

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE CHIMIE SCIENCES
DE LA TERRE DE L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Année : 2017 N° d'ordre : 73

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Présentée par

JEAN JUDE DOMINGO

POUR OBTENIR LE DIPLÔME DE DOCTORAT EN SCIENCES PHYSIQUES

SPECIALITE : Energie Solaire, Matériaux et Systèmes (SOLMATS)

SUJET :

ETUDE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL D'UNE PHOTOPILE
MONOFACIALE A BASE DE DISELENIURE DE CUIVRE D'INDIUM ET DE GALLIUM
CuInGaSe₂ (CIGS) SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE: DETERMINATION
DES PARAMETRES ELECTRIQUES

Soutenue publiquement le 18/ 11/ 2017 devant le jury composé de :

Président :	GREGOIRE	SISSOKO	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Rapporteurs:	MAMADOU	BARRY	Professeur Titulaire	FST/UCAD
	BABACAR	MBOW	Maître de Conférences	FST/UCAD
Examineur :	AMADOU	DIAO	Maître-Assistant	FST/UCAD
Directeur de thèse :	MOUSTAPHA	DIENG	Professeur Titulaire	FST/UCAD

Dédicaces

CE TRAVAIL EST DÉDIÉ À :

FEU MON PÈRE GÉRAUD EDOUARD DOMINGO

MA MÈRE ANNA NDIAYÉ

MA FEMME AÏSSATOU THIOUBE

MES ENFANTS DANIEL ANSOU ET KINÉ THÉRÈSE

MES FRÈRES ET SŒURS

MES TANTES

MES ONCLES

MES COUSINS ET COUSINES

MES NEVEUX ET NIÈCES

MA BELLE FAMILLE

MES COLLÈGUE(E)S

MES AMI(E)S

**À TOUS LES MEMBRES DU LABORATOIRE DES SEMI-CONDUCTEURS ET
D'ENERGIE SOLAIRE (L.A.S.E.S)**

**TOUS (TES) CEUX (CELLES) QUI, DE PRÈS OU DE LOIN, M'ONT
SOUTENU TOUT AU LONG DE MON CURSUS ÉLÉMENTAIRE JUSQU'AU
CURSUS UNIVERSITAIRE.**



Remerciements

Je remercie :

Monsieur **Moustapha Dieng**, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, d'avoir bien voulu diriger ce travail, et pour m'avoir aussi associé à sa thématique de recherche par l'intermédiaire de cette thèse. Grâce à ses compétences dans la physique des semi-conducteurs plus précisément dans les couches minces, qui font de lui un des meilleurs spécialistes dans le domaine, j'ai acquis des connaissances qui m'ont aidé à réaliser ce travail. C'est un homme intuitif, plein d'innovations et de sens de créativité. Ses qualités humaines ne sont pas en reste ; sa présence, son humilité, sa simplicité, ses conseils, son humour et son soutien permanent sur tous les plans m'ont permis d'affronter d'innombrables difficultés. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, son écoute et l'attention qu'il a portée tout au long de ce travail. J'ai aussi apprécié la confiance et la liberté qu'il m'a accordées pour avancer personnellement et de façon autonome dans la réalisation de cette tâche. Grâce à lui, j'ai donc acquis des aptitudes d'analyse et de synthèse nécessaires pour un travail de recherche. Je lui adresse ma profonde et indéfectible gratitude.

Que Dieu le Tout Puissant vous attribue récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises

Monsieur **Grégoire Sissoko**, Professeur Titulaire de classe exceptionnelle à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar d'avoir bien voulu présidé ce jury. En toute franchise je ne saurais trouver de mots assez forts pour vous exprimer ma profonde gratitude. Vous avez été toujours disponible à promouvoir davantage la recherche, vous donnez le meilleur de vous-même pour accompagner les jeunes dans leurs éducations scientifique, morale et sociale. Vous êtes un homme exceptionnel, de conviction et de sagesse. Vos conseils ont suscité en moi la persévérance et l'abnégation dans le travail. Vous avez été accueillant, attentif à nos différentes sollicitations et également aussi à l'égard des autres. Je vous remercie, de tout cœur.

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

Monsieur **Mamadou Barry** professeur Titulaire de mathématique et chef de département de mathématique de la faculté des sciences et techniques de l'Université Cheikh Anta Diop. Vous avez toujours donné le meilleur de vous-même pour nous assurer une bonne formation scientifique. C'est tout un honneur pour moi de vous avoir comme membre du jury de ma thèse. Que Dieu le Tout Puissant vous attribue récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises

Monsieur **Babacar Mbow** Maître de Conférences, responsable du Master SOLMATS (Energie Solaire Matériaux et Système) du Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire (L.A.S.E.S) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour l'honneur qui m'a été fait de bien vouloir participer à ce jury. Vous avez été toujours disponible à nos innombrables sollicitations. De par votre abnégation dans le travail, votre courage, votre

volonté de faire toujours mieux, j'ai pu bénéficier de votre apport inégalable dans la confection de ce travail. Que Dieu le Tout Puissant vous attribue récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.

