wavelength dependence of short-circuit current decay in solar cells”*, J. Appl. Phys. 63(2), pp. 547 - 549, 1988.
- [5] E. Ya. Shvets, S. L. Khrypko, and E. I. Zubko, *“Investigation of Methods Used in Calculations of Solar Cell Parameters”*, Zaporozhye, Ukraine, vol.52, pp.16-23, 2009.
- [6] M. M. Dione, M. Thiame, Z. Nouhou, A. Samoura, F. I. Barro et G. Sissoko, *“Etude en régime statique d’une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairage monochromatique”*, J. Sci. Vol. 9, N° 1, pp. 43 – 50, 2009.
- [7] Gover, P. Stella, *“Vertical multijunction solar cell one dimension analysis”*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. Ed-21, No. 6, pp. 351-356, 1974.
- [8] C. T. Sah, R. N. Noyce and W. Shockley, *“Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics”*, Proceedings of the IRE, Volume 45, Issue 9, pp. 1228 – 1243, 1957.
- [9] G. E. Ayvazian, G. H. Kirakosyan, G. A. Minasyan, *“Characteristics of solar cells with vertical p-n junction”*, Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp.117 – 119, 2004
- [10] F. I. Barro, A. S. Maiga, A. Wereme et G. Sissoko, *“Determination of recombination parameters in the base of a bifacial silicon solar cell under constant multispectral light”*, Phys. Chem. News 56, pp.76-84, 2010
- [11] S. R. Wenham, M.A. Green, M. E. Watt et R. Corkish, *“Applied Photovoltaics”*, 2nd edition, ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, 2007.
- [12] M.L.Sow, phénomènes de recombinaison dans la photopile en régimes statique et transitoire, these de doctorat 3<sup>e</sup> cycle, FST, UCAD, 1995.

## *Références bibliographiques*

[13]S.Madougou,determination des paramètres électriques d'une photopile bifaciale au silicium en régime statique sous éclairnement multispectral constant et sous irradiation, these de doctorat 3<sup>e</sup> cycle ,FST,UCAD, 2004.

[14]A.Fickou,mise en evidence des courants de generation-recombinaison dans les cellules photovoltaïques au silicium, these de doctorat 3<sup>e</sup> cycle ,FST,UCAD, 1992.

[13].F, WISE. Vertical junction solar cell, U.S Patent 3690953, (1970)

[14].Sayad, Y., Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumiere-matiere, Lyon ,INSA ,THESE,2009,136p.

[15].Terrazonni-vaudrix,V., Cellules solaires en couches minces de silicium amorphe: effet du substrat réflecteur texture et de la couche intrinsèque sur le courant photogénéré,Neuchatel,Université de Neuchatel,THESE,2004,123p.

[16].Hassens, B., Application à l'électronique moléculaire de couches minces des matériaux organiques, Sétif, UFAS, THESE, 2012, 132p.

[17].Mané,R.,Etude d'une photopile à jonction vertical parallèle sous éclairnement polychromatique et sous irradiation, Dakar, UCAD, mémoire MasterII,2012,48p.

[18].Gaye,I.,Influence de l'irradiation et du coefficient de dommage sur les paramètres électriques d'une photopile au silicium en régime transitoire, Dakar, UCAD,These unique,2013,85p.

[19].Dème, M.M, Etude à trois dimensions de la capacité d'une photopile monofaciale en régime statique, sous éclairnement polychromatique constant et sous différents angles d'incidence de l'éclairnement, Dakar, UCAD, Thèse 3<sup>ième</sup> cycle,2008,102p.

[20]. Favre, W., Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations, Paris, Université paris sud 11, Thèse de doctorat,2011,216p.

[22]Ndour,M.S., Etude de la photopile bifaciale au silicium sous concentration de lumière en présence d'un champ magnétique ou électrique en régime statique et sous éclairnement polychromatique, Thèse doctorat unique, Dakar,UCAD,2015, 159p.

