

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



GROUPE INTERNATIONAL DE RECHERCHE EN ENERGIE
RENOUVELABLE(GIRER)

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

MEMOIRE DE THESE

Présentée par

Madame Ndeye Madeleine DIOP HANE

Pour obtenir le Diplôme de DOCTORAT UNIQUE EN PHYSIQUE

Option : ENERGIE SOLAIRE, MATERIAUX ET SYSTHEME

SUJET :

ETUDE A UNE DIMENSION D'UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A JONCTION
VERTICALE PARALLELE SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN
MODULATION DE FREQUENCE : EFFETS DE L'IRRADIATION.

Soutenu publiquement le 08/07/2017 devant le jury composé de

Président	Grégoire SISSOKO	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Rapporteurs	Birame DIENG	Maître de Conférences	UADB
	Issa ZERBO	Maître de Conférences	Univ. JOSEPH KI/OUAGA
Examineurs	Mamadou WADE	Maître de Conférences	EPT/THIES
	Ibrahima Ly	Maître de Conférences	EPT/THIES
	Ndeye T SISSOKO	Maître -Assistant	EPT/THIES
	Amadou DIAO	Maître -Assistant	FST/UCAD
Directeur	Hawa Ly DIALLO	Maître de Conférences	Univ./THIES

*ÉCOLE DOCTORALE -PCSTUI-FST-
UCAD-2017*

Ce modeste travail a été effectué sous la direction de Madame Hawa Ly Diallo du Groupe International de Recherche en Energies Renouvelables Dirigé par Mr. GREGOIRE SISSOKO, Professeur titulaire de classe exceptionnelle, Chevalier de l'ordre national du lion, et Rédacteur en Chef du Journal des Sciences (www.cadjds.org) au département Physique de la Faculté des Sciences et Techniques de Dakar-UCAD

Dedicaces

APRES AVOIR RENDU GRACE A DIEU, MAITRE DE L'UNIVERS ET PRIE SUR LE PROPHETE MOUHAMED (PSL).

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL SPECIALEMENT

*A MA MAMAN **CHERIE BINTA KANDE**, LA BRAVE, L'ENDURANTE, MA PARTENAIRE, MA COMPLICE, MA CONFIDENTE, MA CONSEILLERE, MON PLUS QUE TOUT, MERCI POUR TON IMMENSE SOUTIEN (MORAL, FINANCIER,...) !!!MERCI DE TA CONFIANCE VIS-A-VIS DE MON HUMBLE PERSONNE MERCI D'ETRE TOUJOURS A NOTRE CHEVET.JE NE SAURAI TROUVER LES MOTS ADEQUATS POUR TE RENDRE UN VIBRANT HOMMAGE, LONGUE VIE ET SANTE DE FER A TOI <<JE T'AIME PLUS QUE TOUT>>*

*A MON ADORABLE PAPA **SOULEYMANEDIOP**, L'ENDURANT*

L'INFATIGABLE, UN VRAI BATTANT, UN VRAI GUERRIER QUI N'A JAMAIS VOULUT QU'ON AIT FAIM, MERCI D'ETRE TOUJOURS LA POUR TA FAMILLE, MERCI DE REpondre PRESENT A TOUS NOS BESOINS.MERCI PAPA JE T'AIME. QUE LE TOUT PUISSANT T'ACCORDE UNE LONGUE VIE, UNE SANTE DE FER, BEAUCOUP DE BONHEUR, TE RETRIBUE ET T'ACCORDE LA GRACE.

*A MON CŒUR **KALIDOU HANE**, L'HOMME AU CŒUR D'OR, UN VRAI GUERRIER, UN BATTANT, MON PARTENAIRE, MON COMPLICE MON CONFIDENT, MON CONSEILLER, MERCI DE TA COMPREHENSION ET DE TON SOUTIEN,JE T'AIME MON TRESOR. QUE LE TOUT PUISSANT T'ACCORDE UNE LONGUE VIE, UNE SANTE DE FER, BEAUCOUP DE BONHEUR, TE RETRIBUE ET T'ACCORDE LA GRACE.*

*MON ENCADREUR **GREGOIRE SISSOKO**, UN GRAND CHEF,UN VRAI BATTANT,QUI A BEAUCOUP CONTRIBUE DANS CE TRAVAIL, QUI M'A BEAUCOUP SOUTENUE DANS MON CURCUS UNIVERSITAIRE,QUI A ETE COMME UN PERE POUR MOI, MERCI CHEF DE REpondre TOUJOURS PRESENT A NOS BESOINS. QUE LE TOUT PUISSANT VOUS ACCORDE UNE LONGUE VIE, UNE SANTE DE FER, BEAUCOUP DE BONHEUR, VOUS RETRIBUE ET VOUS ACCORDE LA GRACE.*

*MON CHERI **DJADJÉ HANE**, QUI M'A BEAUCOUP SOUTENUE, ET A REpondU PRESENT A MES BESOINS. QUE LE TOUT PUISSANT VOUS ACCORDE UNE LONGUE*

DEDICACES

VIE, UNE SANTE DE FER, BEAUCOUP DE BONHEUR, VOUS RETRIBUE ET VOUS ACCORDE LA GRACE.

A NDEYE THIAM MADAME SISSOKO

MON BEAU PERE NOU DIT SASSY HANE

MES BELLES MERES : MAIMOUNA THIAM, COURA HANE

MES AMI(E)S : YOUSOU TRAORE, KADIA DIALLO, DIATOU DRAME, MAMI DIALLO

MES TANTES

MES ONCLES : ABDOU BALDE

MES FRERES ET SŒURS : MEDOUNE DIOP, SERIGNE DIOP, MA ASTOU DIOP VIEUX DIOP, MBACKE DIOP, MAMAN DIOP ET SEYNABOU DIOP

MES COUSINS ET COUSINES : MARIAMA DIOP, SIRA BALDE

TOUS (TES) CEUX (CELLES) QUI, DE PRES OU DE LOIN, M'ONT SOUTENUE TOUT AU LONG DE MON CURSUS ELEMENTAIRE JUSQU'AU CURSUS UNIVERSITAIRE

Remerciements

Monsieur Grégoire SISSOKO, Professeur Titulaire de classe exceptionnelle à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour avoir bien voulu diriger ce travail. En toute franchise, je ne saurais trouver les mots pour vous exprimer ma profonde gratitude. Vous avez toujours été là pour moi : comme un père, disponible, un soutien dans tous les domaines ; vous m'avez ouvert les portes de votre maison. Bref, je n'aurai pas assez de mots pour vous remercier. Vous êtes pour la promotion de la recherche, une référence pour la jeunesse africaine, un homme exceptionnel, de conviction et plein de sagesse. Vous ne ménagez aucun effort pour accompagner les jeunes chercheurs. Vous êtes accueillant, attentif à mes différentes sollicitations et à l'égard des autres. Vous me faites un immense honneur en m'intégrant dans votre équipe de recherche (GIRER). Que le Tout Puissant vous accorde une longue vie, une santé de fer, beaucoup de bonheur vous rétribue et vous accorde la grâce.

Madame Hawa Ly DIALLO, Maître de conférences, Chef de département à l'Université de Thiès pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse et de participer à ce jury. Nous vous disons tous un grand merci pour tout le travail abattu pour une bonne réussite de ce Doctorat. Vous avez toujours été accueillante et avez répondu présente à toutes nos sollicitations. Nous vous sommes d'une très grande reconnaissance. Que le Tout Puissant vous rétribue et vous soutienne dans toutes vos œuvres et que vous continuiez à servir l'Université de Thiès.

Monsieur Birame DIENG, Maître de conférences à UADB pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous accorde bonheur et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Monsieur Issa ZERBO, Maître de conférences à Université JOSEPH KI/OUAGADOUGOU pour votre disponibilité, et l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que le Tout Puissant vous rétribue et vous assiste dans vos projets.

Monsieur Ibrahima Ly, Maître Assistant à EPT pour votre simplicité, votre gentillesse et pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

REMERCIEMENTS

Monsieur Mamadou WADE, Maître de Conférences à EPT. Nous vous sommes d'une grande reconnaissance. Vous avez toujours répondu présent à toutes nos sollicitations. Nous prions Allah de vous accorder une longue vie avec une santé de fer, beaucoup de bonheur et la réalisation de vos projets souhaités à l'avenir.

Madame Ndeye THIAM SISSOKO, pour la manière dont vous prenez soin de notre chef et de ses marmites, Mention spéciale à vous. Vous avez toujours été égale à vous-même, simple, souriante et accueillante. Un grand merci à vous. Que le Tout Puissant vous laisse avec notre honorable chef jusqu'à ce que la mort vous sépare et vous assiste dans tous vos projets.

Monsieur Amadou DIAO, Maître Assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Que Dieu le Tout Puissant vous récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Je remercie toute ma famille : mon père Souleymane DIOP, ma mère Binta KANDE qui m'ont soutenue depuis toute petite et qui ont beaucoup fait pour mon éducation et mon adorable et gentil mari Kalidou HANE qui m'a beaucoup soutenu dans tous mes projets et qui a été aussi très compréhensif; mon chéri Djadié HANE mes frères et sœurs ; à toute ma belle-famille et Qu'Allah le Tout Puissant, le Miséricordieux vous protège par la grâce du Prophète Mouhamad (PSL).

Je remercie également tous mes camarades chercheurs, mes amis de l'EPT, et ceux de l'UCAD. Vous avez été toujours disponibles à mes innombrables sollicitations.

Que le Tout Puissant vous fasse récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

Recevez la bénédiction de Serigine Touba Khadim Rassoul (RTA) mon guide confrérique et que chacun reçoivent le bonus de son guide de surcroît.

Table des matières

Table des matières

LISTE DES FIGURES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
NOMENCLATURE.....	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	20
INTRODUCTION.....	21
I. MODELE DE LA CELLULE SOLAIRE [8] :.....	21
I-1/MODELE D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUES [9] I-1-1/ IDEAL PHOTOVOLTAIC MODEL (MODEL IDEAL D'UNE CELLULE SOLAIRE)	22
I-1-2 NOT-IDEAL PHOTOVOLTAIC MODEL (MODELE PHOTOVOLTAÏQUE NON IDEAL).....	22
I-2-1 LES PARAMETRES DE LA CELLULES	24
I-2-2 EXPRESSION DE LA PUISSANCE EN FONCTION DU COURANT	26
I-3 MEASUREMENT OF AC PARAMETERS OF GALLIUM ARSENIDE / GERMANIUM (GAAS /GE) SOLAR CELL BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY [11,12]	28
I-3-1 A NEW CHARACTERIZATION METHODE FOR SOLAR CELL DYNAMIC IMPEDANCE [13].....	29
I-3-2 ENVIRONNEMENT RADIATIF ATMOSPHERIQUE ET TERRESTRE ISSUS DU RAYONNEMENT COSMIQUE [14].....	29
I-4 EFFETS FROM LARGE P SOLAR PROTON EVENTS ON PERFORMANCE OF SPACE SOLAR ARRAYS IN GEOSTATIONARY ORBIT ENVIRONMENT [20].	32
I- 5 RADIATION DAMAGE IN SILICON DETECTORS[21].	32
I-6 RADIATION EFFECT TEST FOR SINGLE-CRYSTALLINE AND POLYCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS [22].	33
I-7 QUANTIFY INGLOW ENERGY PROTON DAMAGE IN MULTIJUNCTION SOLAR CELLS [23].....	33
I-8 ANALYSIS AND MODELING OF ELECTRON AND PROTON IRRADIATION EFFECTS IN CU (IN,GA)SE2 SOLAR CELLS [24].	34
I-9 DISPLACEMENT DAMAGE DOSE ANALYSIS OF PROTON IRRADIATED CIGS SOLAR CELLS ON FLEXIBLE SUBSTRATS[25].	34
I-10 ELECTRON AND PROTON RADIATION STUDY OF GAINP2/GAAS/GE SOLAR CELL[25].	35

Table des matières

I-11 RADIATION RESPONSE ANALYSIS OF TRIPLE JUNCTION IN GAP/ INGAAS/GE SOLAR CELLS[27].	35
I-12 THEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF IRRADIATION ON A SILICON SOLAR CELL UNDER MULTISPECTRAL ILLUMINATION.	36
CONCLUSION	36
CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DE LA PHOTOPILE A JONCTION VERTICAL SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL: EFFET DE L'IRRADIATION	20
INTRODUCTION	21
II-1 LA PHOTOPILE A JONCTION VERTICALE [3-28].	21
II-1-1 DESCRIPTION D'UNE PHOTOPILE A JONCTION VERTICALE	22
II-1-2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT [33,34]	23
II-2 EQUATION DE CONTINUTE	23
II-2-1 RESOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUTE SANS SECOND MEMBRE	25
II-2-2 SOLUTION PARICULIER DE L'EQUATION DE CONTINUTE AVEC SECOND MEMBRE	26
II-2-3 SOLUTION GENERALE DE L'EQUATION DE CONTINUTE	26
II-2-4 CONDITIONS AUX LIMITES	26
II-3 ETUDE DE LA DENSITE RELATIVE DES PORTEURS MINORITAIRES DANS LA BASE DE LA PHOTOPILE EN SITUATION DE COUR CIRCUIT ET EN SITUATION CIRCUIT OUVERT	27
II-3-1 Influence du coefficient de dommage k_l	27
II-3-2 Influence de l'énergie d'irradiation ϕ_p	28
II-3-3 Influence des faibles fréquences ω	29
II-3-4 Influence des grandes valeurs de la fréquence ω	31
II-3 ETUDE DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT	33
II-3-1 EXPRESSION DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT	33
II-3-2 Influence du coefficient de dommage k_l sur la densité de photocourant sur la densité de photocourant de la photopile en situation de cour circuit en situation de circuit ouvert.	33
II-3-3 Influence de l'énergie d'irradiation ϕ_p	34
II-3-4 Influence de la fréquence ω	36
II-3-5 Influence de la profondeur z	37
II-4 ETUDE DE LA DENSITE DE PHOTOTENSION	38
II-4-1 EXPRESSION DE LA DENSITE DE PHOTOTENTION	38

Table des matières

II-4-2 Influence de la profondeur z	39
II-4-3 Influence de la fréquence ω	40
II-4-3 Influence de l'énergie d'irradiation ϕ_p	41
II-5 CARACTERISTIQUE I-V :	42
II-5-1 Influence de la fréquence ω sur de densité de photocourant en fonction de la phototension.	42
II-5-2 Influence de l'énergie d'irradiation sur l densité de photocourant en fonction de la phototension.	43
II-6 DETERMINATION DE LA RESISTANCE SERIE R_s	44
II-6-1 Influence de l'énergie d'irradiation sur la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison.	45
II-6-2 Influence du coefficient de dommage sur la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison.	45
II-7 DETERMINATION DE LA RESISTANCE SHUNT R_{sh}	46
II-7-1 Influence du coefficient de dommage sur la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison.	47
II-7-2 Influence du coefficient de dommage sur la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison.	48
CONCLUSION	48
CHAPITRES III : ETUDES DE LA CAPACITE	50
INTRODUCTION.....	51
III-1 ETUDE DE LA CAPACITE DE LA ZONE DE CHARGE D'ESPACES	51
III.1-1 EXPRESSION DE LA CAPACITE	51
III-1-2 Influence du coefficient de dommage sur la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison.	51
III-1-2 Influence de la fréquence sur la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison.	52
III-2 DIAGRAMME DE NYQUIST DE LA CAPACITE.....	53
III-2-1 Influence de l'énergie d'irradiation sur la capacité de la photopile en position de cour circuit et de circuit ouvert.....	53
III-3 DIAGRAMME DE BODE DE LA CAPACITE	55
III-4 Méthode de détermination du modèle électrique équivalent C_0 [47]:	56
CONCLUSION	58
CONCLUSION GENERALE	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	60

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I- 1 : Schéma équivalent d'une cellule solaire</i>	21
<i>Figure I- 2 : Caractéristique I-V en conditions standards.....</i>	25
<i>Figure I- 3 : Caractéristiques I-V paramétrées par IL</i>	26
<i>Figure I- 4 : Puissance en fonction du courant $P=F(I)$ pour diverses valeurs de IL.....</i>	27
<i>Figure I- 5 : Circuit équivalent électrique d'une cellule solaire</i>	29
<i>Figure I- 6 : Flux total des particules présentes dans l'atmosphère en fonction de l'altitude</i>	30
<i>Figure II- 1 : Photopile à jonction verticale parallèle de type n+-p-n+</i>	22
<i>Figure II- 2 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différente valeur de kl: $z=0.001\text{cm}$, $\omega=10^3\text{rad/s}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.</i>	27
<i>Figure II- 3 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de Φ_p: $z=0.001\text{cm}$, $\omega=10^3\text{rad/s}$, $kl=15\text{MeV/cm}^2$.</i>	28
<i>Figure II- 4 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de Φ_p: $z=0.001\text{cm}$, $\omega=10^3\text{rad/s}$, $kl=15\text{MeV/cm}^2$.....</i>	29
<i>Figure II- 5 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base: $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.....</i>	30
<i>Figure II- 6 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base: $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.....</i>	30
<i>Figure II- 7 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différente valeur de la fréquence: $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.....</i>	31
<i>Figure II- 8 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différente valeur de la fréquence: $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.....</i>	32
<i>Figure II- 9 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de kl: $z=0.001\text{cm}$, $\omega=15\text{rad/s}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.....</i>	33
<i>Figure II- 10 : Densité de photocourant en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p: $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.....</i>	35
<i>Figure II- 11 : Densité de photocourant en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p: $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.....</i>	35
<i>Figure II- 12 : Densité de photocourant en fonction de la profondeur pour différente valeurs de Sf : $z=0.001\text{cm}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.....</i>	36
<i>Figure II- 13 : Densité de photocourant en fonction de la profondeur pour différente valeurs de Sf : $z=0.001\text{cm}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.....</i>	37
<i>Figure II- 14 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de z : $\Phi_p=100\text{MeV}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.....</i>	38
<i>Figure II- 15 : Densité relatif de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de z: $\omega=15\text{rad/s}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.</i>	39
<i>Figure II- 16 : Densité de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de la fréquence: $z=0.001\text{cm}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.</i>	40
<i>Figure II- 17 : Densité de phototension en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p : $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.....</i>	41
<i>Figure II- 18 : Densité de phototension en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p : $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.....</i>	42

LISTE DES FIGURES

<i>Figure II- 19 : Densité de photocourant en fonction de la phototention pour différente valeur de la fréquence : $z=0.001\text{cm}$, $kl=10\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$, $\phi_p=100\text{MeV}$.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure II- 20 : Densité de photocourant en fonction de la phototention pour différente valeur de ϕ_p : $z=0.001\text{cm}$, $kl=10\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure II- 21 : Schéma de la photopile en fonctionnement de court-circuit.</i>	<i>44</i>
<i>Figure II- 22 : Résistance Série en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de ϕ_p: $z=0.001\text{cm}$, $kl=10\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure II- 23 : Résistance Série en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différente valeur de kl: $z=0.001\text{cm}$, $\phi_p=100\text{MeV}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure II- 24 : Schéma de la photopile en fonctionnement de court-circuit.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure II- 25 : Résistance Shunt en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différente valeur de ϕ_p $z=0.001\text{cm}$, $kl=10\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure II- 26 : Resistance Shunt en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différente valeur de kl : $z=0.001\text{cm}$, $kl=10\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III- 1 : Capacité en Fonction de la Vitesse de Recombinaison à la Jonction pour différente valeur du coefficient de dommage : ($z=0.001\text{cm}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure III- 2 : Capacité en Fonction de la Vitesse de Recombinaison à la Jonction pour différente valeur de la fréquence ($\Phi_p=100\text{MeV}$, $z=0.001\text{cm}$).</i>	<i>53</i>
<i>Figure III- 3 : Partie imaginaire de la Capacité en Fonction de sa réelle pour différentes valeurs de ϕ_p : ($z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$).....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III- 4 : diagramme de Bode de la capacité.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure III- 5 : Circuit étriqué équivalent de la capacité de la photopile près d'un court-circuit.....</i>	<i>58</i>

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : différentes valeurs des coefficients tabulés a_i et b_i sous $AM=1.5$</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 2 : Valeurs de résistance parallèle et de la résistance Série en situation de court-circuit de la capacité.</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 3 : Valeurs de résistance parallèle et de la résistance Série en situation de circuit ouvert de la capacité.</i>	<i>57</i>

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

Symboles	Désignations	Unités
D_ϕ	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base	$(\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$
$D(\omega,kl,\phi_p)$	Coefficient de diffusion des porteurs dans la base en présence d'irradiation	$(\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$
ϕ_p	énergie d'irradiation	(MeV)
$G(z, t)$	Taux de génération global	$(\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1})$
$g(z)$	Taux de génération spatial	(cm^{-3})
H	Epaisseur de la base	(cm)
J_{ph}	Densité de photo courant	$(\text{A}.\text{cm}^{-2})$
J_{cc}	Densité de photo courant de court-circuit	$(\text{A}.\text{cm}^{-2})$
KI	coefficient de dommage	$(\text{cm}^{-2}/\text{MeV})$
L_0	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base en l'absence de pulsation et d'irradiation.	(cm)
L_ϕ	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base en présence d'irradiation	(cm)
n_i	Concentration intrinsèque du matériau Si	(cm^{-3})
Nb	Taux de dopage des impuretés dans la base	(cm^{-3})
q	Charge élémentaire de l'électron	(C)
Sf	Vitesse de recombinaison à la jonction	$(\text{cm}.\text{s}^{-1})$
τ	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base	(s)
t	Temps	(s)
T	Température absolue	(°K)
$\delta(x, t)$	Densité de la porteuse minoritaire photo créée dans la base en fonction de l'épaisseur x et du temps t	(cm^{-3})
V	Photo tension	(V)

NOMENCLATURE

V_{co}	Photo tension de circuit ouvert	(V)
V_T	Tension thermique	(V)
ω	Fréquence angulaire	(rad.s ⁻¹)
Z	Profondeur dans la base de la photopile verticale	(cm)

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est une composante fondamentale pour le en deux grandes développement d'un pays. Les sources d'énergie sont diverses et peuvent être classées catégories.

Les sources d'énergie non renouvelables, essentiellement utilisées, dont les quantités sont limitées dans le temps, dans l'espace et qui sont des énergies polluantes.

Les sources d'énergie renouvelables appelées aussi énergies propres (non polluantes) qui sont abondantes et disponibles mais qui restent encore moins exploitées.

Dans le but de répondre aux besoins énergétiques, les recherches se sont intéressées à des sources d'énergie renouvelables. Parmi ces énergies, l'énergie solaire occupe une place de choix par son abondance et sa disponibilité sur la surface terrestre. Elle est obtenue à partir de cellule photovoltaïque ou de centrale solaire thermique grâce au soleil. Nous notons la transformation d'énergie solaire en énergie électrique à l'aide d'un dispositif optoélectronique à semi-conducteur telle que la photopile à jonction verticale [1] ou à jonction horizontale [2-3]. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Cependant, des études ont montré que les meilleures modules ont un rendement de 15 à 20%, ce qui signifie qu'environ 80 % de l'énergie qui arrive sur la surface de la photopile n'est pas transformée en électricité [4,5]. La qualité d'une photopile est liée à ses paramètres électroniques [6] et électriques [7]. Une cellule solaire ou photopile capte l'énergie des photons du rayonnement solaire et la transforme en énergie électrique par création des charges électriques (paires électrons-trous).