*Monsieur **Amadou Diao**, Maître -Assistant à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour tout le soutien et les conseils que vous n'avez cessé de me donner. Je vous remercie également pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury. Depuis le Master jusqu'à présent vous n'avez jamais cessé de m'épauler. J'ai pu bénéficier de votre apport inégalable dans la confection de ce travail. Je ne saurais comment vous remercier. Que Dieu le Tout Puissant vous attribue récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises*

*Monsieur **Alain .K. Ehemba**, Docteur de L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Vous avez été toujours disponible à nos innombrables sollicitations. De par votre abnégation dans le travail, votre courage, votre volonté de faire toujours mieux, j'ai pu bénéficier de votre apport inégalable dans la confection de ce travail. Je ne cesserai jamais de vous remercier pour tout ce que vous avez fait pour l'ensemble de l'équipe que nous formons. Que Dieu le Tout Puissant vous bénisse.*

*Monsieur **Ousseynou Samba** Docteur de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar en Ecologie et Gestion des Ecosystèmes Aquatiques, vous avez été toujours disponible à mes innombrables sollicitations. Vous m'avais beaucoup aidé pour la confection de ce document. Vous êtes un homme ouvert, cordial, social et plein de qualités humaines et sociales. Vous avez été toujours disponible aux différentes sollicitations des jeunes chercheurs de votre laboratoire (IFAN). Que Dieu le Tout Puissant vous attribue récompense et vous soutienne dans toutes vos entreprises.*

*Mes remerciements à Monsieur **Serigne Faye** et Madame **Awa Sarr Diop** respectivement proviseur et censeur du Lycée Plan Jaxaay et à tous mes collègues professeurs du lycée. Je remercie également tous mes camarades chercheurs au Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire (L.A.S.E.S): Omar Sadio, Salif Cissé, Ibrahima Wade , Demba Diallo, Djimba Niane, Ousmane Diagne etc .*

*Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont très chères, en particulier mon épouse **Aïssatou Thioube** et ma mère **Anna Ndiaye** pour leurs encouragements, la confiance et le soutien moral dont elles ont fait preuve tout au long de ces années de thèse.*

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Sommaire	iv
Index des abréviations	viii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xiii
Index des grandeurs physiques	xiv
Nomenclature	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 :	4
GENERALITES SUR LES SOURCES D'ENERGIES ET PRESENTATION DE LA CELLULE SOLAIRE A BASE DU CIGS	4
1.1 Généralités sur les sources d'énergie	4
1.1.1 Introduction	4
1.1.2 Les énergies non renouvelables	5
1.1.3 Les énergies renouvelables	9
1.2 Présentation de la cellule solaire à base du CIGS	15
1.2.1 Structure d'une cellule à base du CIGS	15
1.2.2 Propriétés du CIGS	17
1.2.3 Propriétés électroniques	17
1.2.4 Propriétés optiques	17
1.2.5 Orientation cristalline	18
1.2.6 Mécanismes de recombinaison	18
1.2.7 Dopage	18
1.2.8 Les joints de grain	19
1.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	19

1.3.1	Avantages.....	19
1.3.2	Inconvénients.....	19
1.4	Conclusion	19
CHAPITRE 2 :	21
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL.....		21
1.1	Introduction	21
1.2	Des expressions analytiques précises pour les paramètres du model exponentiel simple de la cellule solaire ^[33]	21
1.3	Mesure des paramètres électriques d'une cellule en arséniure de gallium« GaAs/Ge », par spectroscopie d'impédance ^[34]	21
1.4	Nouvelle méthode de caractérisation de l'impédance d'une cellule solaire ^[35]	22
1.5	Impédance dynamique du module pv dépendant de sa tension et de sa fréquence ^[36]	23
1.6	Mesure des paramètres électriques d'une photopile par la méthode de la spectroscopie d'impédances ^[37]	24
1.7	Etude comparative des modèles à une et deux diodes en vue d'une simulation précise des photopiles ^[38]	26
1.7.1	Méthode de SINGAL :	27
1.7.2	Méthode de WARASHINA et USHIROKAWA:.....	28
1.7.3	Méthode de ARAUJO et SANCHEZ:	28
1.7.4	Modèle à une exponentielle	29
1.8	Vitesses de recombinaisons intrinsèques d'une photopile monofaciale à jonction horizontale et a une dimension ^[39, 40]	29
1.8.1	Vitesse de recombinaison a la face arrière	31
1.8.2	Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.....	31
1.9	Conclusion	31
CHAPITRE 3 :	32
ETUDE THEORIQUE DE LA PHOTHOPILE MONOFACIALE A BASE DE CIGS SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL		32
1.1	Introduction	32
1.1.1	Présentation de la photopile monofaciale à jonction horizontale à base de CIGS	32