[23]Barro,F.I., Photopile bifaciale sous double éclairnement multispectrale constant. Etude en régime statique et en régime transitoire obtenu par variation du point de fonctionnement, Thèse 3<sup>ième</sup> cycle, Dakar, UCAD, 2003,123p.

[24] M. ZOUNGRANA , Etude en régime statique d'une photopile bifaciale au silicium cristallin sous polarisation électrique et sous éclairnement multispectral constant , Mémoire de DEA de physique, LAME, université de Ouagadougou, Burkina-Faso, 2004

## *Références bibliographiques*

- [25] Dione, M.M., Etude à 3 dimension d'une photopile au silicium polycristallin sous éclairement polychromatique constant : détermination des paramètres électriques, Thèse doctorat unique, Dakar, UCAD, 2013, 107p.
- [26] S. Mbodj, étude en modélisation de l'élargissement de la zone de charge d'espace et de la capacité de transition d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement monochromatique constant, thèse d'état, FST, UCAD, 2009.
- [27] I. Ly, paramètres électriques d'une photopile bifaciale en régime statique en fonction des vitesses de recombinaison : Effet du niveau d'éclairage, thèse nouveau régime, FST, UCAD, 2012.
- [28] G. Sissoko, Etude des Phénomènes Transitoires dans les Cellules Photovoltaïques : Détermination de la Durée de Vie des Porteurs Minoritaires, Thèse de 3ème Cycle, U.C.A.D, Dakar, Sénégal, juillet 1986.
- [29] A. DIAO, Etude en modélisation d'une photopile bifaciale au silicium monocristallin en régime statique, sous éclairement multispectral constant et sous l'effet du champ magnétique constant, Mémoire de DEA, UCAD, Dakar, 2003.
- [30] A. CORREA, Modélisation de la recombinaison aux interfaces d'une photopile au silicium polycristallin en régime stationnaire, Thèse de doctorat de troisième cycle, UCAD, DAKAR, 1996.

N° D'ordre : Université Cheikh Anta Diop de DAKAR 2015-2016

Faculté des Sciences et Techniques

Thèse de Doctorat Unique en Physique et Applications

**Option** : Energie solaire, Matériaux et Systèmes (SOLMATS)

Présentée par :

Mr DIENG Alioune Badara

Titulaire du Master

**Sujet** : Etude, en régime statique, d'une photopile à jonction verticale parallèle sous éclairage monochromatique et sous irradiation.

Soutenue publiquement 15 Octobre 2016 devant le jury composé de :

Président : Grégoire Sissoko Professeur Titulaire FST-UCAD

Directeur : Ibrahima Ly Professeur Assimilé EPT

Rapporteur : Kame Sié Maître de conférences U.O. Burkina Faso

Rapporteur : Senghane Mbodj Professeur Assimilé UADB

Autres Membres : Mamadou Wade Professeur Assimilé EPT

Birame Dieng Professeur Assimilé UADB

**Résumé :**

La résolution de l'équation de continuité qui régit le processus de diffusion des électrons dans la base, nous a permis d'établir l'expression de la densité des électrons et d'en déduire celles de la densité de photocourant et de la phototension en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , de la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  et des paramètres d'irradiation.

Les expressions des résistances série et shunt, de la capacité en fonction de la longueur d'onde, de la vitesse de recombinaison à la jonction et des paramètres d'irradiation sont obtenues à partir de la phototension, de la densité de photocourant et de la densité des électrons dans la base.

Nous avons étudié l'influence de la variation de la longueur d'onde, de la variation de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage sur la densité des électrons dans la base, le photocourant, la phototension, les résistances shunt et série ainsi que la capacité de diffusion de la photopile.

**MOTS CLES** : phototension- photocourant-résistance shunt-résistance série-capacité de diffusion-jonction verticale- longueur d'onde-irradiation- vitesse de recombinaison