Pour les applications terrestres, les sources de rayonnement nuisibles pour les semi-conducteurs sont les phénomènes naturels (rayonnement cosmique, éruption solaire, . . .) et les activités de l'homme (réaction nucléaire). Ces phénomènes engendrent des émissions de particules chargées (ions, électrons, etc.), de neutrons et de photons qui entrent en interaction avec la matière introduisant ainsi des perturbations au niveau des structures atomiques et à l'équilibre électrique des matériaux.

INTRODUCTION GENERALE

La contribution de notre travail consistera à étudier l'effet de l'irradiation et de la fréquence sur les paramètres électroniques et électriques de la photopile à jonction verticale parallèle en régime dynamique fréquentiel. L'influence de l'éclairement polychromatique sera observée.

Ce travail est présenté en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons faire une étude bibliographique sur le modèle d'une cellule solaire puis sur les paramètres intrinsèques ensuite sur l'environnement radiatif et en fin sur l'effet de l'irradiation sur la photopile au silicium.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude théorique de la photopile au silicium à jonction verticale sous éclairage polychromatique. Dans cette partie la résolution de l'équation de continuité nous a permis d'avoir l'expression de la densité relative des porteurs minoritaires, la densité de photocourant, de phototension et de la caractéristique I-V. Les résistances shunt et série sont obtenues à partir de l'exploitation de ces caractéristiques.

Dans le dernier chapitre l'étude de la capacité de la photopile a été proposée. Un modèle électrique équivalent est déduit à partir de la représentation du diagramme de Nyquist et du diagramme de Bode de la capacité.

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

La photopile, depuis sa création en 1957 ne cesse de subir diverses évolutions. Des travaux sur sa caractérisation ont permis d'améliorer son rendement. Dans ce chapitre, en régime dynamique, nous allons présenter un modèle de cellule solaire.

Nous étudierons aussi les paramètres intrinsèques de la photopile et son environnement radiatif. Nous terminerons cette partie par l'étude de l'effet de l'irradiation sur la photopile au silicium.

I. MODELE D'UNE CELLULE SOLAIRE [8] :

Dans cet article, les auteurs ont fait l'étude du modèle à une exponentielle de la cellule solaire pour permettre la reconstitution de la caractéristique I -V et l'estimation de la puissance fournie par un générateur photovoltaïque constitué de cellules solaires au silicium monocristallin. La reconstruction de la caractéristique courant - tension est obtenue par la méthode des trois points (courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, puissance maximale).

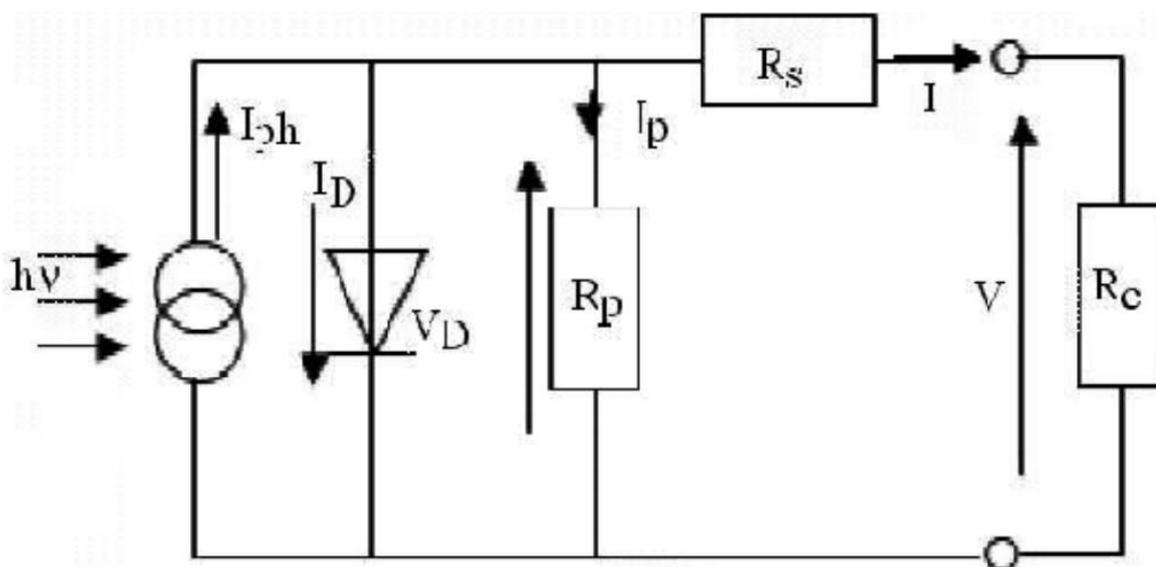


Figure I- 1 : Schéma équivalent d'une cellule solaire

Il existe deux modèles de la cellule photovoltaïque qui sont communément utilisés : le modèle à une exponentielle et le modèle à deux exponentielles. Dans cette étude, nous allons considérer le modèle à une exponentielle. La figure I-1 présente le schéma électrique

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

équivalent de la cellule solaire photovoltaïque conformément au modèle à une exponentielle.

Ce modèle comporte :

- Un générateur de courant délivrant un photocourant I_L généré par la lumière dans la cellule.

Le photocourant qui est proportionnel à la quantité de lumière et à la surface de la barrière de potentiel, laquelle absorbe un courant I_D .

- Une résistance parallèle R_P , et une résistance série R_S représentent respectivement les pertes ohmiques et les fuites de courant dans la cellule.

- Une diode, représentant la jonction P-N dans le silicium. Cette jonction induit une alimentation de charge R_C sous tension V .

I-1/MODELE D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE [8]

I-1-1/ IDEAL PHOTOVOLTAIC MODEL (MODEL IDEAL D'UNE CELLULE SOLAIRE)

Dans le modèle idéal d'une cellule solaire photovoltaïque l'expression du courant peut s'écrire sous la forme

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

I_s =courant de saturation

$V_T = kT/q$ tension thermique

k = constante de Boltzmann.

Ce modèle consiste en une seule diode reliée en parallèle avec une lumière produite par une source courant.

I-1-2 NOT-IDEAL PHOTOVOLTAIC MODEL (MODELE PHOTOVOLTAÏQUE NON IDEAL)

Dans le modèle non idéal d'une cellule solaire photovoltaïque l'expression du courant peut s'écrire sous la forme.

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_S}{V}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans la figure1 appliquons la loi de Kirchhoff [9]

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (3)$$

La tension aux bornes de la diode est:

$$V_D = R_p I_P = V + R_s I \quad (4)$$

Où

I_P représente le courant traversant la résistance parallèle R_p

$$I_P = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (5)$$

Le courant de la diode I_D s'écrit donc sous la forme

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad (6)$$

En remplaçant dans (3), les expressions des courants (5) et (6), on obtient l'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque:

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right] - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (7)$$

n est le facteur d'idéalité de la cellule, qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace.

K: Constante de Boltzmann

T: Température

q: Charge de l'électron

V: Tension appliquée à la charge utilisatrice

I-2-1 LES PARAMETRES DE LA CELLULE

La méthode de détermination des paramètres intrinsèques (n, R_S, R_P, I_0, I_L) utilisée, exploite les données expérimentales fournies par l'auteur dans la section précédente (I_{CC}, I_{CO}, P_M) et un certain nombre d'hypothèses simplificatrices du modèle.

- **Facteur d'idéalité** Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'un facteur d'idéalité. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité, soit. $n=1$

- **Courant photonique** Pour l'estimation du courant photonique I_L si on considère l'expression (6) en situation de court-circuit ($I=I_{CC}, V=0$), on a:

$$I_{CC} = I_L - I_0 \left[e^{\frac{qR_S I_{CC}}{KT}} - 1 \right] - \frac{R_S I_{CC}}{R_P} \quad (8)$$

Dans le cas d'une cellule idéale avec $n=1$ et ($R_S \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$), le courant est approximativement égal au courant photonique:

$$0 = I_L - I_0 \left[e^{\frac{qV_{CO}}{KT}} - 1 \right] - \frac{V_{CO}}{R_P} \quad (9)$$

Dans le cas d'une cellule idéale $\{R_S \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$, et $n=1\}$, on a:

$$V_{CO} = \frac{nKT}{q} \times \text{Log} \left[1 + \frac{I_{CC}}{I_0} \right] \quad (10)$$

La détermination de courant I_0 basée sur l'expression (10), donne un courant qui est très négligeable, de l'ordre de (1.6×10^{-10} A). Ce courant est obtenu en utilisant des approximations.

- **Résistance série**

L'estimation de la résistance série R_S , après quelques corrections pour faire coïncider la caractéristique théorique au point P_M est de l'ordre de 1.2Ω . Cette résistance correspond à la mise en série des 36 résistances des cellules photovoltaïques, d'où la résistance d'une cellule est: 0.033 ohms.

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

•**Représentation graphique** Comme les mesures concernent le module solaire, qui est constitué de 36 cellules disposées en série, nous introduirons le nombre de cellules $M=36$ dans l'expression de la caractéristique en prenant $R_p \rightarrow \infty$ $n=1$, $I_0 = 1.6 \times 10^{-10} A$ $R_S=1.2\Omega$, $I_{CC}=I_L$ ainsi on a :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{(V + R_S I)}{M \times V_T}} - 1 \right) \quad (11)$$

$$\text{Avec } V_T = \frac{KT}{q} \quad (12)$$

Cette expression, obtenue à l'aide des points fournis par le constructeur, permet de reconstituer la caractéristique I-V du module photovoltaïque. Une représentation graphique $I=f(V)$ est donnée à la Fig. 1. On voit bien que les points donnés par le constructeur correspondent avec ceux de la caractéristique tracée.

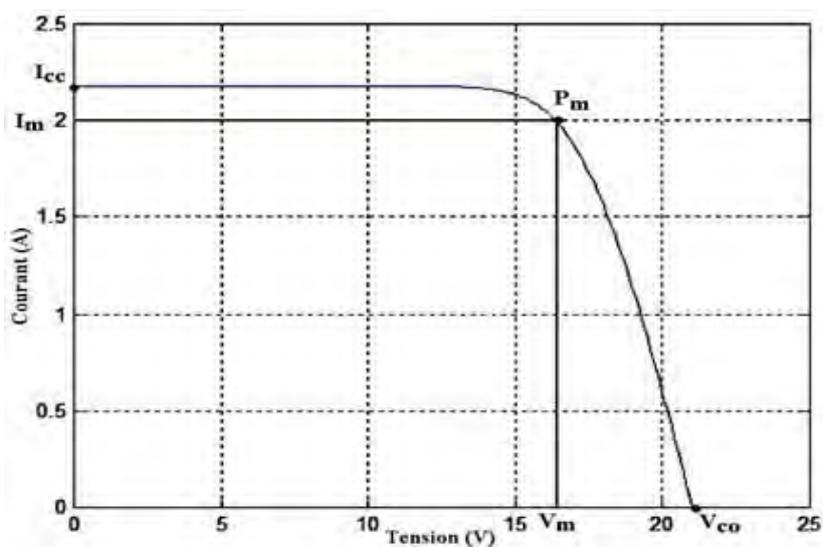


Figure I- 2 : Caractéristique I-V en conditions standards

La figure 2 représente des courbes caractéristiques du panneau solaire utilisé en variant le courant qui dépend directement de l'éclairement reçu par la cellule et de la température de la cellule.

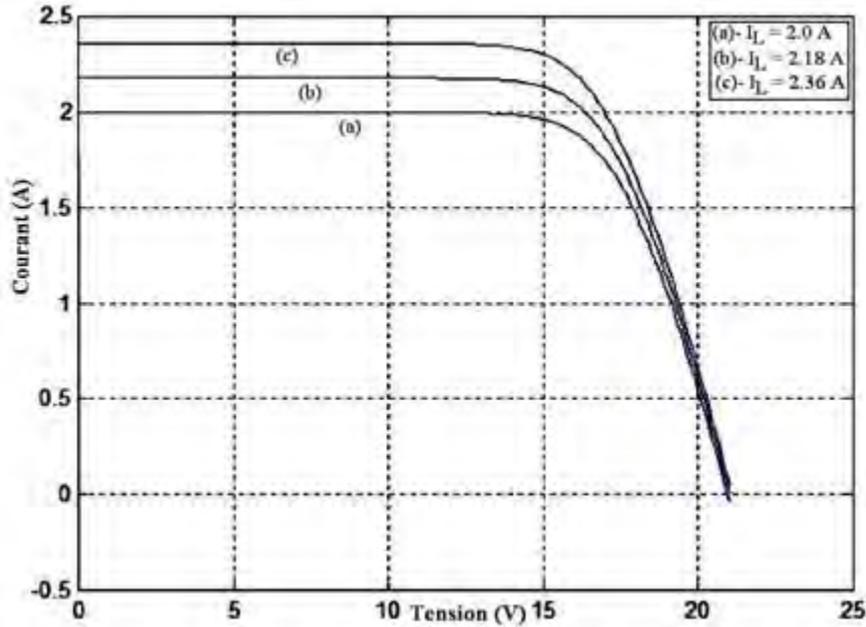


Figure I- 3 : Caractéristiques I-V paramétrées par IL

I-2-2 EXPRESSION DE LA PUISSANCE EN FONCTION DU COURANT

Si on néglige R_p , de l'expression (9), on peut en déduire l'expression de V en fonction de

I. Elle peut s'exprimer explicitement comme suit:

$$V = V_T \left[\ln \left(1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right) - \frac{R_s \cdot I}{V_T} \right] \tag{13}$$

D'où la détermination de la puissance qui s'exprime aussi explicitement en fonction de : I

$$P = V \times I = V_T \left[I \times \ln \left(1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right) - \frac{R_s \cdot I^2}{V_T} \right] \tag{14}$$

Une représentation graphique de la puissance P en fonction du courant I paramétrée par le courant photonique I_L est donné à la figure suivante (Fig. 3).

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

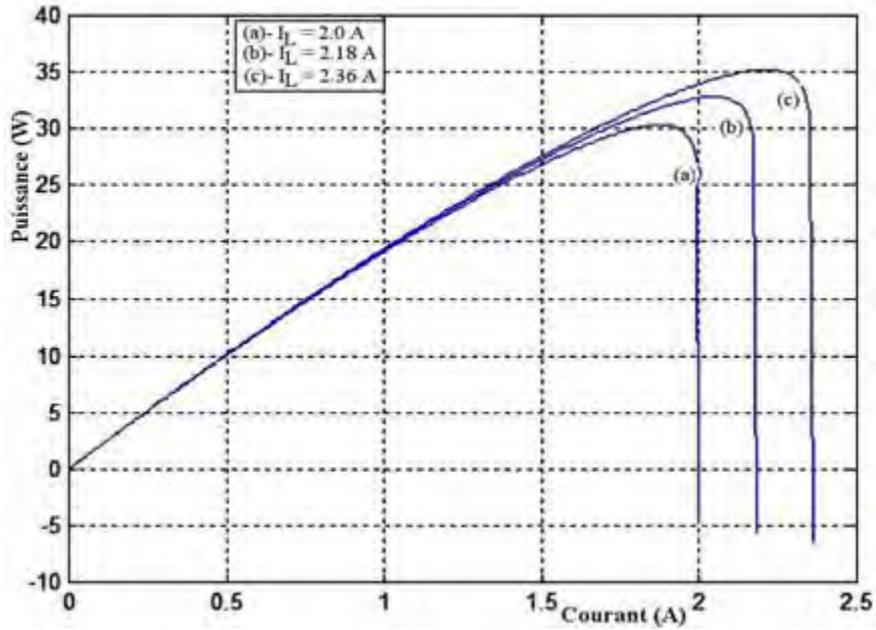


Figure I- 4 : Puissance en fonction du courant $P=F(I)$ pour diverses valeurs de I_L

A titre indicatif, on donnera l'expression de la tension en fonction du courant sans négliger la résistance parallèle de l'équation (7). En utilisant la fonction de Lambert, cette expression peut se mettre sous la forme suivante

$$V = I.R_s + \left[-W \left[\frac{I_0.R_p.e^{\left(\frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_{th}}\right)}}{nV_{th}} \right] + \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_{th}} \right] nV_{th} \quad (15)$$

$$P = I^2.R_s + I \times \left[-W \left[\frac{I_0.R_p.e^{\left(\frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_{th}}\right)}}{nV_{th}} \right] + \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_{th}} \right] nV_{th} \quad (16)$$

Cependant, ce modèle ne permet pas de reconstituer la courbe caractéristique au moyen des trois points. La détermination des paramètres nécessite la courbe expérimentale de la caractéristique de la fig.3: Puissance en fonction du courant $P=F(I)$ pour diverses valeurs de I_L . A titre indicatif, on donnera l'expression de la tension en fonction du courant sans négliger la résistance parallèle de l'équation (7). En utilisant la fonction de Lambert, cette expression peut se mettre sous la forme suivante :

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

$$V = I.R_s + \left[-W \left[\frac{I_0.R_p.e^{\left(\frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_{th}}\right)}}{nV_{th}} \right] + \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_{th}} \right] nV_{th} \quad (17)$$

$$P = I^2.R_s + I \times \left[-W \left[\frac{I_0.R_p.e^{\left(R_p(I+I_L+I_0)\right)}}{nV_{th}} \right] + \frac{R_p(I+I_L+I_0)}{nV_{th}} \right] nV_{th} \quad (18)$$

Cependant, ce modèle ne permet pas de reconstituer la courbe caractéristique au moyen des trois points. La détermination des paramètres nécessite la courbe expérimentale de la caractéristique.

I-3 MEASUREMENT OF AC PARAMETERS OF GALLIUM ARSENIDE / GERMANIUM (GAAS /GE) SOLAR CELL BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY [10,11]

La spectroscopie d'impédance est employée pour la mesure des paramètres que sont la capacité de transition C_t , la capacité de diffusion C_d , la résistance série R_s et la résistance dynamique R_d d'une cellule solaire à l'arséniure de gallium / germanium. Cette cellule est utilisée à l'obscurité et à température constante puis polarisée avec une tension de 0,3 à 0,95V en faisant varier la fréquence de 1 à 60KHz. En donnant le circuit électrique équivalent de la cellule solaire représentée à la figure I-4, utilisant aussi la représentation graphique de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance, les résistances série et parallèle R_p ont été déduites. Il est à noter que la résistance parallèle qui est l'équivalente de celles dynamique R_d et shunt R_T , est égale à R_d lorsque la tension de polarisation tend vers la tension de circuit ouvert et puis égale à R_T si la tension tend vers zéro (court-circuit). La variation de la capacité de la cellule en fonction de la tension de polarisation, a montré une dominance de la capacité de transition pour une tension comprise entre 0,3 et 0,9V mais qu'au-delà de 0,9V, la capacité de diffusion devient plus importante.

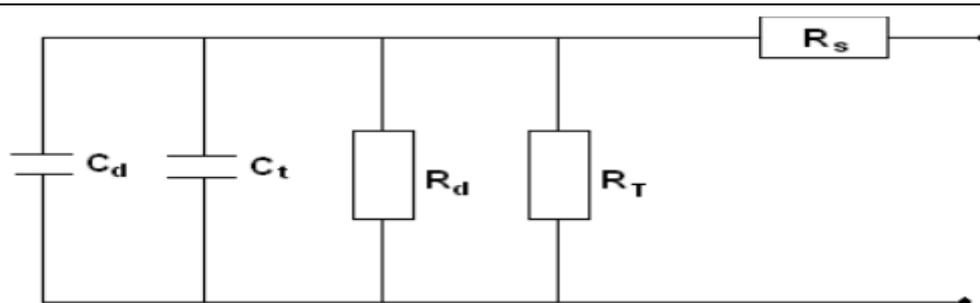


Figure I- 5 : Circuit équivalent électrique d'une cellule solaire

I-3-1 A NEW CHARACTERIZATION METHODE FOR SOLAR CELL DYNAMIC IMPEDANCE [12]

Cet article met en évidence une nouvelle méthode de caractérisation ou méthode d'impédance d'une cellule solaire GaAs/Ge polarisée en DC avec des signaux carrés. Une comparaison avec le signal sinusoïdal est faite pour une meilleure exploitation des résultats. Cette méthode consiste à placer la cellule solaire dans l'obscurité pour ensuite, à partir d'un modèle électrique équivalent, faire une représentation complexe de l'impédance sur un plan complexe. Le modèle électrique proposé est constitué de paramètres électriques tels les capacités de transition et de diffusion, R_d , R_{sh} et R_s les résistances dynamique, shunt et série respectivement, qui dépendent du niveau d'irradiation, de la température, du point de fonctionnement, de la nature des matériaux utilisés et de leurs propriétés géométriques. Le dispositif expérimental utilise un intervalle de fréquence de 1 à 30KHz pour des signaux carrés et a permis de représenter la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance. Les courbes obtenues sont des demi-cercles de rayons et de diamètres connus à partir desquels les résistances dynamique et série sont extraites. Les résultats de cette méthode ont été corroborés par une autre méthode utilisant cette fois-ci des signaux sinusoïdaux avec un dispositif plus complexe.

I-3-2 ENVIRONNEMENT RADIATIF ATMOSPHERIQUE ET TERRESTRE ISSUS DU RAYONNEMENT COSMIQUE [13]

Dans cette partie nous présentons l'environnement radiatif atmosphérique et terrestre. La Terre et son environnement immédiat sont relativement protégés des radiations cosmiques grâce au champ magnétique et à l'atmosphère de la terre. Ceux-ci constituent un véritable écran semi-perméable arrêtant la plus grande partie des radiations issues de l'espace. Cependant, compte tenu de l'intégration de plus en plus poussée, les particules qui

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

franchissent notre barrière naturelle terrestre présentent un niveau de dangerosité qui ne fait qu'augmenter. L'environnement radiatif atmosphérique résulte essentiellement de l'interaction des particules primaires, c'est-à-dire issues des rayonnements cosmiques, avec les atomes constituant les molécules de l'atmosphère (entre autre : 78 % d'azote et 21 % d'oxygène) [14]. L'énergie des particules primaires peut être supérieure au GeV. Les rayonnements les moins énergétiques (<1 GeV) sont renvoyés dans l'espace par le champ magnétique terrestre avant d'atteindre l'atmosphère. Les premières collisions entre les rayons énergétiques (> 1GeV) et l'atmosphère ont lieu aux alentours de 50 km d'altitude. La succession de réactions qui produisent des particules secondaires est appelée cascade neutronique. Elle crée des générations successives de nouvelles particules appelées « rayons cosmiques secondaires » ou « rayons terrestres » d'origine cosmique. Les rayons terrestres d'origine cosmique sont constitués de neutrons (n), de protons(p), de pions (π), de muons (μ), d'électrons (e-) et de photons (γ). Toutes ces particules peuvent potentiellement interagir avec la matière ; nous présentons sur la figure suivante le flux total des particules présentes dans l'atmosphère en fonction de l'altitude.