1.1.2	Description d'une photopile monofaciale à base de CIGS	32
1.2	Densité des porteurs minoritaires générés dans la base de la photopile à base du CIGS par une lumière monochromatique en modulation de fréquence	33
1.2.1	Equation de continuité en régime dynamique fréquentiel	33
1.2.2	Solution de l'équation de continuité et conditions aux limites	34
1.1	Les expressions des coefficients A_n et B_n sont déterminées en utilisant les conditions aux limites suivantes ^[39, 40] :	35
1.2	Densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base.	35
1.2.1	Etude de la densité des porteurs de charge minoritaires	35
1.2.2	Profil du module de la densité relative des porteurs de charge photogénérées dans la base	38
1.3	Etude du coefficient d'absorption	41
1.4	Densité de photocourant	42
1.4.1	Généralités	42
1.4.2	Profil de la densité de photocourant	42
1.5	Densité de phototension	44
1.5.1	Généralités	44
1.5.2	Etude du profil de la phototension	44
1.6	La variation de la capacité de diffusion en fonction de la fréquence de modulation	47
1.6.1	Etude de la capacité de diffusion	49
1.6.2	Etude de l'efficacité de la capacité	51
1.7	Etude de la caractéristique densité de photocourant-phototension de la photopile	52
1.8	Etude des vitesses de recombinaison	54
1.8.1	Etude de la vitesse de recombinaison S_b à la face arrière	54
1.8.2	L'expression de la vitesse de recombinaison s_b à la face arrière	55
1.8.3	Diagramme de Nyquist de la vitesse de recombinaison s_{b1} à la face arrière	55
1.8.4	Le diagramme de Bode de la vitesse de recombinaison s_{b1} a la face arrière	57
1.8.5	Diagramme de Bode de la vitesse de recombinaison s_{b1} a la face arrière pour un éclairage par la face avant : Phase de S_{b1}	59
1.8.6	Circuits électriques équivalents à la vitesse de recombinaison en face arrière s_{b1}	60

1.9	Etude des vitesses de recombinaison intrinsèque Sf_0 à la jonction.	61
1.9.1	Expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_1 à la jonction.	61
1.9.2	Diagramme de bode de la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction	
	Sf_0 : Phase de Sf_1	63
1.10	Conclusion	64
CHAPITRE 4 :		65
DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES D'UNE PHOTOPILE MONOFACIALE A BASE DE DISELENUIRE DE CUIVRE D'INDIUM ET DE GALLIUM ($CuInGaSe_2$ NOTE CIGS)		65
1.1	Introduction	65
1.2	Etude de la résistance shunt	65
1.3	Variation de la résistance shunt	66
1.4	Etude de la résistance série	67
1.5	La variation de la résistance série	68
1.6	Impédance dynamique	70
1.7	L'impédance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction	70
1.8	Représentation de Nyquist	71
1.8.1	Représentation de Nyquist pour un éclairage par la face avant de l'impédance dynamique	71
1.9	Diagramme de Bode de l'impédance	72
1.9.1	Diagramme de Bode du module de l'impédance	73
1.9.2	Diagramme de Bode de l'impédance	77
1.10	Modèle électrique équivalent de la photopile	79
1.11	Puissance électrique de la photopile	80
1.11.1	Expression de la puissance	80
1.11.2	Etude de la puissance en fonction de la tension et de la vitesse de recombinaison a la jonction	81
1.11.3	Facteur de forme	81
1.12	Conclusion	82
CONCLUSION GENERALE		83
Bibliographie et Webographie		85

Index des abréviations

GPL	Le gaz de pétrole liquéfié
GNV	Le gaz naturel pour véhicule
CEA	Le commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
BP	British Pétroleum
l'ETBE	Ether éthyle tertio-butyle (Ethyl Tert-Butyl Ether)
SEGS	Solar Energy Generating Systems
SLG	Soda-Lime Glass
E_g	Energie du gap
FFT	Fast Fourier Transform
ZCE	Zone de charge d'espace
BSF	Back surface Field
GRDF	Gaz Réseau Distribution France
SLG	Substrat de verre sodé
CBD	Dépôt par bain chimique (Chemical Bath Deposition)
TCO	Oxyde transparent conducteur (Transparent Conducting Oxide)
E_c	Energie de la bande de conduction
E_i	Le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque
ITO	Oxyde d'indium et d'étain
BC	Bande de conduction
BV	Bande de valence
ISA	l'Alliance internationale pour l'énergie solaire (International solar alliance)

Liste des figures

Figure 1:Exemple de fusion nucléaire.....	5
Figure 2:Exemple de fission nucléaire	6
Figure 3:Morceau de houille	7
Figure 4: Morceau d’anthracite	8
Figure 5: Structure standard d’une cellule à base de CIGS.....	16
Figure 6: Dispositif expérimental utilisé en spectroscopie d’impédance	22
Figure 7: Schéma électrique équivalent d’une cellule solaire.....	23
Figure 8:Schéma électrique équivalent d’une cellule solaire	24
Figure 9:Impédance d’une résistance pure (R).....	24
Figure 10: Impédance d’une capacité pure (C)	24
Figure 11:Impédance d’une inductance pure (L)	25
Figure 12: Impédance d’un circuit R-C en série	25
Figure 13: Impédance d’un circuit R-L en série.....	25
Figure 14: Impédance d’un circuit R-C en parallèle	26
Figure 15: Impédance d’un circuit R-C en parallèle	26
Figure 16: Circuit électrique équivalent du modèle à une diode sous éclairement.	26
Figure 17: Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes sous éclairement.....	26
Figure 18: Structure d’une photopile monofaciale à base de CIGS de type n ⁺ -p-p ⁺	32
Figure 19:Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l’épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d’onde du visible.Sf =10cm.s ⁻¹ (Circuit ouvert) ; $\omega=10^5$ rad.s ⁻¹ ; Sb =4.10 ⁴ cm.s ⁻¹	36
Figure 20:Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l’épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d’onde de l’infrarouge. Sf =10cm.s ⁻¹ (Circuit ouvert) ; $\omega=10^5$ rad.s ⁻¹ ;Sb =4.10 ⁴ cm.s ⁻¹	36
Figure 21: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction l’épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d’onde du visible.Sf = 6.10 ⁶ cm.s-1(court-circuit) ; $\omega=10^5$ rad.s ⁻¹ ; Sb =4.10 ⁴ cm.s ⁻¹	37
Figure 22: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction l’épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d’onde de l’infrarouge.Sf = 6.10 ⁶ cm.s-1(court-circuit) ; $\omega=10^5$ rad.s ⁻¹ ; Sb =4.10 ⁴ cm.s ⁻¹	37
Figure 23: Profil de la densité relative des porteurs de charge minoritaires en fonction de l’épaisseur dans la base pour différentes valeurs de la longueur d’onde. Sf =10cm.s ⁻¹ (Circuit ouvert) ; $\omega=10^5$ rad.s ⁻¹ ; Sb =4.10 ⁴ cm.s ⁻¹	38
Figure 24: Profil de la densité relative des porteurs de charge minoritaires en fonction de l’épaisseur dans la base pour différente valeur de la longueur d’onde. Sf = 6.10 ⁶ cm.s ⁻¹ (Court-circuit) ; $\omega=10^5$ rad.s ⁻¹ ; Sb =410 ⁴ cm.s ⁻¹	39

Figure 25: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes fréquence de modulation $\lambda= 0,98\mu\text{m}$; $S_f=10\text{cm.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$, (Circuit ouvert)....	40
Figure 26: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes fréquence de modulation. $\lambda= 0,98\mu\text{m}$; $S_f= 6.10^6 \text{cm.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$, (Circuit ouvert).....	40
Figure 27: Coefficient d'absorption du CIGS en fonction de la longueur d'onde	41
Figure 28: Module de densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur du visible. $\omega=10^5 \text{rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$	43
Figure 29: Module de densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur de l'infrarouge. $\omega=10^5 \text{rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$	43
Figure 30: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur du visible. $\omega=10^5 \text{rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$	45
Figure 31: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur de l'infrarouge. $\omega=10^5 \text{rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$	45
Figure 32: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de fréquences. $\lambda= 0,58\mu\text{m}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$	46
Figure 33: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de fréquence. $\lambda= 0,98\mu\text{m}$; $S_b=410^4 \text{cm.s}^{-1}$	47
Figure 34: Variation de la capacité en fonction du logarithme de la fréquence pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $S_f= 10^1 \text{cm.s}^{-1}$, (Circuit-ouvert)	48
Figure 35: Variation de la capacité en fonction du logarithme de la fréquence pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $S_f= 6.10^6 \text{cm.s}^{-1}$, (Court-circuit)	48
Figure 36: Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $\omega=10^5 \text{rad.s}^{-1}$; $S_b=410^4 \text{cm.s}^{-1}$	50
Figure 37: Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la fréquence. $\lambda= 0,98\mu\text{m}$; $S_b=410^4 \text{cm.s}^{-1}$	51
Figure 38: Variation du courant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $\omega=10^5 \text{rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$	53
Figure 39: Variation du courant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la fréquence. $\lambda= 0,98\mu\text{m}$; $S_b=410^4 \text{cm.s}^{-1}$	54
Figure 40: Variation de la partie imaginaire de S_b1 en fonction de sa partie réelle.....	55
Figure 41: Variation de la partie imaginaire de S_b1 en fonction de sa partie réelle.....	56
Figure 42: Variation de la partie imaginaire de S_b1 en fonction de sa partie réelle.....	56
Figure 43: Variation de la partie imaginaire de S_b1 en fonction de sa partie réelle.....	57
Figure 44: Variation de la vitesse de recombinaison S_b1 en fonction de la fréquence.	58
Figure 45: Variation de la vitesse de recombinaison S_b1 en fonction de la fréquence	58
Figure 46: Variation de la vitesse de recombinaison S_b1 en fonction de la fréquence.	58