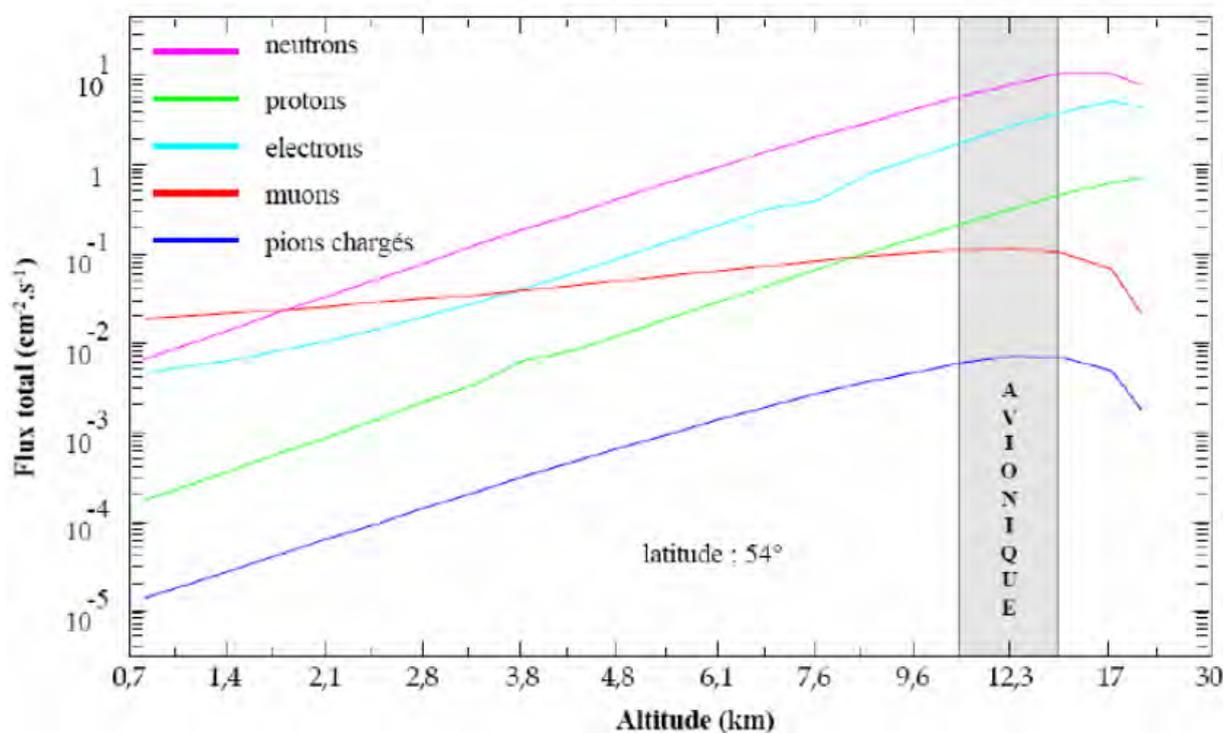


Figure I- 6 : Flux total des particules présentes dans l'atmosphère en fonction de l'altitude

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

De toutes ces particules, les neutrons sont les plus dangereux car n'étant pas chargés, ceux-ci sont très pénétrants dans l'atmosphère. Ils perdent peu d'énergie au contact des molécules de l'atmosphère et demeurent ainsi très abondants au niveau du sol. Leurs interactions nucléaires avec les atomes des matériaux créent des particules ionisantes dites « secondaires » qui sont à l'origine des erreurs induites dans les composants électroniques [15,16].

➤ Le rayonnement alpha :

L'environnement 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. Avec l'intégration technologique et la réduction des charges stockées dans les composants, ils sont à l'origine d'un nombre d'erreurs logiques de plus en plus important au niveau du sol. 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 de certains circuits intégrés (circuits mémoire par exemple).

➤ L'environnement radiatif sous accélérateur

Compte tenu de la présence 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, les composants électroniques sont exposés à des flux de particules radioactives. Au sein même des réacteurs, les produits issus de la fission des combustibles nucléaires sont principalement des neutrons, des particules α et γ à des doses et des débits de dose très élevés (pouvant atteindre le GGy en dose cumulée). Hors réacteurs, on a essentiellement des rayons γ qui sont recensés (de l'ordre du kGy = 1 Mrad). La qualification et la sélection des composants électroniques destinés aux applications spatiales nécessite d'évaluer sur terre les contraintes radiatives prévalant dans l'espace d'où la mise en place de tests accélérés (c'est-à-dire dans des temps relativement courts par rapport aux durées des missions [17-18]). Ceci explique l'utilisation, comme moyens de tests,

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

d'accélérateurs de particules délivrant tout un ensemble de particules (électrons, neutrons, protons et ions lourds) dont l'énergie peut atteindre plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de GeV.

I-4 EFFETS FROM LARGE P SOLAR PROTON EVENTS ON PERFORMANCE OFSPACE SOLAR ARRAYS IN GEOSTATIONARY ORBIT ENVIRONMENT [19].

Les auteurs de cet article présentent une analyse des dégradations des panneaux solaires montés sur deux satellites en orbite géostationnaire suite à des événements solaires importants. En effet, une comparaison entre les prévisions et les courants réels mesurés (c'est-à-dire les performances des différents panneaux solaires) a montré l'influence qu'ont eue les éruptions solaires des 14- 15juillet 2000 et 8-9 novembre 2000.

Les auteurs ont d'abord analysé le rayonnement solaire correspondant à ces deux événements et montré qu'ils transportaient à eux seuls un flux équivalent supérieur au flux annuel normal de protons soit environ $3,5 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Ils ont alors montré que les dégradations occasionnées étaient telles que l'on pouvait conclure ainsi :

- Pour le premier satellite (SESAT), les variations causées sur une période d'une année et cinq mois seraient équivalentes à celles prévues pour une période normale de trois ans soit un écart de 9% par rapport aux prévisions.
- Pour le deuxième satellite, les variations causées sur une période de deux ans sont équivalentes à celles prévues pour une durée de 3,5 ans soit un écart de 12,5%. Les auteurs démontrent ainsi l'importance des événements solaires majeurs sur les performances des panneaux solaires à bord des satellites en orbite géostationnaire.

I- 5 RADIATION DAMAGE IN SILICON DETECTORS[20].

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,
- réduction de la mobilité des porteurs,
- augmentation de la durée de collecte de charge,
- augmentation du temps de montée du signal de sortie,

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Diminution de la sensibilité à l'éclairement. 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.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + kl\phi$$

Dans cette équation, Kl désigne le coefficient de dommage, Φ l'énergie d'irradiation, τ_0 la durée de vie des porteurs avant irradiation et τ celle après irradiation.

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

I-6 RADIATION EFFECT TEST FOR SINGLE-CRYSTALLINE AND POLYCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS [21].

Ce travail présente les résultats de l'irradiation de photopiles mono et poly cristallines par des protons, d'un accélérateur des protons. Les photopiles sont soumises à deux énergies différentes avec deux flux différents (20,3 MeV et $3,24 \cdot 10^{11}$ particules /cm², puis 10,7 MeV et $2,28 \cdot 10^{11}$ particules/cm²) 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 poly cristallines sont 5% inférieures à celles des monocristallines.

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

$$D = D_0 - C \log \left(1 + \frac{\phi}{\phi_0} \right)$$

Où D désigne la performance après irradiation et D_0 celle avant irradiation ; ϕ_0 est un coefficient d'ajustement et ϕ l'énergie d'irradiation.

I-7 QUANTIFY INGLLOW ENERGY PROTON DAMAGE IN MULTIUNCTIONSOLAR CELLS [22]

Irradiation de cellules multi jonctions (trois jonctions) par des protons de faible énergie. Pour cela, ils utilisent la méthode de transport de Monte Carlo (SRIM) basée sur la méthode d'analyse des doses de dommage dus au déplacement. Cette simulation est effectuée dans trois différentes conditions notamment :

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

-Protons mono énergétiques et unidirectionnels avec incidence normale sur les photopiles non couvertes : c'est-à-dire le test de base.

- Protons mono énergétiques et omnidirectionnels -Toujours des protons mono énergétiques et omnidirectionnels dont les trajectoires sont modifiées pour tenir compte du transport du faisceau à travers une vitre protectrice : c'est le cas le plus représentatif pour le milieu spatial. L'objectif essentiel est de trouver les corrélations entre les résultats de tests effectués au sol et les dégradations qui pourraient survenir dans l'espace. Les auteurs montrent alors que dans un environnement spatial, les photopiles multijonctions auront une répartition uniforme pour ce qui concerne les dommages dans les zones actives. De plus, les tests au sol avec des protons de faible énergie n'apportent pas de précision supplémentaire significative aux résultats obtenus si on analyse les résultats en termes de dommage dus au déplacement des particules. Si une dégradation préférentielle d'une région par rapport aux autres régions de la photopile est observée, cela est due surtout aux sensibilités différentes pour chacune des cellules et non à une réelle non uniformité de répartition des dégradation.

I-8 ANALYSIS AND MODELING OF ELECTRON AND PROTON IRRADIATION EFFECTS IN CU (IN,GA)SE₂ SOLAR CELLS [23].

Une étude théorique et expérimentale des défauts créés suite à une irradiation d'une photopile de type CIGS par un flux de protons et des électrons est faite. A partir d'une spectroscopie d'impédance et de l'analyse des dégradations induites sur les propriétés de la photopile, le taux d'injection des défauts pour les CIGS suite à une irradiation par les protons aussi bien que par des électrons a été trouvé. La résistance du CIGS par rapport au bombardement par les électrons est nettement meilleure à celle par les protons ; de plus lors d'un bombardement par des électrons seule la tension de circuit ouvert est détériorée alors que dans le cas du bombardement par les protons, toutes les valeurs montrent que le CIGS semble 1000 fois plus résistant à l'irradiation par les électrons que par les protons.

I-9 DISPLACEMENT DAMAGE DOSE ANALYSIS OF PROTON IRRADIATED CIGS SOLAR CELLS ON FLEXIBLE SUBSTRATS [24].

L'analyse de l'irradiation par des protons de photopile de type CIGS CuIn(Ga)Se₂ est présentée. L'étude montre que les cellules sur substrats flexibles présentent des résultats semblables à celles sur verre en termes de dose de dommage (Dd). Les caractéristiques I-V

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

sous obscurité ont été présentées avant et après irradiation ; elles ont montré que le comportement de la photopile dépendait alors de la tension de polarisation, car pour des faibles tensions de polarisation, le courant d'obscurité est réduit (après irradiation) tandis que pour les tensions de polarisation plus grandes, c'est le contraire : le courant d'obscurité augmente après irradiation. La caractéristique P-V montre que la puissance maximale diminue avec le flux de protons incidents pour cinq types différents de photopile CIGS. Le tracé des points de puissance maximale en fonction de la dose de dommage D_d permet de trouver une relation empirique avec P_0 : puissance maximale avant irradiation, P celle après irradiation, C et D_x des coefficients obtenus par ajustement logarithmique. Cette étude montre que la dégradation primaire causée par l'irradiation par les protons est la réduction de la tension de circuit ouvert due à l'augmentation du courant d'obscurité.

I-10 ELECTRON AND PROTON RADIATION STUDY OF GAINP2/GAAS/GE SOLAR CELL [25].

Les auteurs de cet article présentent les résultats d'irradiation de cellules multi jonctions de type GaInP2/GaAs/Ge sur des protons et des électrons avec différentes énergies mais aussi différents flux de particules. Les paramètres observés sont la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court circuit I_{cc} et la puissance maximale P_{max} ; Les auteurs montrent que dans tous les cas les paramètres étudiés décroissent lorsque l'énergie d'irradiation augmente ou que le flux de particules augmente. Ces dégradations 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 (1MeV, 2MeV, 12MeV). On constate presque les mêmes effets pour 1MeV et 12MeV sauf pour I_{cc} où la dégradation est plus importante pour 1MeV.

I-11 RADIATION RESPONSE ANALYSIS OF TRIPLE JUNCTION IN GAP/INGAAS/GE SOLAR CELLS [26].

Des photopiles tandem à double et triple jonctions InGaP/InGaAs/Ge avec différentes combinaisons stœchiométriques et différentes structures de jonctions internes ont été étudiées sous irradiation par des protons d'énergie ≥ 1 MeV. Les réponses de ces photopiles ont été étudiées à travers des mesures de tension et de rendement quantique et les auteurs ont analysé à travers les résultats obtenus les mécanismes de bases qui gouvernent la réaction de ces photopiles et surtout les combinaisons les plus intéressantes. La sous jonction à base de Ge

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

produit en réalité deux fois plus de courant que les deux autres sous-jonctions dans la 3ème jonction ; ce courant augmenterait avec l'irradiation de sorte que les propriétés de la 3ème jonction pour que les facteurs de forme soient meilleures en fin de vie par rapport aux autres types de jonction. L'ajout d'irradiation dans la cellule intermédiaire ne réduit pas la résistance à l'irradiation par les protons et il en est de même pour l'ajout d'une couche active de germanium. Dans tous les cas toutes les mesures ont montré une plus forte décroissance du courant généré puis de la phototension et dans une moindre mesure du facteur de forme.

I-12 THEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF IRRADIATION ON A SILICON SOLAR CELL UNDER MULTISPECTRAL ILLUMINATION.

Dans ce travail les auteurs ont étudié la photopile bifaciale sous éclairage multispectral et sous irradiation en régime statique. Les paramètres étudiés sont la densité de porteurs, l'extension de la zone de charge d'espace, le photocourant, la phototension, et les vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière. Il ressort de cette étude que les dégradations causées dépendent bien sûr du coefficient de dommage et de l'énergie d'irradiation. Pour l'énergie d'irradiation, il semble que son effet est surtout remarquable au-delà d'un seuil d'environ 10 MeV. A partir de cette valeur les effets sont exacerbés. Les auteurs ont montré aussi comment la photopile réagit pour pratiquement chaque point de fonctionnement.

CONCLUSION

Dans cette partie bibliographique, nous avons pu montrer les travaux de certains auteurs portant sur le modèle de la cellule solaire, sur les paramètres de la cellule : résistance série résistance shunt puis l'étude de la capacité. Dans ce travail, nous allons mener l'étude cette fois en régime dynamique. Nous présenterons l'influence de l'irradiation et du coefficient de dommage sur les paramètres électroniques et électriques d'une photopile à jonction verticale au silicium.

**CHAPITRE II : ETUDE THEORIQUE DE LA PHOTOPILE A JONCTION
VERTICAL SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN REGIME
DYNAMIQUE FREQUENTIEL: EFFET DE L'IRRADIATION**

ETUDE THEORIQUE

INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons d'abord la photopile à jonction verticale [27-28], en régime dynamique fréquentiel sous irradiation en éclairage polychromatique.

Dans la première partie de ce chapitre, nous établirons l'équation de continuité traduisant la diffusion des porteurs en excès générés dans la base. Ce phénomène est observé lorsque la photopile est éclairée par une lumière polychromatique.

Dans la deuxième partie de l'étude de la densité des porteurs minoritaires dans la base sous l'influence de l'irradiation et de la fréquence sont observées lorsque la photopile est en situation de court-circuit et en situation de circuit ouvert.

Dans la dernière partie nous mettrons en exergue l'effet de l'énergie d'irradiation, du coefficient de dommage et de la fréquence de modulation sur la densité de photocourant, la phototension, la caractéristique I-V et les résistances série et shunt.

II-1 LA PHOTOPILE A JONCTION VERTICALE [3-27].

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

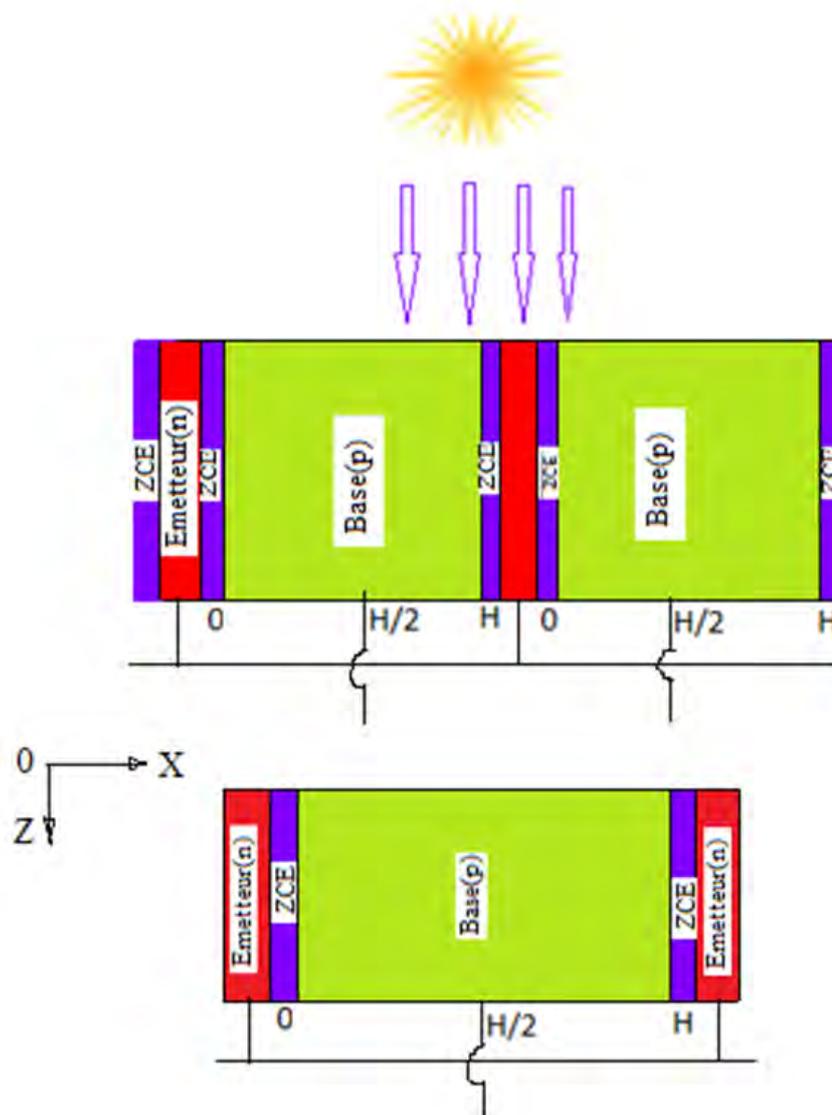


Figure II- 1 : Photopile à jonction verticale parallèle de type n⁺-p-n⁺

II-1-1 DESCRIPTION D'UNE PHOTOPILE A JONCTION VERTICALE

La photopile à jonction verticale est conçue de telle sorte que la lumière incidente arrive parallèlement au plan de la jonction. Elle est essentiellement constituée de trois grandes parties :

- L'émetteur de type (n) qui est dopé en atomes donneurs (atomes pentavalents comme le Phosphore P) avec un taux de dopage élevé (de l'ordre de 10^{17} à 10^{19} atomes/cm³) et dont l'épaisseur est assez faible (de l'ordre de $1\mu\text{m}$) où les porteurs de charge majoritaires sont les électrons (-e) et les porteurs de charges minoritaires sont les trous (+e).

ETUDE THEORIQUE

- La base de type (p) qui est peu dopé en atomes accepteurs (atomes trivalents comme le Bore B) avec un taux de dopage de l'ordre de 10^{15} à 10^{17} atomes/cm³, mais dont l'épaisseur est assez importante (jusqu'à 400 μm) où les porteurs majoritaires sont les trous (+e) et les porteurs minoritaires sont les électrons (-e).
- La zone de charge et d'espace ZCE d'épaisseur inférieure à celle de l'émetteur, qui sépare l'émetteur de la base. Dans cette zone règne un champ électrique E intense dû à la diffusion des porteurs majoritaires entre l'émetteur et la base qui sépare les paires électrons-trous photo générés qui arrivent à la jonction [28, 29]. On connectera un deuxième émetteur séparé de la base par une deuxième jonction afin d'obtenir une photopile de type n⁺-p-n⁺. La succession de ce type de cellules (n⁺-p-n⁺), tout en reliant les bases entre elles afin d'obtenir la borne négative et les émetteurs entre eux pour la borne positive, nous donnera un ensemble de cellules connectées en parallèle [30].

II-1-2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT [31,32]

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur trois mécanismes: absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ; collecte des particules générées dans le dispositif.

II-2 EQUATION DE CONTINUITÉ

Sous l'effet de l'excitation, des paires électron-trou sont générés aussi bien dans la jonction, l'émetteur et la base de la photopile.

Compte tenu des phénomènes de génération, de recombinaison et de diffusion au sein de la photopile, l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base à l'abscisse x en régime dynamique fréquentiel sous irradiation est donnée sous la forme suivante:

$$D(\omega, kl, \phi_p) \frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial \delta(x,t)}{\tau} = -G(z,t) + \frac{\partial \delta(x,t)}{\partial t} \quad \text{II-1}$$

Taux global de génération porteurs minoritaires à la profondeur z sous éclairage polychromatique. [33,34]

ETUDE THEORIQUE

$$G(z) = \sum_{i=1}^3 a_i e^{(-b_i z)} e^{(j\omega t)} \quad \text{II-2}$$

Avec a_i et b_i sont les coefficients tabulés du rayonnement, ω désigne la fréquence angulaire.

$$\delta(x, t) = \delta(x) e^{(j\omega t)} \quad \text{II-3}$$

Les valeurs des coefficients a_i et b_i sous AM=1.5 sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : différentes valeurs des coefficients tabulés a_i et b_i sous AM=1.5

a_i ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	b_i (cm^{-1})
$a_1 = 6,13 \cdot 10^{20}$	$b_1 = 6630$
$a_2 = 0,54 \cdot 10^{20}$	$b_2 = 1000$
$a_3 = 0,0991 \cdot 10^{20}$	$b_3 = 130$

$D(\omega, \phi_p, kl)$ le coefficient de diffusion en régime dynamique fréquentiel sous irradiation [35]

Pour la résolution de cette équation, et la densité des porteurs minoritaires sont respectivement sous la forme suivante :

$$D(\omega, kl, \phi_p) \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} e^{(j\omega t)} - \frac{\partial \delta(x) e^{(j\omega t)}}{\tau} = - \sum_{n=1}^3 a_n e^{(-b_n z)} e^{(j\omega t)} + \frac{\partial \delta(x) e^{(j\omega t)}}{\partial t} \quad \text{II-4}$$

Coefficient de diffusion en fonction de la fréquence, du coefficient de dommage et du flux d'irradiation.

$$D(\omega, kl, \phi_p) = D(kl, \phi_p) \left[\frac{1 + \omega^2 \tau^2}{(1 - \omega^2 \tau^2) + (2\omega\tau)} + \frac{-\omega^2 \tau^2 - 1}{(1 - \omega^2 \tau^2)^2 + (2\omega\tau)^2} j \right] \quad \text{II-5}$$

$$D(kl, \phi_p) = \frac{L(kl, \phi_p)^2}{\tau} \quad \text{II-6}$$

$$L = \sqrt{\tau D} \quad \text{II-7}$$

$$g(z) = n \sum a_i e^{-b_i z} \quad \text{II-8}$$

Avec :

L : la longueur de diffusion des porteurs

$G(z)$: Taux global de génération porteurs minoritaires dépendant de la profondeur z;

ETUDE THEORIQUE

$g(z)$: Taux de génération dépendant de la profondeur

$\delta(x)$: la densité de porteurs minoritaires de charge photogénère ;

$D(\omega, kl, \phi_p)$: Coefficient de diffusion dépendant de la fréquence et de l'irradiation ;

ω : la fréquence angulaire ;

kl : Coefficient de diffusion ;

ϕ_p : Energie d'irradiation ;

Réarrangeons l'expression II-4

$$D(\omega, kl, \phi_p) \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} e^{(j\omega t)} - \frac{\partial(x) e^{(j\omega t)}}{\tau} = -g(z) e^{(j\omega t)} + \frac{\partial \delta(x)}{\partial t} e^{(j\omega t)} \quad \text{II-9}$$

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\partial(x)}{\tau D(\omega, kl, \phi_p)} = -\frac{g(z)}{D(\omega, kl, \phi_p)} \quad \text{II-10}$$

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\partial(x)}{L^2(\omega, kl, \phi_p)} = -\frac{g(z)}{D(\omega, kl, \phi_p)} \quad \text{II-11}$$

II-2-1 RESOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUITÉ SANS SECOND MEMBRE

L'équation de continuité excepté son second membre s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial^2 \delta_1(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_1(x)}{L^2(\omega, kl, \phi_p)} = 0 \quad \text{II-12}$$

D'où la résolution qui mène à la relation suivante :

$$\delta_1(x) = A \cosh \left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi_p)} \right] + B \sinh \left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi_p)} \right] \quad \text{II-13}$$

ETUDE THEORIQUE

II-2-2 SOLUTION PARTICULIER DE L'EQUATION DE CONTINUTE AVEC SECOND MEMBRE

L'équation avec second membre s'écrit comme suit :

$$-\frac{\delta_2(x)}{L^2(\omega, kl, \phi_p)} = -\frac{g(z)}{D(\omega, kl, \phi_p)} \quad \text{II-14}$$

$$\delta_2(x) = \frac{L(\omega, k, \phi_p)^2}{D(\omega, kl, \phi_p)} \cdot \sum a_i e^{-b_i z} \quad \text{II-15}$$

II-2-3 SOLUTION GENERALE DE L'EQUATION DE CONTINUTE

Après une résolution détaillée de l'équation de continuité, on obtient la solution générale sous la forme suivante :

$$\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x) \quad \text{II-16}$$

D'où :

$$\delta(x) = \frac{L(\omega, kl, \phi_p)^2}{D(\omega, kl, \phi_p)} \sum a_i e^{-b_i z} + A \cosh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi_p)}\right] + B \sinh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi_p)}\right] \quad \text{II-17}$$

II-2-4 CONDITIONS AUX LIMITES

Les constantes A et B sont déterminées par les conditions aux limites suivantes

•A la jonction $x=0$

$$\left[D(\omega, kl, \phi_p) \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right]_{x=0} = [Sf\delta(x)]_{x=0} \quad \text{II-18}$$

Avec Sf la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaire à la jonction n-p[36, 37]

•Au milieu de la base $x = \frac{H}{2}$

ETUDE THEORIQUE

$$\left[D(\omega, kl, \phi_t) \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right]_{x=\frac{H}{2}} = 0 \quad \text{II-19}$$

La solution générale de l'équation II-1 est donnée par :

$$\delta(x) = \left[\frac{L(\omega, kl, \phi_t)^2}{D(\omega, kl, \phi_t)} \sum_{n=1}^3 a_n e^{(-b_n z)} + A \cosh \left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi_t)} \right] + B \left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi_t)} \right] \right] \quad \text{II-20}$$

$\delta(x)$: Densité des porteurs minoritaires de charge

II-3 ETUDE DE LA DENSITE RELATIVE DES PORTEURS MINORITAIRES DANS LA BASE DE LA PHOTOPILE EN SITUATION DE COURT CIRCUIT ET EN SITUATION DE CIRCUIT OUVERT.

II-3-1 Influence du coefficient de dommage kl

A la figure II.2, nous présentons la variation de la densité relative des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du coefficient de dommage.

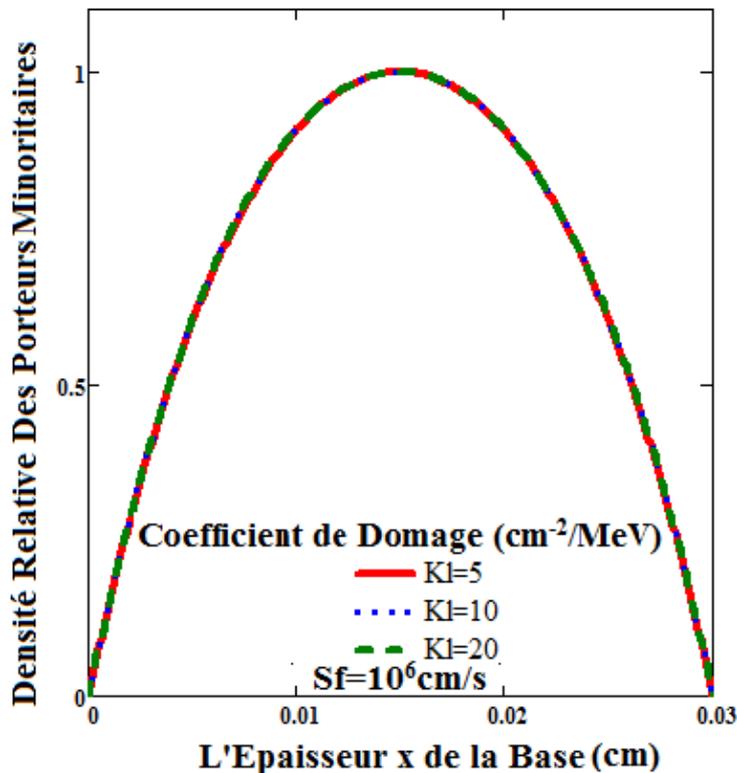


Figure II- 2 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeur de kl: $z=0.001\text{cm}$, $\omega=10^3\text{rad/s}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.

ETUDE THEORIQUE

Nous observons aux deux jonctions c'est-à-dire à la jonction de gauche et à la jonction de droite le même gradient pour une photopile en fonctionnement de court-circuit.

A l'émetteur gauche (x comprise entre 0 et 0.015cm) la courbe de densité relative des porteurs minoritaire augmente alors que à l'émetteur droite (x comprise entre 0.015cm 0.03cm) elle diminue.

Ces deux situations traduisent un gradient positif où les porteurs minoritaires travers la jonction et participe au photocourant.

Le gradient nul est situé à une valeur maximale de la densité à $x=0.015\text{cm}$, à cette position les porteurs sont bloqués à la jonction correspondant ainsi à une situation de court circuit.

II-3-2 Influence de l'énergie d'irradiation ϕ_p

Aux figures II.3 et II.4, nous présentons la variation de la densité relative des porteurs minoritaires en fonction l'épaisseur de la base pour différents valeurs de l'énergie d'irradiation de la photopile en situation de cour circuit et de circuit ouvert.

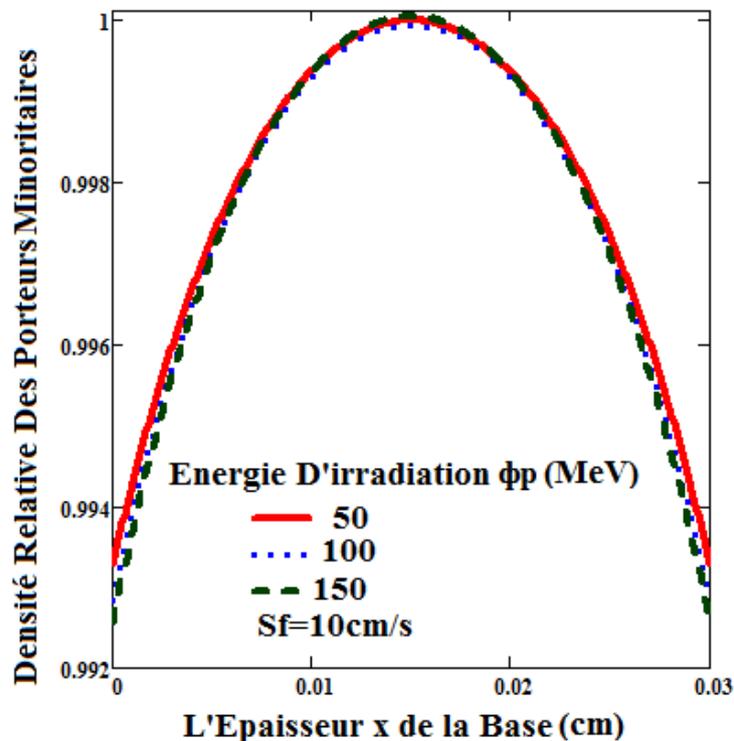


Figure II- 3 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de Φ_p : $z=0.001\text{cm}$, $\omega=10^3\text{rad/s}$, $kl=15\text{MeV/cm}^2$.

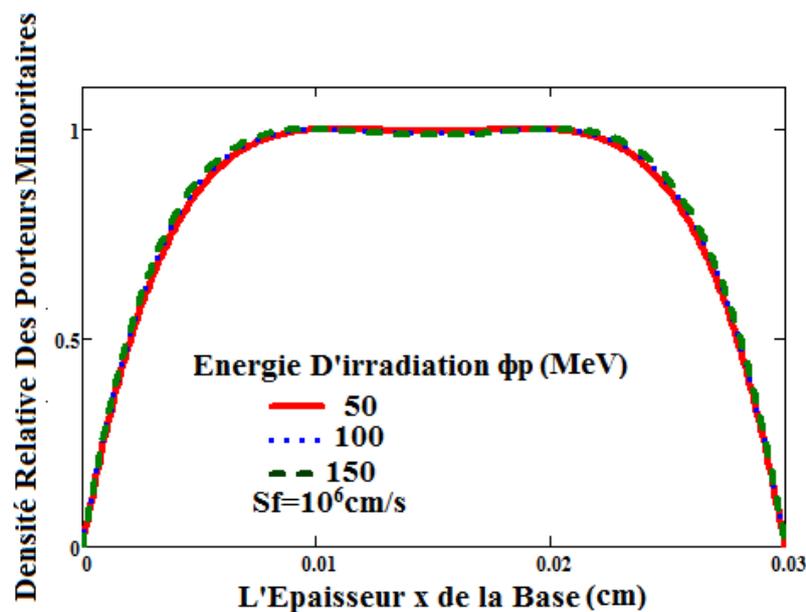


Figure II- 4 : Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de $\Phi_p: z=0.001\text{cm}$, $\omega=10^3\text{rad/s}$, $kl=15\text{MeV/cm}^{-2}$.

A la figure II-3, la densité relative des porteurs minoritaires augmente avec la profondeur dans la base jusqu'à la valeur $x = x_0$ où nous observons un pic puis une diminution.

A la figure II-4 la densité augmente jusqu'au maximum où on observe un palier puis diminue avec l'augmentation de l'énergie d'irradiation.

Dans le premier cas, la densité relative des porteurs minoritaires atteint son maximum en $x=0.015\text{cm}$. Le gradient y est nul et les porteurs sont bloqués à la jonction correspondant au court circuit.

Dans le deuxième cas à la différence du premier nous remarquons un palier entre $x=0.01$ et $x=0.02\text{cm}$. Ceci peut être expliqué par le fait que la photopile est en situation de court circuit.

En effet, au voisinage du circuit ouvert, les porteurs de charge minoritaires sont stockés à la jonction alors qu'en court-circuit, une importante quantité de porteurs minoritaires traverse la jonction pour participer au photocourant.

II-3-3 Influence des faibles fréquences ω .

Les figures II.5 et II.6 présentent la variation de la densité relative des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour des faibles valeurs de la fréquence ω en situation de court-circuit et de circuit ouvert.

ETUDE THEORIQUE

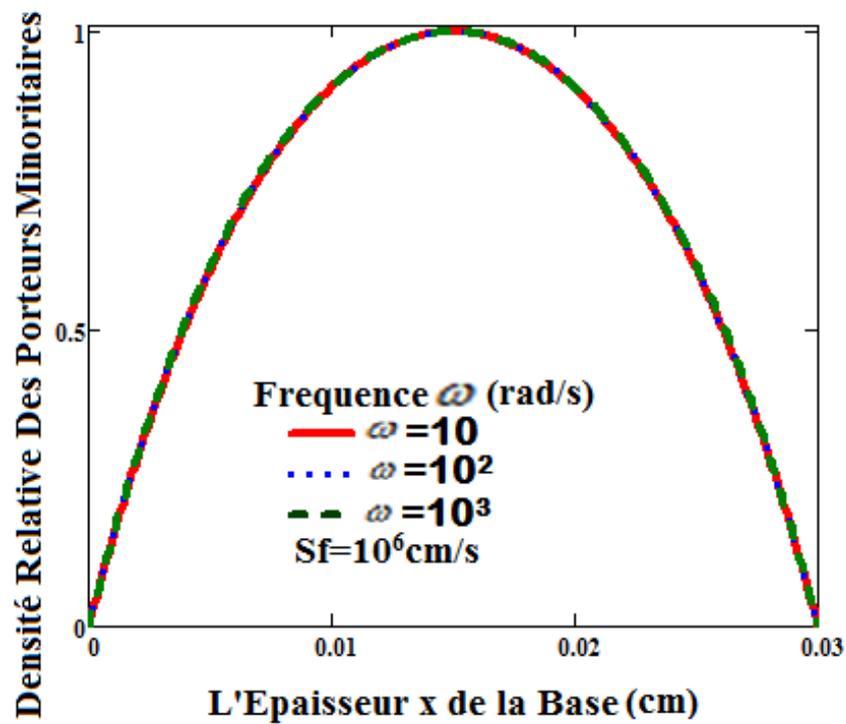


Figure II- 5 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base: $z=0.001$ cm, $kl=15$ cm⁻²/MeV, $\Phi_p=100$ MeV

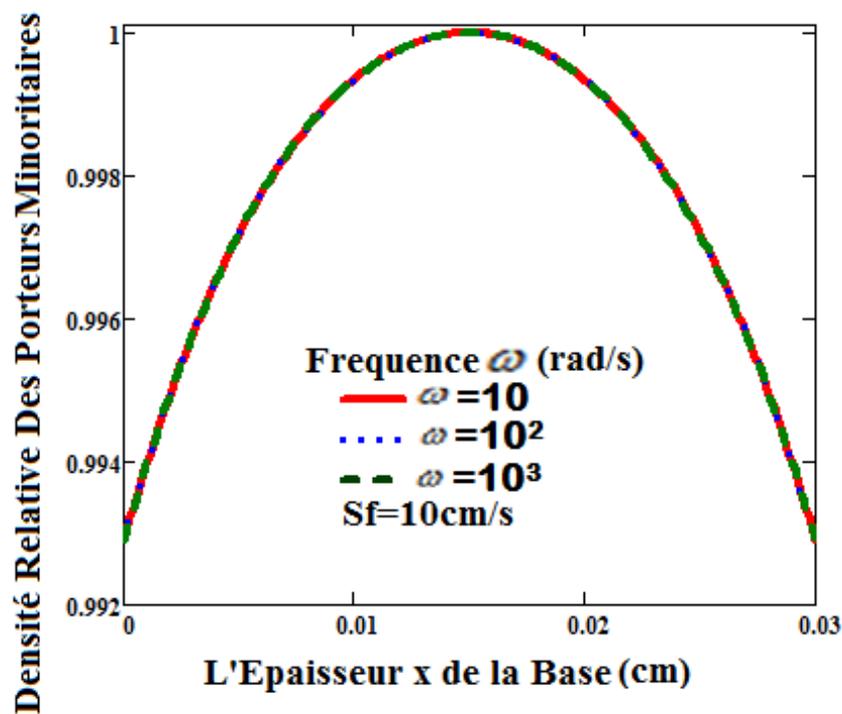


Figure II- 6 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base: $z=0.001$ cm, $kl=15$ cm⁻²/MeV, $\Phi_p=100$ MeV.

ETUDE THEORIQUE

A la figure II-6 (voisinage du circuit ouvert), on constate qu'aux deux jonctions ($x = 0$ et $x = H$), l'amplitude de la densité des porteurs de charge minoritaires est plus importante que lorsque nous sommes au voisinage du court-circuit. En effet pour ces faibles fréquences, nous remarquons un pic au milieu de la base. Ce pic est dû à une restriction de porteurs qui traverse la jonction.

II-3-4 Influence des grandes valeurs de la fréquence ω

Les figures II.7 et II.6 illustrent la variation de la densité relative des porteurs minoritaires en fonction l'épaisseur de la base pour des grandes valeurs de la fréquence ω en situation de court-circuit et de circuit ouvert.

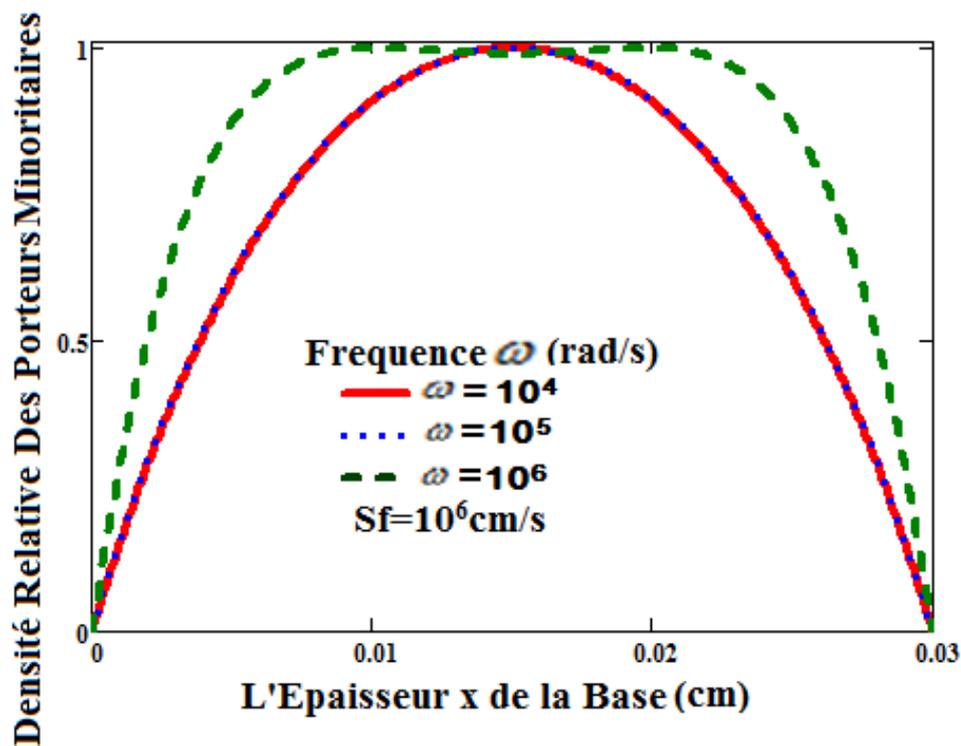


Figure II- 7 : Densité relatif des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différente valeur de la fréquence: $z=0.001 \text{ cm}$, $kl=15 \text{ cm}^2/\text{MeV}$, $\Phi_p=100 \text{ MeV}$.

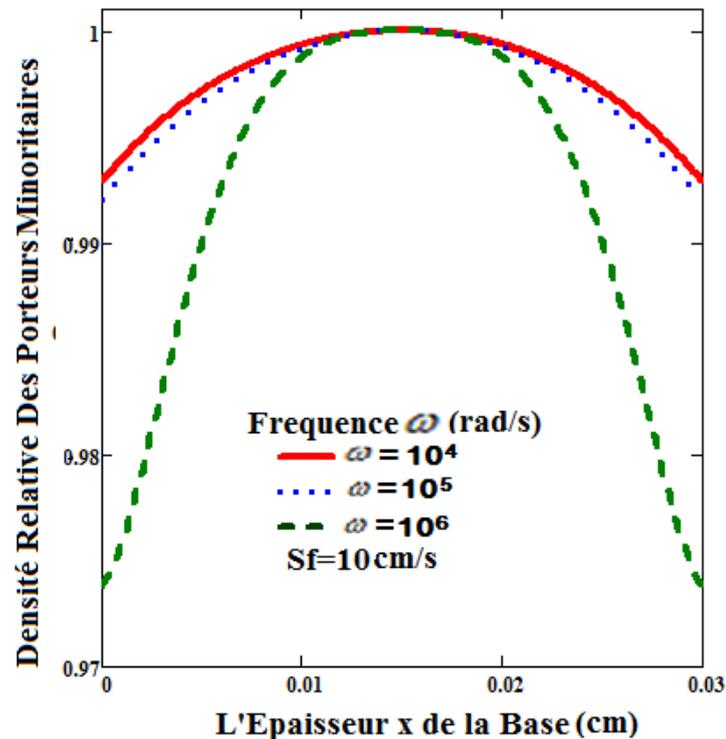


Figure II- 8 : Densité relative des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur de la base pour différente valeur de la fréquence: $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.

Nous notons que les deux graphiques reflètent les mêmes tendances de la densité de porteurs. La différence est remarquée dans le comportement de la densité quand il atteint son maximum.

En effet pour des grandes valeurs de la fréquence à $\omega=10^6\text{rad/s}$, nous notons la présence d'un palier traduisant ainsi la traversée des porteurs à la jonction et la maximum participe au photocourant.

Au milieu de la base ($x = x_0$), le gradient est nul. Ces porteurs sont bloqués à la jonction. Cependant lorsque la cellule solaire est en circuit ouvert à une fréquence de 10^5 rad/s , moins de porteurs minoritaires participent au photocourant. Contrairement au court-circuit où la majorité des porteurs participent au photocourant pour cette fréquence.

ETUDE THEORIQUE

II-3 ETUDE DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT DANS LA BASE DE LA PHOTOPILE EN SITUATION DE COURT CIRCUIT ET EN SITUATION DE CIRCUIT OUVERT.

II-3-1 EXPRESSION DE LA DENSITE DE PHOTOCOURANT

La densité de photocourant est rapportée à la surface de la cellule solaire. Elle résulte de la diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base à travers la jonction. Le photocourant est étudiée en faisant varier le niveau d'énergie d'irradiation Φ le coefficient de dommage Kl la fréquence ω et la profondeur z . L'expression de la densité du photo-courant est déterminée en utilisant la loi de FICK. Elle est donnée par la relation suivante :

$$J_{ph}(\omega, kl, \phi_p, z) = 2qD(\omega, kl, \phi_p) \left. \frac{\partial \delta(\omega, kl, \phi_p, z)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad \text{II-21}$$

II-3-2 Influence du coefficient de dommage

A la figure II.9, nous présentons la variation de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs du coefficient de dommage Kl .