Figure 47:Variation de la vitesse de recombinaison S_{b1} en fonction de la fréquence.	59
Figure 48:Variations de la phase de la vitesse de recombinaison S_{b1} en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde.	60
Figure 49:Circuit équivalent déduit de la vitesse de recombinaison en face arrière.	60
Figure 50:Variation de la vitesse de recombinaison S_{f1} en fonction de la fréquence.....	61
Figure 51:Variation de la vitesse de recombinaison S_{f1} en fonction de la fréquence.....	62
Figure 52:Variation de la vitesse de recombinaison S_{f1} en fonction de la fréquence.....	62
Figure 53:Variation de la vitesse de recombinaison S_{f1} en fonction de la fréquence.....	63
Figure 54:Phase de la vitesse de recombinaison S_{f1} en fonction de la fréquence de modulation pour différentes longueurs d'onde.	64
Figure 55:Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en court-circuit.	65
Figure 56:Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $\omega = 10^5 \text{rad.s}^{-1}$	66
Figure 57:Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$	67
Figure 58:Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en circuit ouvert.....	68
Figure 59:Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $S_b = S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$	69
Figure 60:Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la fréquence. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$	70
Figure 61:Module de l'impédance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour un éclairage par la face avant $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$	71
Figure 62:Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle pour un éclairage par la face avant. $\omega = 5.10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$	72
Figure 63:Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$	73
Figure 64:Module de l'impédance en fonction de la fréquence $S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$	74
Figure 65:Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$	74
Figure 66:Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f = 3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$	75
Figure 67:Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f = 6.10^6 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$	76
Figure 68:Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f = 6.10^6 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$	77
Figure 69:Variation de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_f = 10 \text{ cm.s}^{-1}$ (circuit ouvert). 78	
Figure 70:Variation de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_f = 6.10^6$ (court-circuit)	78
Figure 71:Circuit équivalent avec le modèle à une diode.	79
Figure 72: Circuit équivalent avec le modèle à deux diodes.....	79
Figure 73:Circuit équivalent.....	80

Figure 74: Variation de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$ 81

Liste des tableaux

Tableau 1: Résistance dynamique	23
Tableau 2: valeurs de la densité maximale des porteurs minoritaires, de l'épaisseur de la zone de charge d'espace, de la capacité et du rendement pour différentes valeurs de la longueur d'onde.....	52
Tableau 3: Fréquence de coupure en fonction de la longueur d'onde	75
Tableau 4: Fréquence de coupure en fonction de la longueur.....	76
Tableau 5: Fréquence de coupure en fonction de la longueur.....	77