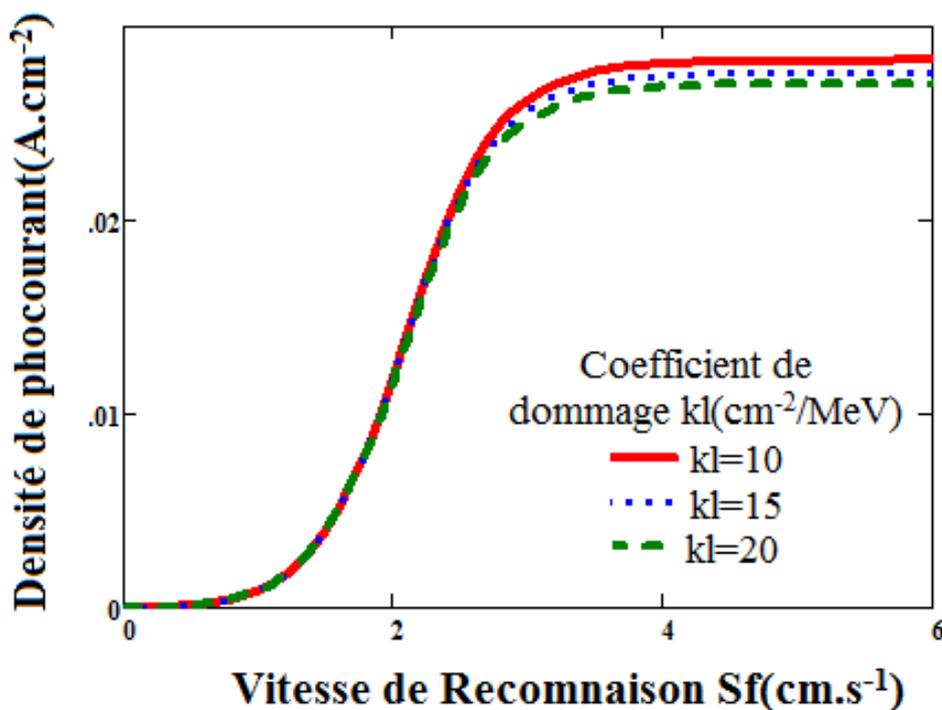


Figure II- 9 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de kl : $z=0.001\text{cm}$, $\omega=15\text{rad/s}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.

ETUDE THEORIQUE

La figure précédente montre que le module de la densité de photocourant croit en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. La courbe présente principalement trois paliers :

L'un aux faibles valeurs de S_f , le second à des valeurs intermédiaires de S_f et le dernier en de grandes valeurs de S_f .

- Pour de faibles valeurs de S_f ($S_f < 2.10^2 \text{ cm.s}^{-1}$), la densité de photocourant est quasi- nulle.

Les porteurs de charge minoritaires sont bloqués à la jonction car ils n'ont pas accès d'énergie pour traverser la jonction. La photopile fonctionne en situation de circuit-ouvert.

- Pour des vitesses de recombinaisons à la jonction $2.10^2 \text{ cm.s}^{-1} < S_f < 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, la densité de photocourant augmente avec la vitesse de recombinaison. Les porteurs de charge minoritaires acquièrent une certaine énergie pour traverser la jonction.

- Pour des valeurs de $S_f > 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, le module de la densité de photocourant est maximale et correspond au photocourant de court-circuit. Un grand nombre de porteurs de charge traverse les deux jonctions pour participer au phénomène du photocourant.

Nous constatons que Lorsqu'il y a augmentation du coefficient de dommage, le nombre d'interactions particules – matière augmente et la densité des porteurs est affectée.

II-3-3 Influence de l'énergie d'irradiation ϕ_p

Dans les figures II.10 et II.11, nous présentons la variation de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs de l'énergie d'irradiation.

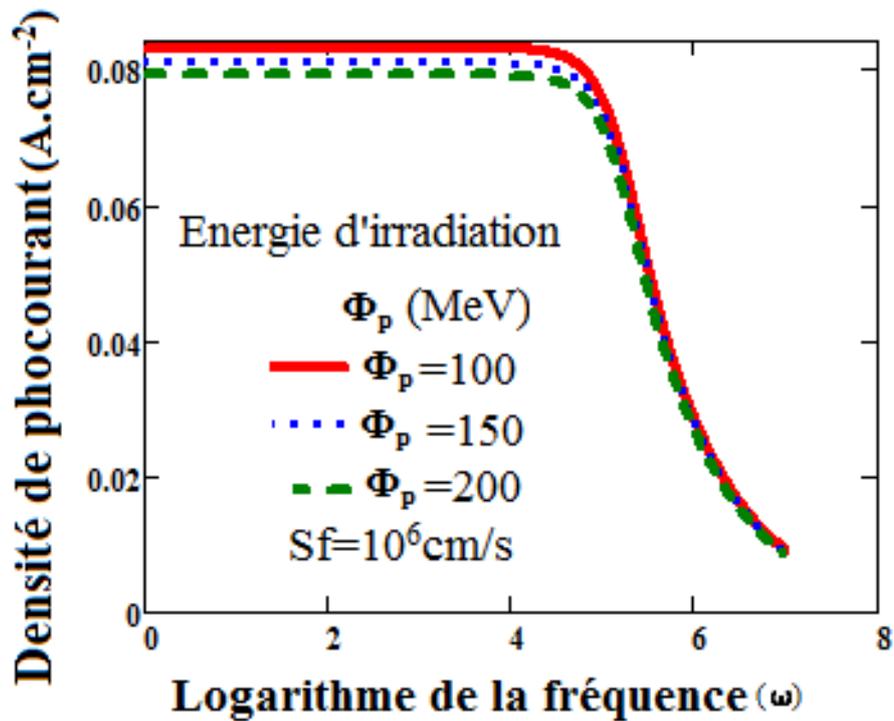


Figure II- 10 : Densité de photocourant en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p : $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.

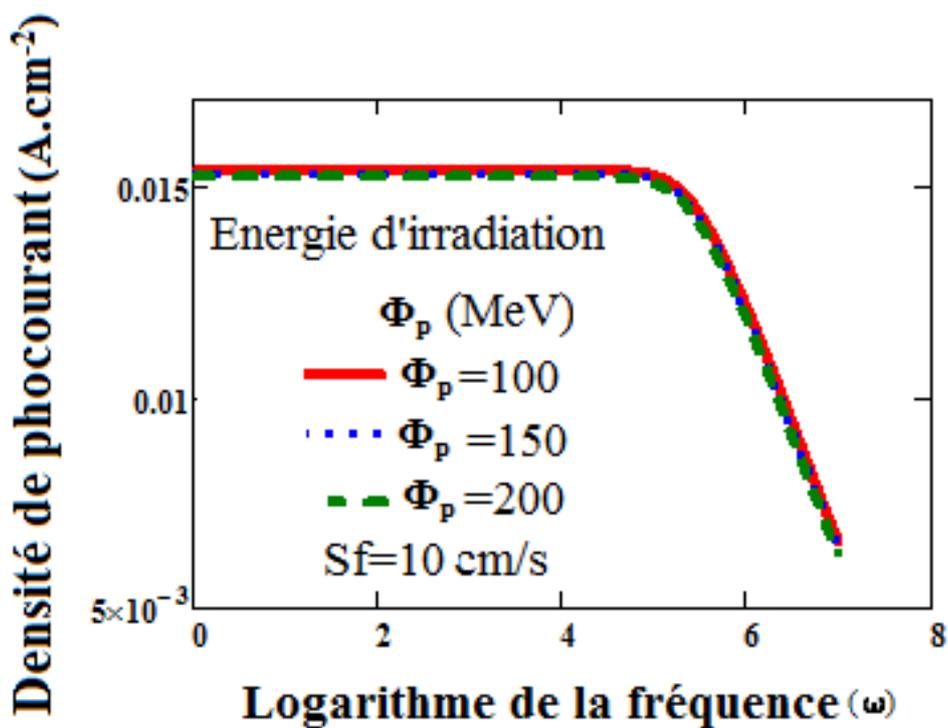


Figure II- 11 : Densité de photocourant en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p : $z=0.001\text{cm}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.

ETUDE THEORIQUE

Pour les fréquences inférieure à 10^4 rad/s la densité de photocourant est maximale et constante correspondants à un régime quasi statique. A partir de cette valeur nous notons une diminution du photocourant en fonction du logarithme décimale de la fréquence traduisant un régime variable .Cette variation est surtout marquée lorsque la photopile fonctionne au voisinage d'un circuit ouvert.

En effet, au voisinage d'un circuit ouvert, les porteurs sont accumulés à la jonction augmentant ainsi la probabilité d'interaction avec les particules irradiantes et donc les dégradations.

II-3-4 Influence de la fréquence ω

Dans les Figures II-12 et II-13, nous présentons la variation de photocourant en fonction de la profondeur pour différents valeurs de la fréquence ω .

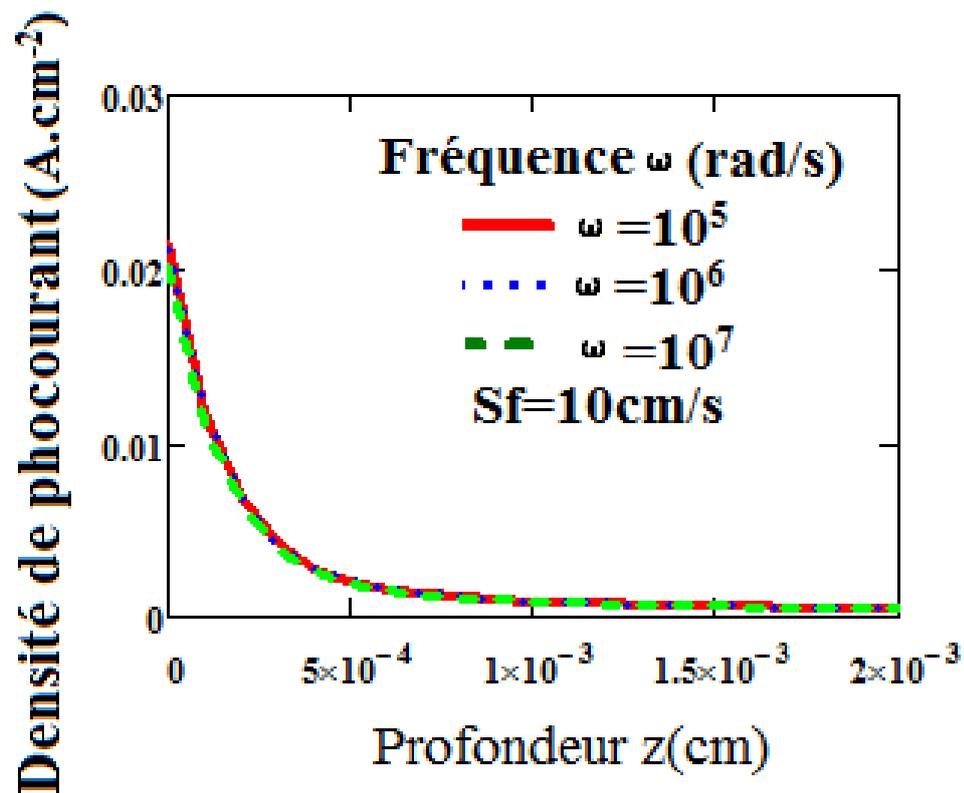


Figure II- 12 : Densité de photocourant en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de S_f : $z=0.001$ cm, $\Phi_p=100$ MeV, $kl=15$ cm⁻²/MeV

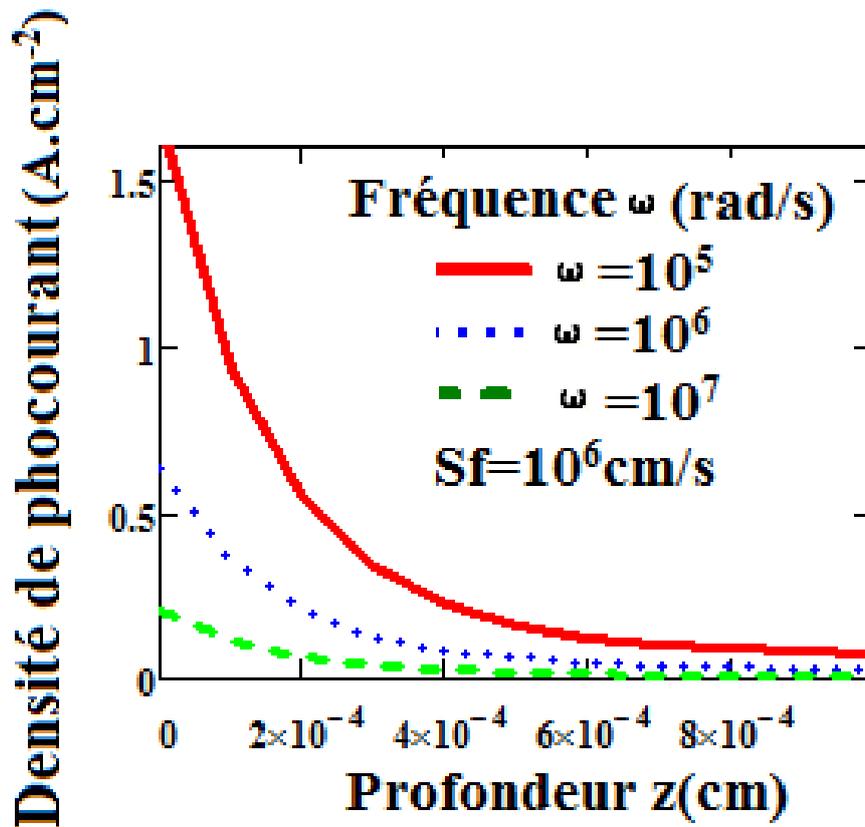


Figure II- 13 : Densité de photocourant en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de Sf : $z=0.001$ cm, $\Phi_p=100$ MeV, $kl=15$ cm²/MeV

L'augmentation de la fréquence diminue faiblement la densité de photocourant en profondeur. Nous remarquons une atténuation du courant de court-circuit jusqu'à une valeur minimale et quasi constante pour des grandes valeurs de la profondeur.

Nous observons également une diminution du photo-courant avec l'augmentation de la fréquence mais ce phénomène est plus visible pour les faibles profondeurs.

Cependant il existe un déphasage entre l'excitation optique et la réponse de la photopile dû à la relaxation des porteurs de charge minoritaires photogénérés dans la base.

II-3-5 Influence de la profondeur z

A la Figure II-14, nous présentons la variation de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs de la profondeur z.

ETUDE THEORIQUE

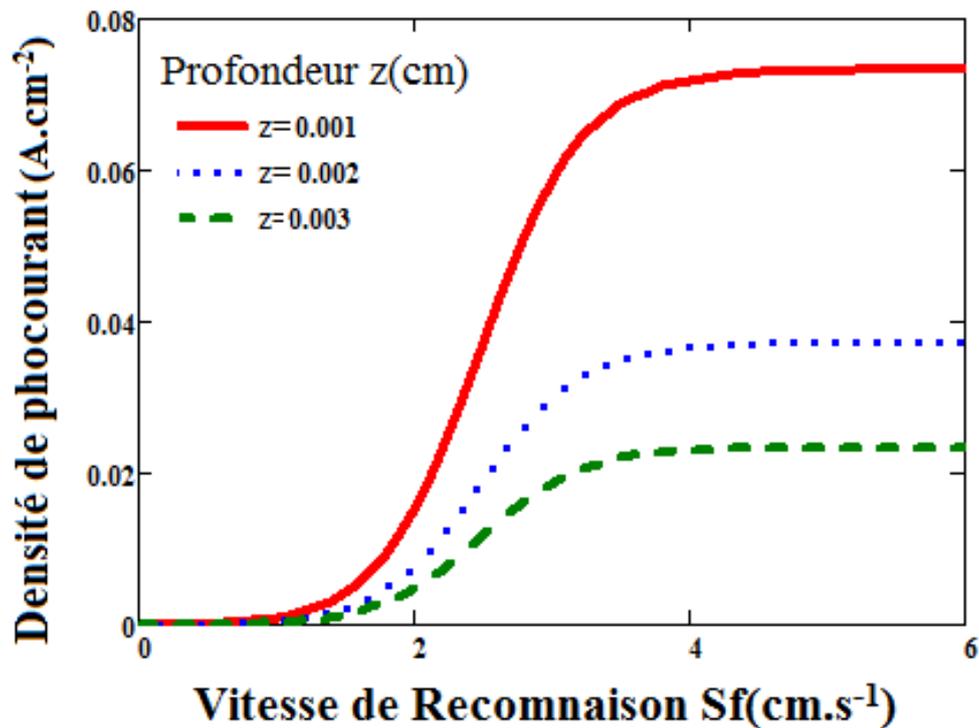


Figure II- 14 : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de z : $\Phi_p=100\text{MeV}$, $kl=15\text{cm}^2/\text{MeV}$.

La courbe ainsi considérée montre une existence de trois paliers comme obtenu précédemment à la figure II-9. Cependant, il est à noter que plus la profondeur est grande moins l'amplitude du module de la densité de photocourant est importante.

En effet, dans la base moins de porteurs sont photogénérés par conséquent, le flux de ces porteurs traverse les deux jonctions ($x = 0$ et $x = H$) participant ainsi au photocourant.

II-4 ETUDE DE LA PHOTOTENSION

II-4-1 EXPRESSION DE LA PHOTOTENSION

L'éclairement de la photopile au niveau de la jonction crée une différence de potentiel d'où l'apparition de la photo-tension cette dernière crée une accumulation des porteur minoritaire de charge à la jonction et est donné par la relation de BOLTSMANN :

$$V_{ph} = V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{N_b}{n_i} \cdot \delta(x)\right)_{x=0}$$

II-22

ETUDE THEORIQUE

$$V_T = \frac{K_b \cdot T}{q}$$

II-23

Où V_T est la tension thermique ; n_i la concentration intrinsèque des porteurs minoritaires ($1,5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$) ; K_b la constante de BOLTZMANN ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg} \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) et T la température absolue.

II-4-2 Influence de la profondeur z

A la Figure II-16, nous présentons la variation de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs de la profondeur z .

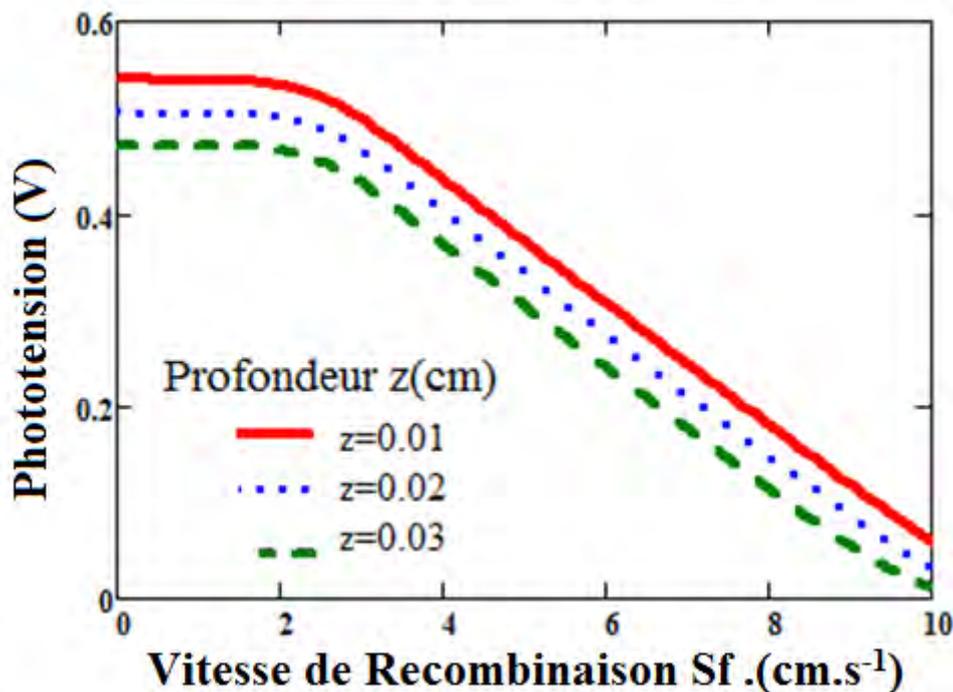


Figure II- 15 : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de z : $\omega=15\text{rad/s}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$, $kl=15\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$.

Nous remarquons que la courbe de phototension est maximale et constant pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, ceci correspond à la tension de circuit-ouvert où les porteurs sont bloqués à la jonction. Pour de grandes valeurs de Sf , la courbe de phototension diminue progressivement pour atteindre une valeur presque nulle. C'est le voisinage du court-circuit où presque la totalité des porteurs minoritaires traversent la

ETUDE THEORIQUE

jonction. Au voisinage du court-circuit, la photopile ne délivre pas de tension. Visiblement la phototension diminue en profondeur.

II-4-3 Influence de la fréquence ω .

A la Figure II-16, nous présentons la variation de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs de la fréquence ω .

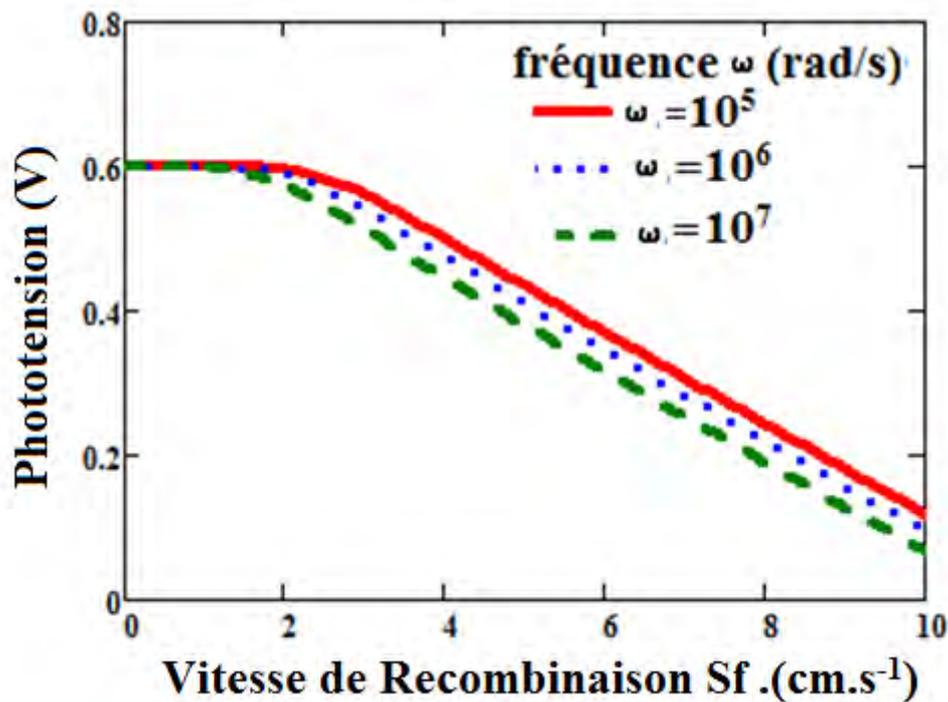


Figure II- 16 : Phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différente valeur de la fréquence: $z=0.001\text{cm}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$.

Pour des faibles valeurs de la vitesse de recombinaison on note que la phototension est maximale et constante. Les tensions obtenues pour ces vitesses de recombinaison sont associées au circuit ouvert. Il n'y pas de passage de charges à la jonction.

A partir de $Sf=2.10^2\text{cm/s}$, la phototension diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison. Alors que l'amplitude de la photo-tension diminue sous l'influence de la fréquence. Celle-ci met ainsi en exergue l'aptitude de la photopile à répondre aux sollicitations fréquents.

ETUDE THEORIQUE

II-4-3 Influence de l'énergie d'irradiation ϕ_p

Les Figures II-17 et II-18 présentent respectivement la variation de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison en court-circuit et en circuit ouvert pour différents valeurs de l'énergie d'irradiation.

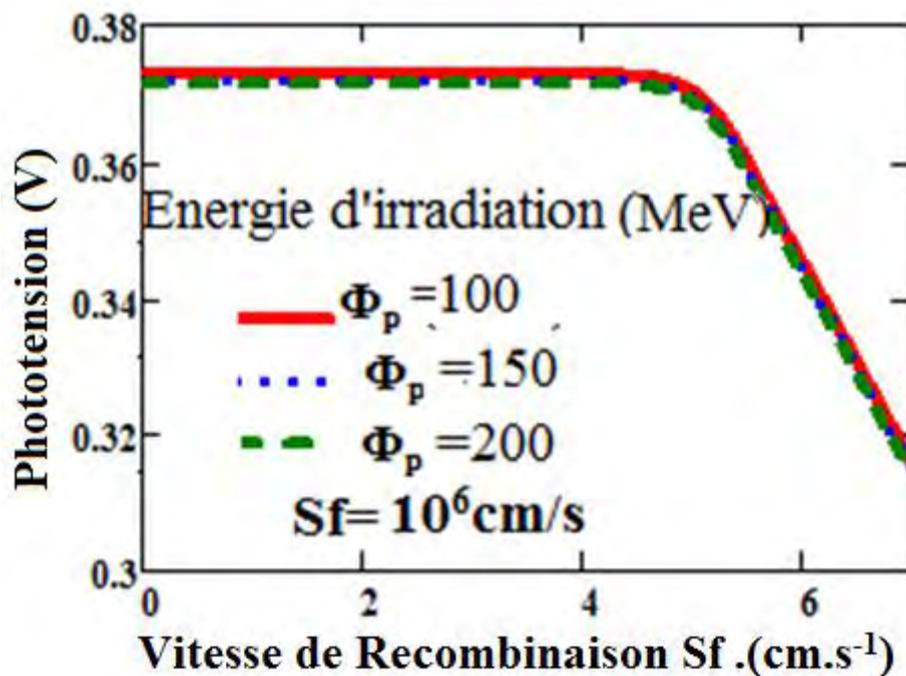


Figure II- 17 : Phototension en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p : $z=0.001$ cm, $kl=15$ cm²/MeV.

ETUDE THEORIQUE

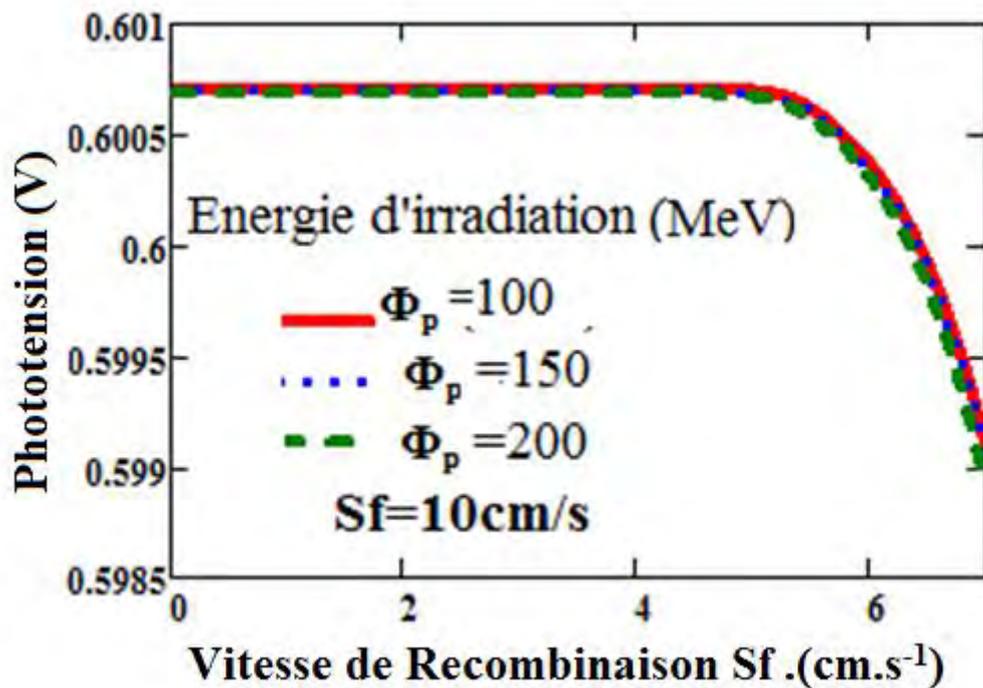


Figure II- 18 : Phototension en fonction du logarithme de la fréquence pour différente valeur de ϕ_p : $z=0.001$ cm, $kl=15$ cm²/MeV.

Pour les faibles valeurs de la fréquence, la phototension est pratiquement constante et maximale dans les deux situations traduisant un régime quasi statique.

Au-delà de ces valeurs la phototension décroît décrivant un régime variable. L'énergie d'irradiation n'a pratiquement pas d'effet sur la phototension pour ces valeurs de fréquences. Cependant, il faut noter qu'au voisinage du circuit ouvert, les porteurs sont accumulés à la jonction augmentant ainsi la possibilité d'interaction avec les particules irradiantes et donc les dégradations.

II-5 CARACTERISTIQUE I-V :

La caractéristique courant-tension est obtenue à partir de la représentation de la densité de photocourant en fonction de la photo-tension. Dans notre étude nous allons observer les influences de la fréquence et de l'énergie d'irradiation.

II-5-1 Influence de la fréquence ω sur de densité de photocourant en fonction de la phototension.

A la Figure II-19, nous présentons la variation de photocourant en fonction de la phototension pour différents valeurs de la fréquence.

ETUDE THEORIQUE

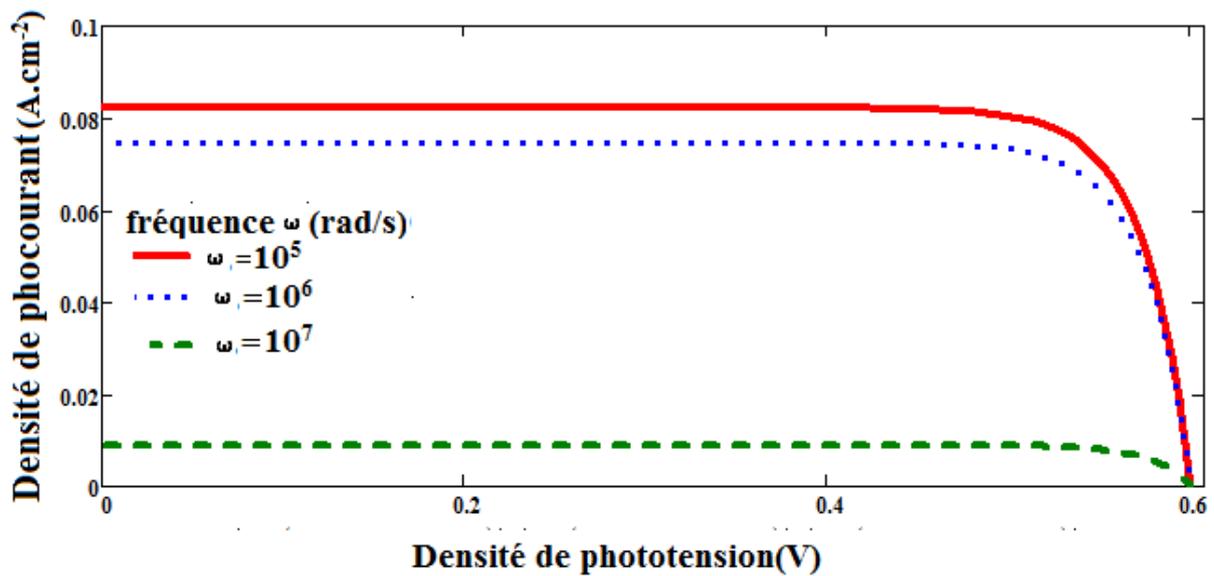


Figure II- 19 : Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différente valeur de la fréquence : $z=0.001\text{cm}$, $kl=10\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$, $\phi p=100\text{MeV}$

Sur cette figure, on remarque le fonctionnement de la photopile en court-circuit et en circuit ouvert. En situation de court-circuit, le photo-courant est maximal et correspond au courant de + En effet la photopile a assez de temps pour se relaxer et à réagir à une autre excitation optique.

II-5-2 Influence de l'énergie d'irradiation sur la densité de photocourant en fonction de la phototension.

A la Figure II-20, nous présentons la variation de la densité de photocourant en fonction de la phototension pour différents valeurs de l'énergie d'irradiation.

ETUDE THEORIQUE

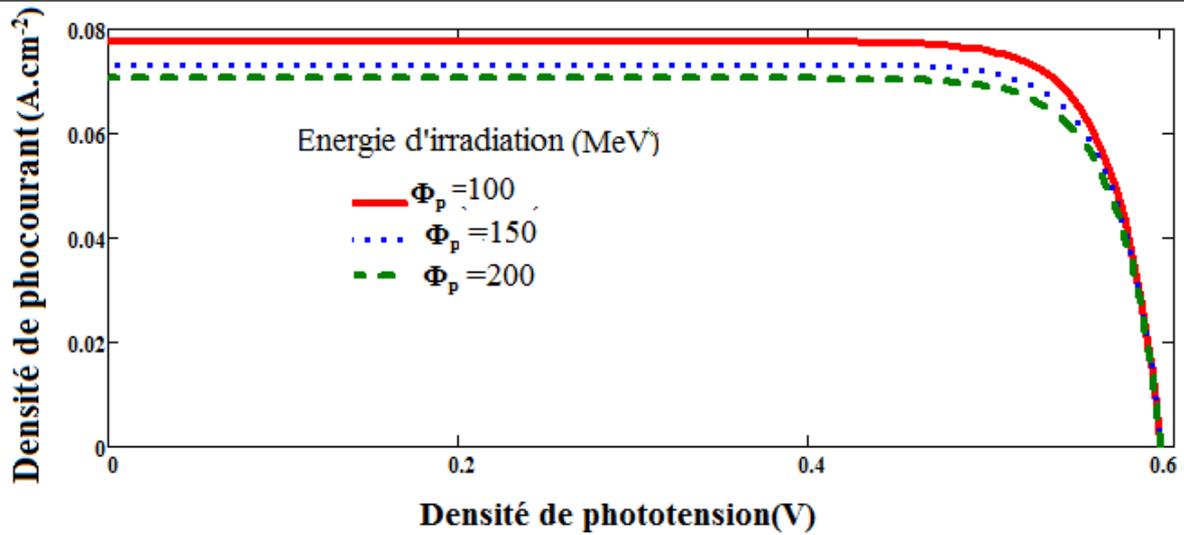


Figure II- 20 : Densité de photocourant en fonction de la phototension pour différente valeur de Φ_p : $z=0.001cm$, $kl=10cm^2/MeV$, $\omega=10^5rad/s$

Sur cette figure nous remarquons que la densité de photocourant est élevée et constante pour les petites valeurs de la phototension puis diminue jusqu'à une valeur de 0.6V. Les grandes valeurs de l'énergie d'irradiation favorisent la diminution du photocourant en fonction de la densité de phototension.

II-6 DETERMINATION DE LA RESISTANCE SERIE R_s

La résistance série est l'une des grandeurs électriques caractéristiques de la photopile. Elle est déterminée lorsque la photopile fonctionne en situation de circuit ouvert. A ce niveau la source de tension de circuit ouvert est en série avec la résistance série et la résistance de charge. Un circuit électrique équivalent illustrant ce dispositif, est donné à la figure II-21

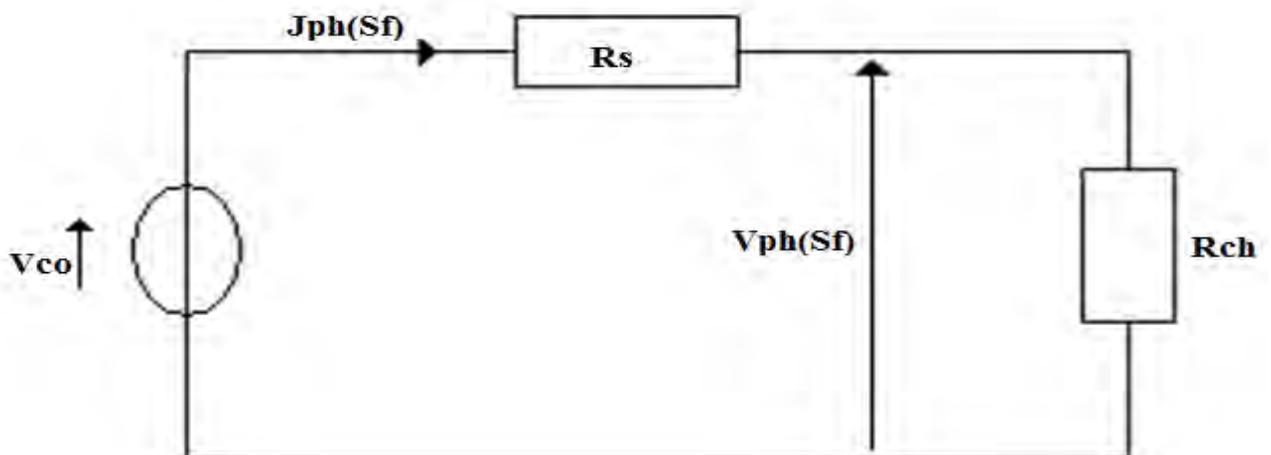


Figure II- 21 : Schéma de la photopile en fonctionnement de court-circuit.

ETUDE THEORIQUE

$$V_{ph(sf)} = V_{co} - R_s I_{ph(sf)} \quad \Rightarrow \quad R_s = \frac{V_{co} - V_{ph}}{J_{ph}}$$

II-6-1 Influence de l'énergie d'irradiation sur la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison.

A la Figure II-22, nous présentons la variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs de l'énergie d'irradiation.

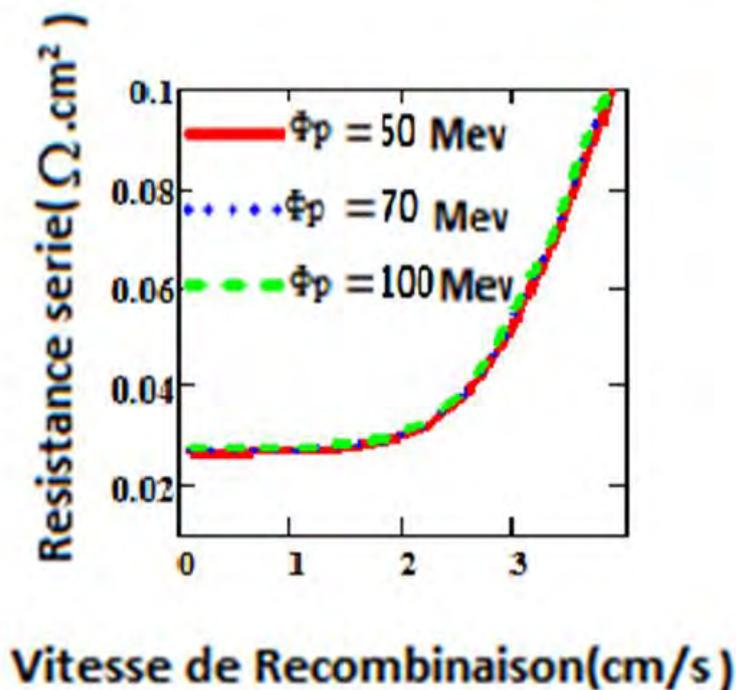


Figure II- 22 : Résistance Série en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de ϕ_p : $z=0.001\text{cm}$, $kl=10\text{cm}^{-2}/\text{MeV}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$

On note une augmentation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Quel que soit la valeur de l'énergie d'irradiation, nous observons les mêmes variations de la résistance série. L'effet de l'irradiation influe peu sur la résistance série.

II-6-2 Influence du coefficient de dommage sur la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison.

A la Figure II-23, nous présentons la variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs du coefficient de dommage.

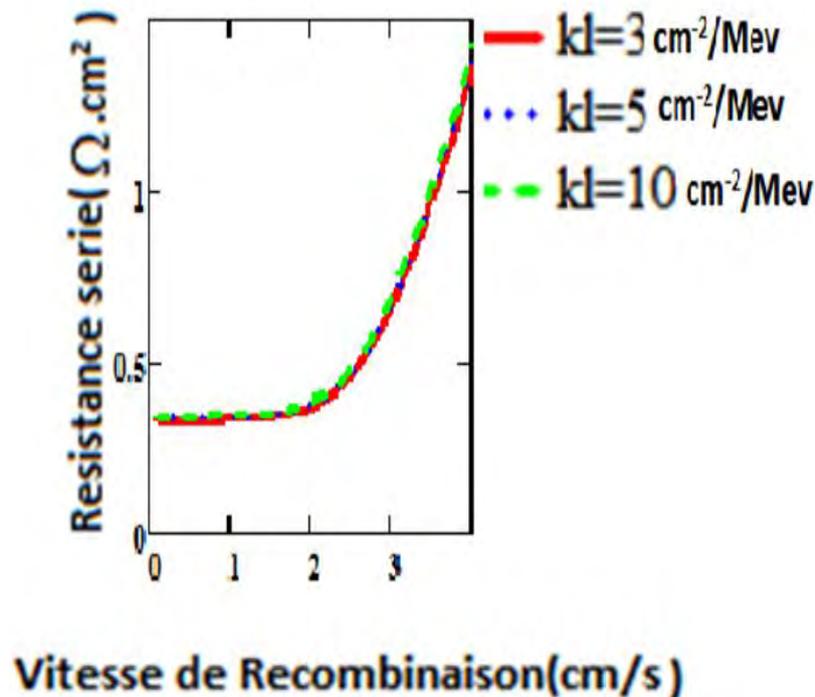


Figure II- 23 : Résistance Série en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différente valeur de $kl:z=0.001\text{cm}$, $\phi p=100\text{MeV}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$.

Nous remarquons une augmentation de la résistance série avec la vitesse de recombinaison à la jonction traduisant ainsi le passage des porteurs à la jonction. Le coefficient de dommage n'a pratiquement pas d'effet sur la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison.

Dans le paragraphe suivant nous proposons l'étude de la résistance shunt.

II-7 DETERMINATION DE LA RESISTANCE SHUNT R_{sh}

La résistance shunt est déterminée en considérant que la photopile fonctionne en situation de court-circuit où le photocourant est égal au courant de court-circuit. Ici la photopile se

Comporte comme un générateur de courant en parallèle avec la résistance shunt et le tout en série avec la résistance de charge.

ETUDE THEORIQUE

La figure II-24 illustre le circuit électrique équivalent de ce dispositif cité ci-dessus.

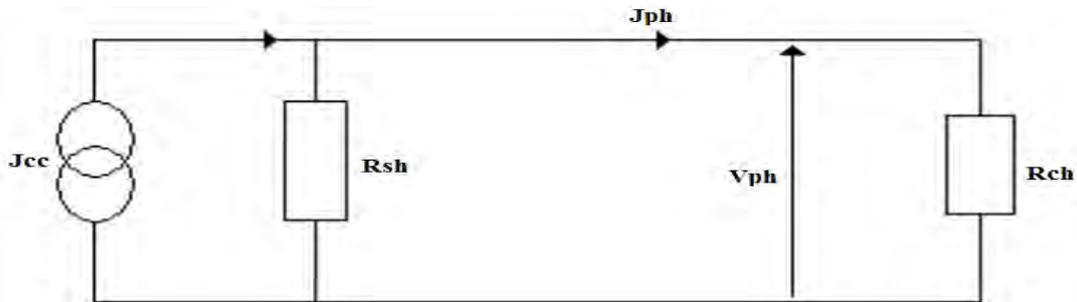


Figure II- 24 : Schéma de la photopile en fonctionnement de court-circuit

$$V_{(sf)} = R_{sh} \left(I_{cc} - I_{ph(sf)} \right) \implies R_{sh} = \frac{V_{(sf)}}{I_{cc} - I_{ph(sf)}} \quad \text{II-24}$$

II-7-1 Influence de l'énergie d'irradiation sur la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison.

La Figure II-25 représente la variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs de l'énergie de l'énergie d'irradiation.

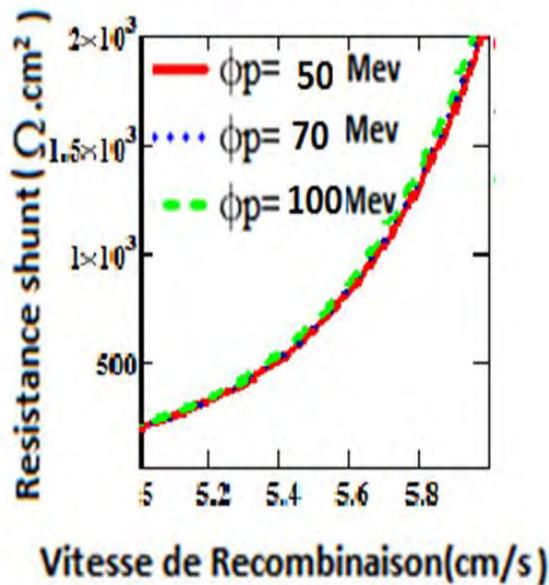


Figure II- 25 : Résistance Shunt en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différente valeur de $\phi_p z=0.001cm, kl=10cm^{-2}/MeV, \omega=10^5 rad/s$

ETUDE THEORIQUE

II-7-2 Influence du coefficient de dommage sur la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison.

A la Figure II-26, nous présentons la variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs du coefficient de dommage.

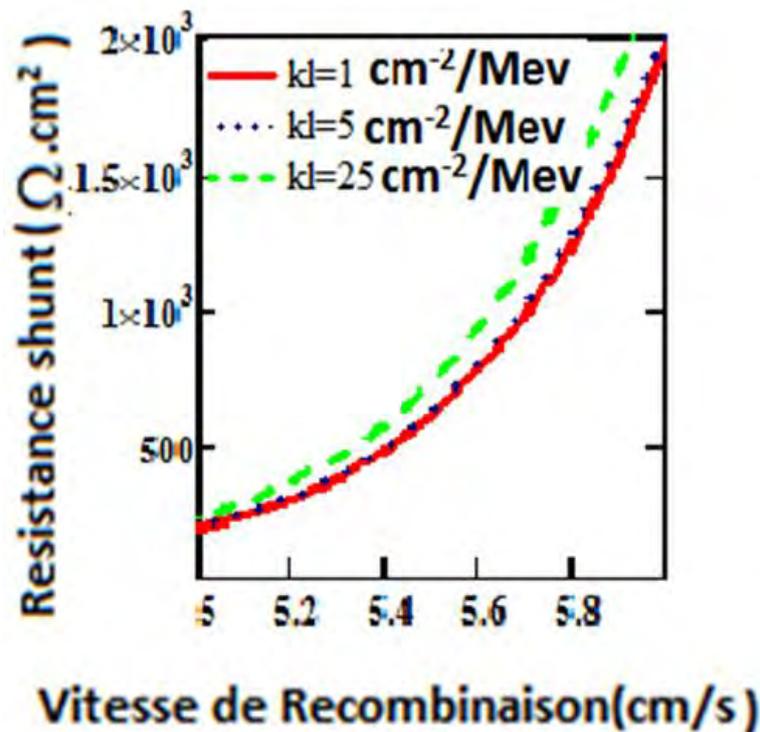


Figure II- 26 : Résistance Shunt en fonction de la Vitesse de recombinaison pour différente valeur de kl : $z=0.001cm$, $kl=10cm^{-2}/Mev$, $\omega=10^5rad/s$

On remarque sur ces deux figures une augmentation considérable de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi nous constatons aussi une diminution des courants de fuites donc une augmentation de la résistance shunt. L'effet de l'irradiation favorise l'augmentation de la résistance shunt.