Index des grandeurs physiques

C_1	Capacité -----	$(\mu\text{F}.\text{cm}^{-2})$
C_2	Capacité -----	$(\mu\text{F}.\text{cm}^{-2})$
C	Capacité-----	$(\mu\text{F}.\text{cm}^{-2})$
D	Coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base -----	$(\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$
$G(x,t)$	Taux de génération monochromatique en modulation de fréquence en fonction de la profondeur x et du temps t -----	$(\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1})$
$g(x)$	Taux de génération en fonction de la profondeur x -----	$(\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1})$
H	Epaisseur totale de la photopile bifaciale -----	(μm)
J_{ph}	Densité de photocourant-----	$(\text{A}.\text{cm}^{-2})$
J_{phCC}	Densité de photocourant de court-circuit -----	$(\text{A}.\text{cm}^{-2})$
K	Constante de Boltzmann-----	(J/K)
L	Longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base -----	(cm)
$L(\omega)$	Longueur de diffusion complexe des porteurs minoritaires dans la base-----	(cm)
n_0	Concentration intrinsèque du matériau CIGS-----	(cm^{-3})
N_b	Taux de dopage des impuretés dans la base -----	(cm^{-3})
n_i	est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires-----	(cm^{-3})
q	Charge élémentaire de l'électron -----	(C)
R_{sh}	Résistance shunt -----	$(\Omega.\text{cm}^2)$
R_C	Résistance de charge -----	(Ω)
R_d	Résistance dynamique -----	$(\Omega.\text{cm}^2)$
R_p	Résistance parallèle -----	$(\Omega.\text{cm}^2)$
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion du matériau à la longueur d'onde λ	
R_s	Résistance série -----	$(\Omega.\text{cm}^2)$
S_f	Vitesse de recombinaison à la jonction -----	$(\text{cm}.\text{s}^{-1})$
S_b	Vitesse de recombinaison à la face arrière -----	$(\text{cm}.\text{s}^{-1})$
t	Temps -----	(s)
V_{ph}	Phototension -----	(V)
V_{CO}	Phototension de circuit ouvert -----	(V)
V_T	Tension thermique -----	(V)
T	Température absolue -----	(K)
ω	Fréquence angulaire -----	$(\text{rad}.\text{s}^{-1})$
ω_c	Fréquence angulaire de coupure-----	$(\text{rad}.\text{s}^{-1})$
$\delta(x,t)$	Densité des porteurs minoritaires photocréés dans la base en fonction de la profondeur x et du temps t -----	(cm^{-3})
x	Profondeur de la base de la photopile bifaciale -----	(μm)
Z	Impédance dynamique de la photopile -----	$(\Omega.\text{cm}^2)$
ϕ	Flux incident de lumière monochromatique-----	(W/cm^2)
λ	Longueur d'onde-----	(μm)
τ	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base -----	(s)
$\alpha(\lambda)$	Coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ -----	(cm^{-1})

Nomenclature

CIS ou CuInGaSe_2	Diséléniure de Cuivre et d'Indium
CdS	Sulfure de Cadmium
CdTe	Tellure de Cadmium
CIGS ou CuInGaSe_2	Diséléniure de Cuivre d'Indium et de Gallium
GaAs	Arséniure de Gallium
CdSe	Séléniure de Cadmium
InP	Phosphure d'Indium
MoSe_2	Diséléniure de molybdène
TiO_2	Dioxyde de Titane
WSe_2	Diséléniure Tungstène
CuGaSe_2	Diséléniure de Cuivre et de Gallium
Mo	Molybdène
ZnO	Oxyde de Zinc
ZnS	Sulfure de Zinc
Ni	Nickel
Al	Aluminium
In	Indium

INTRODUCTION GENERALE

Le processus évolutif des activités de l'homme au cours du vingtième siècle, a entraîné une croissance notable de la consommation d'énergie dans le monde. Une partie importante de cette énergie est produite en brûlant des combustibles fossiles. Cependant, les problèmes inhérents à l'utilisation des combustibles fossiles, tels que leur disponibilité en quantité limitée et leurs effets néfastes au plan environnemental et politique, poussent l'homme à rechercher une nouvelle source d'énergie. Une des solutions les plus prometteuses pour le devenir de l'humanité, est l'énergie photovoltaïque [1]. La crise énergétique aigue et profonde qui sévit en Afrique est devenue particulièrement notable durant cette dernière décennie, particulièrement au Sénégal. Les autorités cherchent par plusieurs voies et moyens à résoudre cette crise, en proposant des plans de résolution, mais le problème demeure voire s'accroît. Or la solution à cette crise énergétique n'est pas loin, elle est belle et bien possible, elle repose principalement sur une volonté politique à financer la recherche sur les énergies renouvelables plus précisément sur l'énergie photovoltaïque.

Les sources d'énergie peuvent être classées en deux catégories: dans la première catégorie nous retrouvons les énergies non renouvelables: pétrole, gaz naturel, énergie nucléaire, charbon (les houilles et anthracite ; le charbon brun) et celles qui sont renouvelables (l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie solaire). Actuellement, le pétrole est la source non renouvelable la plus utilisée dans le monde. Cette source d'énergie n'est pas accessible à tout le monde et elle est sous le contrôle des grandes puissances et des pays arabes.

La production du baril atteint actuellement un pic et les spécialistes pensent qu'elle diminuera pendant les dix prochaines années. La production d'énergie solaire devrait être l'une des plus importantes, car elle représente de nombreux avantages.

De surcroît, des études ont montré que la rareté du pétrole explique sa cherté et qu'au bout d'un certain temps, les puits de pétrole seront taris.