CONCLUSION

Dans cette partie, nous avons fait la présentation de la photopile à jonction verticale parallèle. Partant de l'équation de continuité, nous avons déterminé la densité relative des porteurs minoritaires dans la base. L'obtention de cette densité a conduit aux expressions du photocourant et de la phototension. Puis la caractéristique courant-tension est proposée.

ETUDE THEORIQUE

Partant de cette caractéristique I-V, la résistance série et la résistance shunt a été présentée, pour différentes valeurs de la fréquence, de la profondeur, du coefficient dommage, de l'énergie d'irradiation. De cette étude, nous avons montré que ces grandeurs électriques dépendent de manière significative de ces paramètres. Parmi les caractéristiques la capacité est étudiée au dernier chapitre.

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons étudier la capacité de la photopile à jonction vertical parallèle sous éclairage polychromatique, en modulation de fréquence. Cette étude permettra après l'obtention de l'expression de la capacité, de représenter son diagramme de Bode et sa représentation de Nyquist sous l'influence de l'énergie d'irradiation, du coefficient de dommage et de la fréquence et en fin le circuit équivalent est déterminé.

III-1 ETUDE DE LA CAPACITE DE LA ZONE DE CHARGE D'ESPACE

III.1-1 EXPRESSION DE LA CAPACITE

La capacité d'une cellule solaire [41-43] est due à la diffusion des porteurs de charge minoritaires à travers la jonction. Son expression est donnée par le rapport de la dérivée de la charge totale ayant traversée la jonction et de la phototension aux bornes de la photopile :

$$C = q \cdot \left. \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial V_{ph}} \right|_{x=0} \quad (\text{III-1})$$

$$C = \frac{q \cdot n_o}{V_T} + q \cdot \frac{\delta(0, z)}{V_T} \quad (\text{II-2})$$

$$n_o = \frac{n_i^2}{N_B}$$

III-1-2 Influence du coefficient de dommage sur la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison.

A la Figure III-1, nous présentons la variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs du coefficient de dommage.

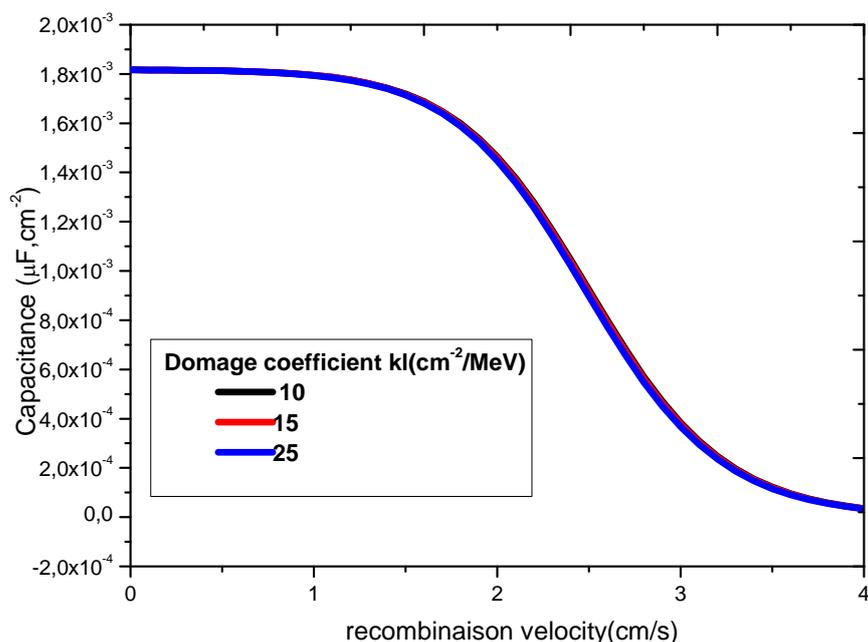


Figure III- 1 : Capacité en Fonction de la Vitesse de Recombinaison à la Jonction pour différente valeur du coefficient de dommage : ($z=0.001\text{cm}$, $\Phi_p=100\text{MeV}$)

Au voisinage d'un circuit ouvert la capacité est maximum en fonction de la vitesse de recombinaison. En effet, cette situation de fonctionnement de la photopile montre que les porteurs de charge minoritaires sont peu mobiles d'où leur important stockage dans la base.

Par contre cette capacité diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur pratiquement nulle quand la vitesse de recombinaison augmente. Cependant, pour le fonctionnement de la photopile en position de court-circuit les porteurs minoritaire photogénéré dans la base diminue, il y'a une importante recombinaison des porteurs. Ceci conduit à une diminution de la capacité. L'effet du coefficient de dommage n'est pas très remarquable dans cette figure.

III-1-2 Influence de la fréquence sur la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison.

A la Figure III-2, nous présentons la variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison pour différents valeurs de la fréquence.

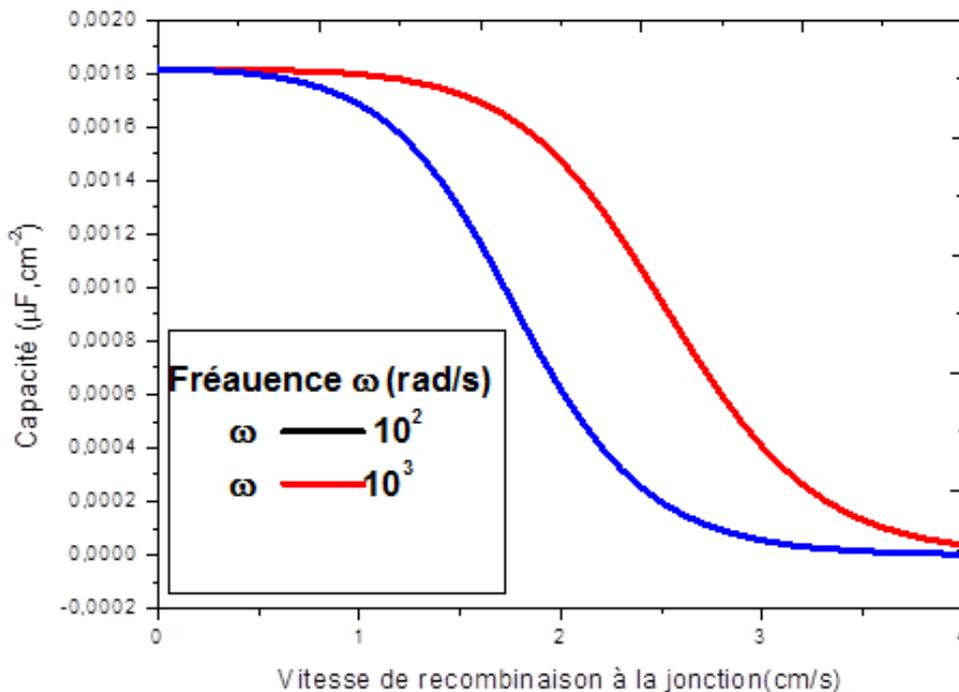


Figure III- 2 : Capacité en Fonction de la Vitesse de Recombinaison à la Jonction pour différente valeur de la fréquence ($\Phi_p=100\text{MeV}$, $z=0.001\text{cm}$).

La capacité de la cellule solaire est très importante et constante pour des vitesses de recombinaison inférieure à 10cm/s et pour une vitesse de recombinaison de $3 \cdot 10^3\text{rad/s}$ la capacité devient très faible. Ses deux zones sont respectivement la situation du circuit ouvert et du court-circuit. Entre ces zones, la capacité diminue plus rapidement et atteint la situation de court-circuit pour $\omega=10^7\text{rad/s}$. La capacité de circuit ouvert est supérieure à la capacité de court-circuit.

III-2 DIAGRAMME DE NYQUIST DE LA CAPACITE

III-2-1 Influence de l'énergie d'irradiation sur la capacité de la photopile en position de cour circuit et de circuit ouvert.

Les Figures III-3 et III-4 présentent la variation de la partie imaginaire de la capacité en fonction de sa partie réelle pour différentes valeurs de l'énergie d'irradiation [44].

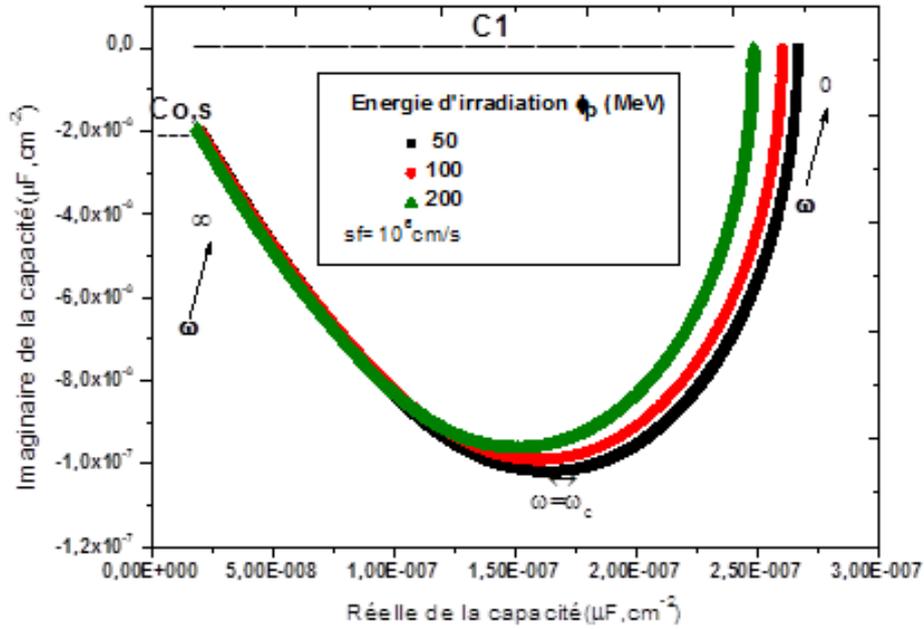


Figure III- 3 : Partie imaginaire de la Capacité en Fonction de sa réelle pour différentes valeurs de ϕ_p : ($z=0.001cm$, $kl=15cm^{-2} /MeV$)

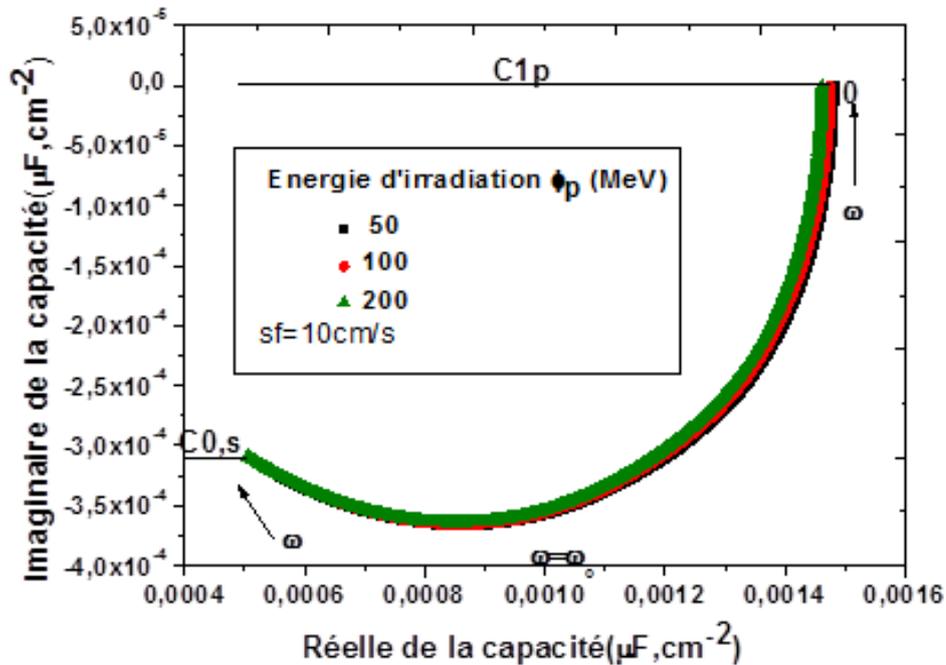


Figure III-4 : Partie imaginaire de la Capacité en Fonction de sa réelle pour différentes valeurs de ϕ_p : ($z=0.001cm$, $kl=15cm^{-2} /MeV$)

Le spectre de la capacité est un demi-cercle, avec un rayon égal à $(R / 2)$. Le demi-cercle est dans le quatrième quadrant, l'axe réel et ne touche pas l'origine à la proximité du court-circuit. La capacité de circuit ouvert est supérieure à la capacité de court-circuit. Cela confirme que le rayon près d'un circuit ouvert est supérieur au rayon de court-circuit.

III-3 DIAGRAMME DE BODE DE LA CAPACITE

A la Figure III-5, nous présentons la variation de la capacité en fonction du logarithme décimal de la fréquence.

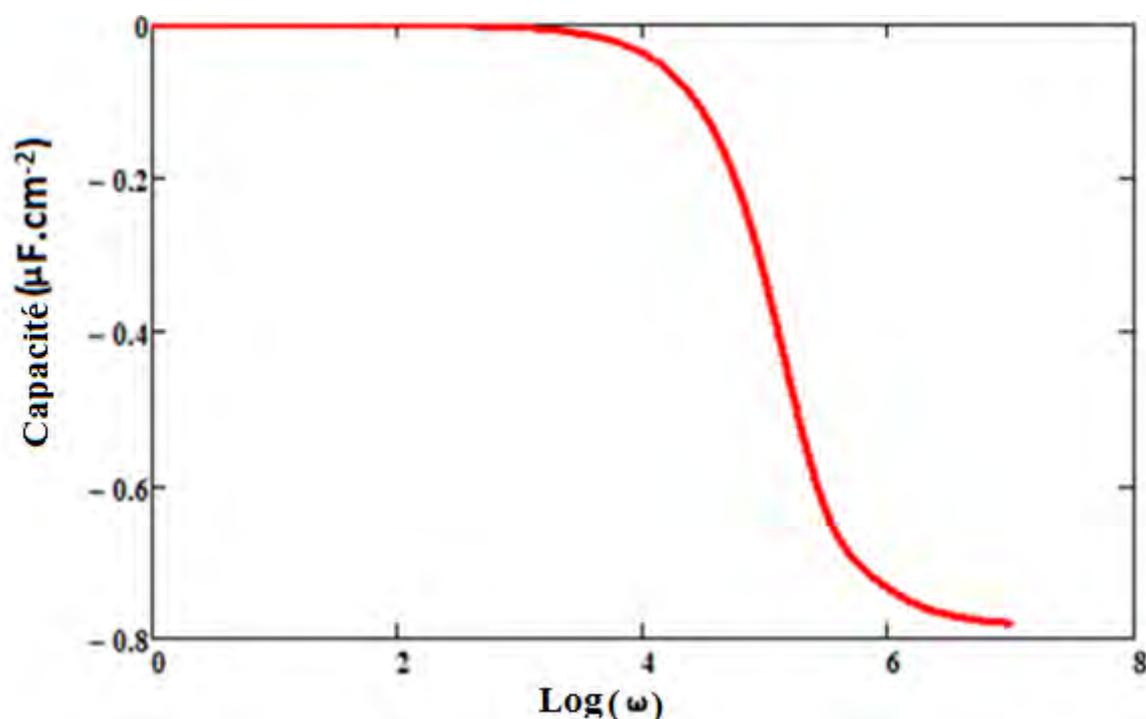


Figure III- 5 : diagramme de Bode de la capacité

Nous parcourons maintenant dans la Fig. III-5 la capacité de la cellule par rapport à la fréquence de modulation en échelle semi-logarithmique (Bode diagramme). Nous notons qu'en régime statique (ω inférieure à 10^4 rad/s) la capacité est maximale et constante. Ensuite la capacité diminue avec l'augmentation de la fréquence de modulation à partir de 10^4 rad/s. Cette phase correspond à un régime variable.

III-4 Méthode de détermination du modèle électrique équivalent C0 [45]:

$$z = \frac{R_p + jX_p}{R_p + jX_p} \quad \text{III-3}$$

$$Z = \frac{jR_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} + \frac{jR_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad \text{III-4}$$

$$Z = R + jX \quad \text{III-5}$$

$$(X - a)^2 + (Y - b)^2 = r^2 \quad \text{III-6}$$

$$Z = R_s + \frac{Rsh}{1 + (\omega RshC)^2} - \frac{i(\omega R^2 shC)}{1 + (\omega RshC)^2} = Z_c + Z_R \quad \text{III-7}$$

$$Z_c = R_s + Z_R + \frac{Rsh}{1 + (\omega RshC)^2} - \frac{i(\omega R^2 shC)}{1 + (\omega RshC)} \quad \text{III-8}$$

$$Z_c = C_{0,s} + Z_R + \frac{C_{0,p}}{1 + (\omega \times C_{0,p} \times C)} - \frac{i(\omega \times C^2_{0,p} \times C)}{1 + (\omega \times C_{0,p} \times C)} \quad \text{III-9}$$

For this, we consider the center of a semicircle $\Delta((C_{0,s} + C_{0,p}/2); 0)$ and radius $R(C_{0,p}/2)$.

Z_c can be rewritten as the two components (real and imaginary part)

$$Z_c = \text{Re}(Z_c) + j \text{Im}(Z_c) \quad \text{III-10}$$

$$Z_c = X + jY$$

With $X = \text{Re}(Z_c)$; $Y = \text{Im}(Z_c)$ and j the complex variable ($j = \sqrt{-1}$)

To simplify notations, we define the variables a and b ; with $a = C_{0,s}$ and $b = C_{0,p}$

Terms of the Z_c are connected by the equation:

$$\left[X - \left(a + \frac{b}{2} \right) \right]^2 + Y^2 = \left(\frac{b}{2} \right)^2 \quad \text{III-11}$$

The resolution of the equation leads to the determination of X and Y :

$$\begin{cases} X = \text{Re}(Z_c) = C_{0,s} + Z_R + \frac{\omega \cdot C \cdot (C_{0,p})^2}{1 + (\omega \cdot C \cdot C_{0,p})^2} & \text{III-12} \\ Y = \text{Im}(Z_c) = \frac{\omega \cdot C \cdot (C_{0,p})^2}{1 + (\omega \cdot C \cdot C_{0,p})^2} & \text{III-13} \end{cases} \quad \text{III-14}$$

The characteristics of particular points are summarized by the following equations:

CHAPITRES III : ETUDES DE LA CAPACITE

- $\omega \rightarrow 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \text{Re}(Zc) = C0,s + C0,p \\ Y = \text{Im}(Zc) = C0,p \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{III-15} \\ \text{III-16} \end{array}$$

- $\omega = \omega_c$

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \text{Re}(Zc) = C0,s + \frac{C0,p}{2} \\ Y = \text{Im}(Zc) = \frac{C0,p}{2} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{III-17} \\ \text{III-18} \end{array}$$

- $\omega \rightarrow \infty$

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \text{Re}(Zc) = C0,s \\ Y = \text{Im}(Zc) = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{III-20} \\ \text{III-19} \end{array}$$

Tableau 2 : Valeurs de résistance parallèle et de la résistance Série en situation de court-circuit de la capacité.

Sf=10 ⁶ cm/s Short circuit			
ϕ_p (MeV)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C (F)
200	3.35×10^4	2.9	2.46×10^{-7}
100	3.95×10^4	3.2	2.19×10^{-7}
50	4.08×10^4	3.38	2.07×10^{-7}

Tableau 3 : Valeurs de résistance parallèle et de la résistance Série en situation de circuit ouvert de la capacité.

Sf=10 ² cm/s Open circuit			
ϕ_p (MeV)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C (F)
200	47.015	1.54	9.8×10^{-4}
100	52.282	1.69	9.4×10^{-4}
50	55.87	1.89	9.2×10^{-4}

CHAPITRES III : ETUDES DE LA CAPACITE

Connaissant la valeur de la résistance parallèle R_p et de la fréquence de coupure [46] on peut

déduire la capacité par la relation:[47] $R_p C = \frac{2\pi}{\omega_c}$

La figure III-6 représente le circuit électrique équivalent de la capacité de la photopile près d'un court-circuit

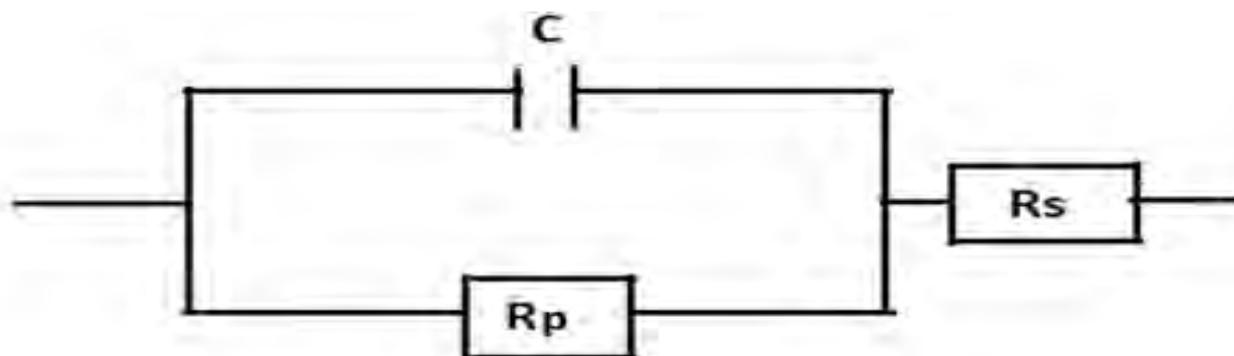


Figure III- 4 : Circuit électrique équivalent de la capacité de la photopile près d'un court-circuit

Nous remarquons que sur ces tableaux quand la valeur de l'énergie d'irradiation augmente, la valeur de R_p diminue qui est due à la diminution de la densité de porteurs minoritaire causé par l'irradiation. Les paramètres intrinsèques de la cellule solaire sont endommagés ; ce qui baisse la qualité de la cellule [48,49].

CONCLUSION

La détermination des paramètres électriques tels que la capacité (C), les résistances parallèle, et série par l'intermédiaire des diagrammes de Nyquist et de Bode, nous a permis de proposer deux modèles électriques équivalents de la photopile. Cette étude théorique a mis en évidence l'effet de l'irradiation sur la capacité d'une cellule solaire au silicium à jonction verticale parallèle.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons présenté une étude en régime dynamique fréquentiel sous éclairage polychromatique d'une photopile à jonction verticale parallèle sous l'effet de l'irradiation.

Dans l'étude bibliographique nous avons présenté des articles parlant de l'irradiation et qui se rapporte aux méthodes de détermination des paramètres intrinsèques des porteurs minoritaires de charge dans la base des photopiles au silicium polycristallin en régime dynamique fréquentiel. Dans cette partie, nous avons déterminé aussi les paramètres suivantes n , R_S , R_P , I_0 , I_L . Ces dernières exploitent les données expérimentales telles que I_{CC} , I_{C0} , P_M .

Dans le deuxième chapitre, partant de l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile en régime dynamique fréquentiel, les expressions du photocourant, de la phototension, de la caractéristique I-V, de la résistance série et de la résistance shunt ont été obtenues. Leurs études ont été proposées en modulation de fréquence, pour des profondeurs dans la base, pour différents valeurs de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage sous éclairage polychromatique.

Enfin dans le chapitre trois l'obtention de certains paramètres électriques de la photopile comme la capacité (C) a permis d'obtenir le diagramme de Nyquist et de Bode partant de ces deux diagramme nous avons obtenu le modèle électrique équivalents de la photopile.

L'apport que nous avons fait dans les méthodes de détermination des paramètres électriques d'une photopile à jonction verticale parallèle en régime dynamique fréquentiel sous irradiation ouvre de nouvelles perspectives de recherche dans le domaine des semiconducteurs. En effet à l'avenir on peut envisager pour compléter notre travail en considérant:

Le comportement de la photopile en régime transitoire pour un éclairage monochromatique.

L'étude à deux et trois dimensions pour déterminer ses paramètres électrique

L'étude de la photopile en régime quasi statique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. L. Samb, M. Zoungrana, F. Toure, M. T. D. Diop, G. Sissoko.
"Study in 3D modeling of a solar cell silicon static regime placed in a magnetic field and under constant multispectral illumination: Determination of electrical parameters" *Journal des sciences Vol 10, N°4, 2010, pp. 23-38. www.cadjds.org*
- [2] O. Sow, I. Zerbo, S. Mbodji, M.I. Ngom, M.S. Diouf and G. Sissoko,
"Silicon solar cell under electromagnetic waves in steady state: electrical parameters determination using the i-v and p-v characteristics." *International Journal of Science, Environment and Technology, 1(4), (2012). pp. 230 – 246.*
- [3] Dieng, M.L. Sow, S. Mbodji, M.L. Samb, M. Ndiaye, M. Thiame, F.I. Barro and G. Sissoko, "3D study of polycrystalline silicon solar cell: influence of applied magnetic field on the electrical parameters." *Semiconductor Science and technology, 26(9), (2011). pp. 473-476.*
- [4] W.C. benmoussa, s. amara et a. zerga optimisation du rendement d'une photopile *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306*
- [5] Lechat isabelle rapport de stage : étude expérimentale et développement d'un prototype de caractérisation de cellule solaire à colorant ; *Master Physique et Ingénierie. Université de la Réunion ; Spécialité : Conversion des Energie ; Année 2006-2007.*
- [6] Mazhari and H.Morkoç, "Theoretical study of a parallel vertical multi-junction silicon", *J. App. Phys. 73(11), (1993), pp. 7509-7514*
- [7] H. EL .Ghitani and S. Martinuzzi, "Determination Electric parameters of a solar cell silicon" *J. App. Phys. 66(4), (1989), pp. 1717-172.*
- [8] *Revu des énergies Renouvelable Vol 12 N° 4 (2009) 563-574*
- [9] Wafaa ABD EL-BASIT, Ashraf Mosleh ABD El-MAKSOOD² and FouadAbd El-MoniemSaad SOLIMANElectronics Research Laboratory, Physics Department, Faculty of Women for Arts, Science and Education, Ain-Shams University, Heliopolis, Cairo, Egypt. Nuclear Materials Authority, P. O. Box 530, Maadi-11728, Cairo, Egypt.E-mail:wafaazekri@gmail.com
ashraf.mosleh@yahoo.com
fouad.saad.soliman@gmail.com

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [10] Diao, « *Etude En Regime Dynamique Frequentiel D'une Photopile Bifaciale Sous Eclairage Polychromatique Et Sous L'effet D'un Champ Magnetique Constant : Détermination Des Paramètres De Recombinaisons Et Electriques* », *Grade De Docteur D'état En Physique, FSTUCAD, 2010*
- [11] R. Anil Kumar, M. S. Suresh and J. Nagaraju *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 48, No.9 septembre 2001 pp 2177-2179
- [12] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 80(2003) pp 459-464
- [13] Idrissa Gaye, *Impact de l'irradiation par des particules 'énergétiques sur une photopilebifaciale au silicium en régime dynamique transitoire*, *Thèse de doctorat unique, FSTUCAD, 2012*
- [14] C. VIAL. *Evaluation de la probabilité des aléas logiques induits par les neutrons atmosphériques dans le silicium des SRAM. Thèse, Université Montpellier II, Octobre 1998.*
- [15] E. Normand. *Single eventupsetsatgroundlevel. IEEE transactions on nuclear science*, vol. ns-43, n°6, décembre 1996.
- [16] A. Taber, E. Normand. *Single event upset in avionics. Nucl.Sci.*, vol NS-40, no. 2, pp.120-126, 1993. *IEEE Trans.*
- [17] J. BOCH, F. SAIGNE, R. D. SCHRIMPF, J. R. VAILLE, L. DUSSEAU, E. LORFEVRE. *Physical Model for Low Dose Rate effect in bipolar devices.IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, pp. 3655-3660, 2006.
- [18] J. BOCH, F. SAIGNE, R. D. SCHRIMPF, J. R. VAILLE, L. DUSSEAU, E. LORFEVRE, C. CHATRY. *Estimation of low dose rate degradation on bipolar linear integrated circuits using switching experiments. IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, pp.2616-2621, 2005.
- [19] G.M.GRIGORIEVA, M.B.KAGAN, V.A.LETIN, V.P.NADOROV.*Effects from large solar proton events on performance of space solar arrays in geostationary orbit environment.17th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2001)*, pp. 1043-1046.
- [20] Kraner, H. W.,1983. *Radiation damage in silicon detectors,2nd Pisa Meeting on Advanced Detectors, Grosetto, Italy, June 3-7.*
- [21] G-H. Shin et al,*Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells* G-H. Shin et al, 2008

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [22] R.J. WALTERS, S.R. MESSENGER, G.P. SUMMERS, A.W. BETT, F. DIMROTH, C. BAUR, M. MEUSEL, T. TAKAMOTO, T. AGUI, M. IMAIZUMI, S. MATSUDA. *Radiation response analysis of triple junction InGaP/InGaAs/Ge solar cells. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 2251-2254, 2001
- [23] K. WEINERT, U. RAU, A. JASENEK, H. W. SCHOCK, AND J. H. WERNER. *Analysis and modeling of electron and proton irradiation effects in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2001)*, pp. 2167-2170
- [24] R. J. WALTERS, S.R. MESSENGER, G.P. SUMMERS, A. JASENEK, H. W. SCHOCK, U. RAU, J. NOCERINO, K. REINHARDT, J. TRINGE (bis). *Displacement damage dose analysis of proton irradiated CIGS solar cells on flexible substrates. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2001)*, pp. 2255-2258, 2001
- [25] Fatemi, N. S., P. R. Sharps, M. A. Stan, D. J. Aiken, B. Clevenger, H. Q. Hou, 2001. *Radiation-Hard High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells for Commercial Space Applications. Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference: 2155-2158*
- [26] R. J. Walters and G. P. Summers; *Space Radiation Effects in Advanced Solar Cell Materials and Devices. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 692*
- [27] Bernard Ecquer, "Energie Solaire Photovoltaïque : Physique des convertisseurs photovoltaïque", *Ecole d'Été de l'UNESCO, 1ère édition Paris, (1993)*
- [28] Henry Mathieu et Hervé Fanet « *Physique des semi-conducteurs et des composantes électroniques 6eme éditions* » *Cours et exercices corrigés dans édition Dunod, Paris, 2009 ISBN 978-2-10-054134-8*
- [29] J. Ducas, "Solar energy materials and solar cells", 32, (1994) ,pp 71-88
- [30] 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, (2009)*, pp.465–469.
- [31] Brahim LAKEHAL, « *Étude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky* », *Mémoire de magister en microélectronique, Université de Batna, 2009.*
- [32] H. EL. GHITANI and S. MARTINUZZI, « *Détermination des paramètres Electrique d'une photopile au silicium* » *J. App. Phys. 66(4), 1989, pp. 1717-1726*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [33] J. Degas, "3D Modeling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafers", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32, (1), (1994) pp. 71 – 88,.
- [34] K. Misiakos, C.H. Wang, A. Neugroschel, and F.A. Lindholm. "Simultaneous Extraction of minority-carrier parameters in crystalline semiconductors by lateral photocurrent". *J. Appl. Phys.* 67 (1), (1990). pp 321 – 333.
- [35] Arora, J.D, S.N. Singh and P.C. Mathur, "Surface Recombination effects on the performance of n+p step and diffused junction silicon solar cells", *Solid State Electronics*, 24(8) (1981) pp.739–747
- [36] Mouhamadou Mously Diallo, Boureima Seibou, Hamet Yoro BA, Issa Zerbo, Gregoire SISSOKO "one-dimensional study of a bifacial silicon solar cell illuminated from the front surface by a monochromatic light under frequency modulation: influence of irradiation and damage coefficient" *Current Trends in Technology and Sciences* ISSN: 2279-0535. Volume: 3, Issue: 6 (Oct.- Nov. 2014) pp416-421
- [37] M. L. Samb, M. Dieng, S. Mbodji, N. Thaim, F. I. Barro, G. Cissoko "Recombination parameters measurement of silicon solar cell under constant white bias light". *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Germany (Hamburg), September (2009), pp.469-472*
- [38] Tall, B. Seibou, M. A. O. El Moujtaba, A. Diao, M. Wade, G. Sisoko, "Diffusion Coefficient Modeling of a Silicon Solar Cell under Irradiation Effect in Frequency: Electric Equivalent Circuit", *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 19, (2), (2015), pp. 56-61
- [39] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 80(2003) pp 459-464
- [40] R.R. VARDANYAN, U. KERST, P. WAWER, M.E. NELL, H.G. WAGEMANN *2nd World conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion, 6 -10 july 1998, Vienna, Austria pp. 191 – 193.*
- [41]. H. L. Diallo, A. S. Maiga, A. Wereme, G. Sissoko "New approach of both junction and back surface recombination velocity in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 42, (2008), pp. 203–211

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [42]. Mbodji, S., B. Mbow, F. I. Barro, G. Sissoko, "a 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition." *Turkish Journal of Physics*, 35(3) , (2011), pp. 281 – 291.
- [43]. Mbodji, S., M. Dieng, B. Mbow, F.I. Barro and G. Sissoko, ".Three dimensional simulated modelling of diffusion capacitance of polycrystalline bifacial silicon solar cell." *Journal of Applied Science and Technology (JAST)*, 15(1 & 2), (2010), pp. 109 – 114
- [44]. 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.
- [45]. Anil Kumar, R "Measurement of solar cell AC parameter susing Impedance Spectroscop", *A Thesis Submitted for the Degree of master of science (Engg.) in the Faculty of Engineerin Indian Institute of Science*, Jan. 2000 pp. 49-50
- [46]. Dieng, M.L. Sow, S. Mbodji, M.L. Samb, M. Ndiaye, M. Thiame, F.I. Barro and G. Sissoko, "3D study of polycrystalline silicon solar cell: influence of applied magnetic field on the electrical parameters." *Semiconductor Science and technology*, 26(9), (2011). pp. 473-476.
- [47]. El. Ndiaye, G. Sahin, M. Dieng, A. Thiam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, G. Sissoko. "Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation". *J. Appl Math and Physics*, 3, (2015), pp. 54-55
- [48]. Mora-Sero, I., Garcia-Belmonte, G., Boix P.P., Vazquez, M.A. and Bisquert, J., "Impedance Spectroscopy Characterization of Highly Efficient Silicon Solar Cells under Different Illumination Intensities Light" *.Energy and Environmental Science*, 2, (2009), pp.678-686.
- [49]. Suresh, S., "Measurement of Solar Cell Parameters Using Impedance Spectroscopy." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 43, (1996) ,21-28

ANNEXES MATHÉMATIQUES

Equation De Diffusion Des Porteurs De Charges Minoritaires En Excès Dans La Base D'une Photopile A Jonction Verticale Parallèle En Régime Dynamique Fréquentiel Sous Eclairage Polychromatique

I.1- Equation de diffusion des porteurs de charges minoritaires en excès :

$$D(\omega, kl, \phi_p) \frac{\partial^2 \delta(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, t)}{\tau} = -G(z, t) + \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial t} \quad (1)$$

Où

- ✓ $\delta(x, t)$ est la densité des porteurs minoritaires dans la base qui peut s'écrire sous la forme :

$$\delta(x, t) = \delta(x) e^{(j\omega t)} \quad (2)$$

Avec $\delta(x)$ la composante spatiale et $e^{j\omega t}$ la composante temporelle.

- ✓ $G(z, t)$ est le taux globale de génération des porteurs minoritaires donné par l'expression

$$G(z, t) = e^{(j\omega t)} n \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i z} \quad (3)$$

$$g(z) = n \sum a_i e^{-b_i z} \quad (4)$$

- ✓ $g(z)$: Taux de génération dépendant de l'épaisseur

- ✓ a_i et b_i sont les coefficients tabulés du rayonnement, n désigne le nombre de soleil. Dans la suite nous prendrons $n=1$.

$$D(\omega, kl, \phi_p) \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} e^{(j\omega t)} - \frac{\delta(x) e^{(j\omega t)}}{\tau} = -g(z) e^{(j\omega t)} + \frac{\partial \delta(x)}{\partial t} e^{(j\omega t)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\partial(x)}{\tau D(\omega, kl, \phi_p)} = -\frac{g(z)}{D(\omega, kl, \phi_p)} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2(\omega, kl, \phi p)} = -\frac{g(z)}{D(\omega, kl, \phi p)} \quad (7)$$

✓ D est le coefficient de diffusion

✓ τ est la durée de vie moyenne des porteurs minoritaires de charge.

Posons :

$$L^2 = \tau D \quad (5)$$

$$\frac{1}{L(\omega)^2} = \frac{1}{L^2} \times (i\omega\tau + 1)$$

✓ L est la longueur de diffusion des porteurs

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2(\omega, kl, \phi p)} = -\frac{g(z)}{D(\omega, kl, \phi p)} \quad (8)$$

I.2- Solution de l'équation différentielle

La solution générale de l'équation s'écrit sous la forme $\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x)$

$\delta_1(x)$ est la solution particulière de l'équation avec second membre et $\delta_2(x)$ la solution générale de l'équation sans second membre.

Solution particulière de l'équation avec second membre

$$\frac{\delta(x)}{L^2(\omega, kl, \phi p)} = -\frac{g(z)}{D(\omega, kl, \phi p)} \quad (9)$$

$$\delta_1(x) = \frac{L^2(\omega, kl, \phi p)}{D(\omega, kl, \phi p)} \cdot \sum a_i e^{-b_i z} \quad (10)$$

Solution générale de l'équation sans second membre :

$$r^2 - \beta^2 = 0 \quad (11)$$

$$r^2 = \frac{1}{L(\omega, kl, \phi p)^2} = 0, r = \pm \frac{1}{L(\omega, kl, \phi p)} \quad (12)$$

$$\delta_2(x) = A_1 e^{(r_1 x)} + B_1 e^{(r_2 x)} \quad (13)$$

$$A_1 \cosh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] + A_1 \sinh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] + B_1 \cosh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] - B_1 \sinh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] \quad (14)$$

Posons : $A = A_1 + B_1$ et $B = A_1 - B_1$ (15)

$$\delta_2(x) = A \cosh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] + B \sinh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] \quad (16)$$

$$\delta(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x) \quad (17)$$

$$\delta(x) = \frac{L(\omega, kl, \phi p)^2}{D(\omega, kl, \phi p)} \cdot \sum a_i e^{-b_i z} + A \cosh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] + B \sinh\left[\frac{x}{L(\omega, kl, \phi p)}\right] \quad (18)$$

Pour déterminer A et B on utilise les conditions aux limites :

Condition aux limites

A la jonction $x=0$

$$\left[D(\omega, kl, \phi p) \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right]_{x=0} = [Sf \delta(x)]_{x=0} \quad (19)$$

Au milieu de la base $x = \frac{H}{2}$

$$\left[D(\omega, k, \phi p) \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right]_{x=\frac{H}{2}} = 0 \quad (20)$$

S_f : est la vitesse de recombinaison à la jonction

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

Expression de la densité des porteurs de charges.

$$D(\omega, kl, \phi p) \frac{B}{L(\omega, kl, \phi p)} = S_f \left[\frac{L^2(\omega, kl, \phi p)}{D(\omega, kl, \phi p)} \cdot \sum a_i e^{-b_i z} + A \right] \quad (21)$$

$$B = S_f \frac{L(\omega, kl, \phi p)}{D(\omega, kl, \phi p)} A + S_f \frac{L^3(\omega, kl, \phi p)}{D(\omega, kl, \phi p)} \cdot \sum a_i e^{-b_i z} \quad (22)$$

Au milieu de la base : $x = \frac{H}{2}$ (23)

$$D(\omega, kl, \phi p) \left[\frac{A}{2L(\omega, kl, \phi p)} \sinh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right) \right] + \frac{B}{L(\omega, kl, \phi p)} \cosh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right) = 0 \quad (24)$$

$$B = -A \tanh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right) \quad (25)$$

$$\left[D(\omega, k, \phi p) \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right]_{x=\frac{H}{2}} = 0 \quad (26)$$

$$-A \tanh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right) = S_f \frac{L(\omega, kl, \phi p)}{D(\omega, kl, \phi p)} A + S_f \frac{L^3(\omega, kl, \phi p)}{D(\omega, kl, \phi p)} \cdot \sum a_i e^{-b_i z} \quad (27)$$

Pour tout calcul fait on trouve :

$$A = \frac{-SfL^3(\omega, kl, \phi p) \cdot \sum a_i e^{-b_i z}}{SfL(\omega, kl, \phi p) + D(\omega, kl, \phi p) \tanh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right)} \quad (28)$$

$$A = f(kl, \phi p, \omega, Sf)$$

$$B = \left[\frac{SfL^3(\omega, kl, \phi p) \cdot \sum a_i e^{-b_i z}}{SfL(\omega, kl, \phi p) + D(\omega, kl, \phi p) \tanh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right)} \right] \tanh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right) \quad (29)$$

II Calcul du photo courant : J_{ph}

$$J_{ph} = \left[qD(\omega, kl, \phi p) \frac{\partial \delta(x)}{\partial(x)} \right]_{x=0} \quad (30)$$

q : charge élémentaire de l'élémentaire de l'électron (31)

$$J_{ph} = q \frac{(\omega, kl, \phi p) B}{L(\omega, kl, \phi p)} \quad (32)$$

V_{ph} : Potentiel

$$V_{th} = V_T \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_0} \delta(0) \right] \quad (33)$$

$$V_T = \frac{KT}{q}$$

- ✓ V_T la tension thermique
- ✓ T la température absolue à l'équilibre thermique
- ✓ q la charge élémentaire de l'électron
- ✓ k est la constante de Boltzmann

- ✓ n_0 est la densité des porteurs intrinsèques
- ✓ N_b Taux de dopage des impuretés

$$V_{ph} = \frac{KT}{q} \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_0^2} \left(\frac{SfL^3(\omega, kl, \phi p) \cdot \sum a_i e^{-b_i z}}{SfL(\omega, kl, \phi p) + D(\omega, kl, \phi p) \tanh\left(\frac{H}{2L(\omega, kl, \phi p)}\right)} + \frac{L^3(\omega, kl, \phi p)}{D(\omega, kl, \phi p)} \cdot \sum a_i e^{-b_i z} \right) \right] \quad (34)$$

III Calcul de la capacité : J_{ph}

$$C = q \cdot \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial V_{ph}} \Big|_{x=0} \quad (35)$$

$$C = \frac{q \cdot n_o}{V_T} + q \cdot \frac{\delta(0, z)}{V_T} \frac{\partial V_{ph}}{\partial \delta(0, z)} = V_T \left[\frac{1}{n_o} \left(\frac{1}{\frac{\delta(0, z)}{n_o} + 1} \right) \right] = V_T \frac{1}{n_o \left(1 + \frac{\delta(0, z)}{n_o} \right)} \quad (36)$$

$C = C_0 + C_1$ avec

$$C_0 = \frac{q \cdot n_o}{V_T} n_o = \frac{n_i^2}{N_B} \quad C_1 = q \cdot \frac{\delta(0, z)}{V_T} = q \cdot \frac{A_1 + \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i z}}{V_T}$$

IV Calcul des paramètres électriques

Résistance série R_s :

$$R_s = \frac{V_{co} - V_{ph}}{J_{ph}} \quad (37)$$

Résistance shunt R_{sh}

$$R_{sh} = \frac{V_{ph}}{J_{cc} - J_{ph}} \quad (38)$$

THESE DE DOCTORAT UNIQUE EN PHYSIQUE ET APPLCATION

THEME

Energie Solaire, Matériaux et Système (SOLMATS)

SUJET DE RECHERCHE

Etude a une dimension d' une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairage polychromatique en modulation de fréquence : effets de l' irradiation.

Président	Grégoire SISSOKO	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Rapporteurs	Birame DIENG	Maitre de Conférences	UADB
	Issa ZERBO/OUAGA	Maitre de Conférences	Univ.JOSEPH KI
Examineurs	Mamadou WADE	Maitre de Conférences	EPT/THIES
	Ibrahima Ly	Maitre de Conférences	EPT/THIES
	Ndeye T SISSOKO	Maitre-Assistant	EPT/THIES
	Amadou DIAO	Maitre-Assistant	FST/UCAD
Directeur	Hawa Ly DIALLO	Maitre de Conférences	Univ./THIES

Résumé :

Une étude bibliographique sur les techniques et les méthodes de détermination des paramètres électriques en régime dynamique fréquentiel sous irradiation a été présentée dans le chapitre I.

Dans le chapitre II, l'étude théorique de la photopile, en régime dynamique fréquentiel, sous irradiation et sous éclairage polychromatique a été faite. Cette étude a permis d'établir, en fonction de la fréquence, de l'énergie d'irradiation, du coefficient de dommage, les expressions de la densité des porteurs minoritaires, du photocourant et de la phototension en court-circuit et en circuit ouvert.

Les caractéristiques de la densité de photocourant, phototension ont permis de déterminer les résistances shunt et série

Dans le dernière chapitre, la capacité de la photopile en position de court-circuit et de circuit ouvert a été déterminé sous l'influence de l'énergie d'irradiation, de la fréquence, et du coefficient de dommage. La détermination des paramètres électriques de la photopile comme la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}), et la capacité (C) par l'intermédiaire des diagrammes de Nyquist du et de Bode de la capacité, nous a permis de proposer deux modèles électriques équivalents de la photopile.

Mots clés : Photopile Verticale – Régime dynamique fréquentiel - Photocourant – Photension – Vitesse de recombinaison – Profondeur – Résistance série – Résistance shunt – Capacité – fréquence –coefficient de dommage – Energie d'irradiation.