Dans la deuxième catégorie nous retrouvons les énergies renouvelables : l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, la bioénergie, l'énergie de la biomasse et l'énergie solaire. [2]

Le soleil envoie chaque année plus de 40000 fois les besoins en énergie fossiles de l'humanité. Autant dire une énergie inépuisable, gratuite et omniprésente.

L'énergie solaire peut bien produire de la chaleur (solaire thermique), et de l'électricité (solaire photovoltaïque). Le coût proportionnel est quasi nul : lorsque le panneau solaire est installé, l'énergie ne coûte rien, même si l'investissement et l'entretien représentent des dépenses certaines. Contrairement à d'autres ressources énergétiques, l'énergie solaire est décentralisée. Ce qui explique également pourquoi beaucoup d'endroits isolés en disposent déjà. Pratiquement, l'énergie solaire est a priori une solution efficace pour remplacer le pétrole.

Effectivement, l'énergie photovoltaïque s'obtient par la conversion directe des rayons solaires en énergies électriques grâce aux cellules solaires. En effet, les cellules photovoltaïques sont des dispositifs à semi-conducteurs qui permettent d'assurer cette transformation directe de l'énergie solaire en électricité.

L'obtention de cette électricité d'origine solaire consiste à utiliser les photons pour libérer des électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule, qui génère un courant électrique continu : c'est l'effet photovoltaïque découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel.

Depuis, la recherche s'intensifie dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, dans les années 1954-1955, est créée par les laboratoires BELL aux Etats-Unis, la première cellule photovoltaïque à base de silicium obtenue par tirage Czochralski [2] avec un rendement de 4%.



Introduction générale

Le Sénégal étant suffisamment irradié par le soleil, son problème énergétique devrait être réglé par cette source d'énergie non polluante et presque inépuisable. Notons quand même que des efforts allant dans ce sens ont été faits par nos autorités. Au mois d'octobre 2016, le président de la république a inauguré l'une des plus grandes centrales solaires photovoltaïques de l'Afrique de l'Ouest au village de Bokhol dans le département de Dagana (nord du Sénégal).

Bâtie sur une superficie de 20 hectares, la centrale photovoltaïque de Bokhol est dotée d'une puissance de 20 mégawatts (MW). Elle va coûter globalement 20 millions d'euros (plus de 16 milliards de francs CFA). L'infrastructure sera composée de 75 000 panneaux solaires placés sur une longueur cumulée de 20 kilomètres.

Des efforts, certes, ont été faits, mais il reste beaucoup à faire dans ce domaine surtout sur le rendement des cellules, les types de cellules et le coût des panneaux.

Depuis 1973, date de la première crise pétrolière, la communauté mondiale pense remédier les problèmes énergétiques en faisant appel aux énergies renouvelables, le solaire en particulier.

L'amélioration du rendement de la cellule solaire passe nécessairement par la maîtrise des paramètres de recombinaison, de la caractérisation et de l'élaboration des cellules.

En effet des photopiles de haut rendement et à bon marché ont orienté les recherches vers l'exploration de nouveaux matériaux en couches minces dont le rendement est meilleur que celui du silicium, même s'il a fourni jusque-là les meilleures performances.

Ces recherches ont abouti à la découverte de certains matériaux ternaires qui ont un bon rendement de conversion et une grande stabilité. Ainsi émerge la filière des chalcopyrites semi-conductrices à base de cuivre dont le matériel de référence est le diséléniure de cuivre et d'indium CuInSe_2 .

Ces matériaux possèdent des caractéristiques exceptionnelles qui en font des matériaux particulièrement adaptés à des applications photovoltaïques à faible coût.

Le CIS est capable de s'auto-réparer à la manière d'un être vivant ! sa structure désorganisée lui permet de se plier là où le silicium se casse. Il préserve ses propriétés électroniques quelles que soient les contraintes extérieures.^[3]

Depuis quelques années déjà les scientifiques s'étonnaient de l'incroyable stabilité de ce semi-conducteur. Des panneaux allemands testés sur un satellite depuis deux ans n'ont montré aucun signe de dégradation malgré l'intense bombardement des rayons cosmiques.

Mais il a fallu quinze (15) ans d'études, avec des méthodes d'observation perfectionnées pour comprendre d'où venait cette exceptionnelle stabilité. Et son secret bouleverse les présupposés de l'électronique. Le CIS bascule les préceptes de la stabilité. C'est un semi-conducteur aussi stable que le silicium, toutefois il n'est ni parfaitement ordonné, ni discipliné, pire ses atomes son mobiles.^[3]

Cela s'explique par le fait que le CIS est composé d'atomes de séléniums gros et mobiles, d'indium plus petits, et surtout de cuivre baladeurs. Il a un réseau flexible et les défauts y sont multiples. Les atomes composant le CIS n'ont pas de place aussi parfaitement définie que dans le silicium, ils peuvent laisser leur place vacante et les liaisons atomiques se font et se défont. Le silicium résiste aux agressions extérieurs jusqu'à rompre : il est plastique, tandis que le CIS résiste jusqu'à un seuil plus important parce qu'il s'adapte : il est élastique.^[4]

La filière photovoltaïque à base de couches minces de diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe_2 noté CIS) et de ses alliages avec du gallium pour donner le diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CuInGaSe_2 noté CIGS) prend aujourd'hui son envol industriel. Celui-ci est porté par des performances très élevées en matière de rendement de Conversion,^[4]

atteignant plus de 21% au laboratoire et d'environ 14% sur le marché de l'industrie. Elles sont la conséquence de propriétés physiques et chimiques exceptionnelles, dont la compréhension constitue un challenge scientifique de premier ordre.

Introduction générale

Dans ce travail, nous allons axer notre réflexion sur l'étude en régime dynamique fréquentiel d'une photopile à base de CuInGaSe_2 sous éclairage monochromatique: d'où la détermination des paramètres électriques.

Ce manuscrit présente quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous verrons les généralités sur les sources d'énergies et la présentation de la cellule solaire à base de CIGS.

Dans le second chapitre nous ferons l'étude bibliographique sur le régime dynamique fréquentiel.

Dans le troisième chapitre nous étudierons théoriquement la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous déterminerons les paramètres électriques de la photopile monofaciale à base de CIGS.

CHAPITRE 1 :

GENERALITES SUR LES SOURCES D'ENERGIES ET PRESENTATION DE LA CELLULE SOLAIRE A BASE DU CIGS

La quasi-totalité des sources d'énergie disponibles sur terre, sont toutes d'origine solaire, excepté l'énergie nucléaire et géothermique. En effet, même le charbon et le pétrole proviennent des plantes, tributaires du soleil. L'énergie solaire est transformée par la nature en bien d'autres formes d'énergie, mais jamais en électricité. Pour arriver jusqu'à ce stade, l'homme est obligé d'appliquer à ces sources des transformations supplémentaires qui vont diminuer le rendement global de conversion d'énergie ^[5]. Nous allons nous appesantir dans ce qui suit sur les différentes sources d'énergie existantes dans le monde, en spécifiant le photovoltaïque comme méthode de conversion directe des photons solaires en électricité, et sur une présentation de la photopile à base de CIGS.

1.1 Généralités sur les sources d'énergie

1.1.1 Introduction

Depuis les années quatre-vingt, nous assistons à une augmentation considérable de la consommation mondiale de l'énergie, cette augmentation est due à l'augmentation de la population mondiale d'une part et l'explosion du développement industriel des pays industrialisés. Présentement la production de l'énergie est basée en grande partie sur les énergies non renouvelables à savoir le pétrole, le gaz naturel (GPL et GNV), le charbon (les houilles et anthracites; le charbon brun) et le nucléaire. Or ces énergies présentent de sérieux problèmes: sur le plan environnemental (la pollution, le réchauffement de la terre et les changements climatiques) et sur le plan politique entre les états (les relations conflictuelles entre les pays pour commander les réservations de combustible fossile), ces sources sont épuisables. En présence de l'augmentation de la consommation mondiale de l'énergie, l'Homme sera condamné à trouver d'autres sources pour satisfaire la demande énergétique des futures générations. Les énergies dites renouvelables sont la meilleure solution pour remédier à ces problèmes. La production de ces énergies est basée sur des ressources dont les stocks sont illimités ^[6]

On distingue plusieurs types d'énergies renouvelables à savoir : l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse, et l'énergie solaire.

1.1.2 Les énergies non renouvelables

Elle représente environ 86% de la production mondiale de l'énergie.

1.1.2.1 L'énergie nucléaire

Dans le langage courant, l'énergie nucléaire correspond aux usages civils et militaires de l'énergie libérée lors des réactions de fission nucléaire des noyaux atomiques au sein d'un réacteur nucléaire ou lors d'une explosion atomique (dans le cas d'une bombe thermonucléaire il existe aussi des réactions de fusion nucléaire).

En physique des particules, l'énergie nucléaire est l'énergie associée à la force de cohésion des nucléons, la force nucléaire forte (protons et neutrons) au sein du noyau des atomes. Les transformations du noyau libérant cette énergie sont appelées réactions nucléaires. La force nucléaire faible régit les réactions entre particules et neutrinos.

Il y a deux sortes de réactions susceptibles de produire de l'énergie nucléaire :

*La fusion :

La fusion nucléaire est une réaction où deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd. Par exemple un noyau de deutérium et un noyau de tritium s'unissent pour former un noyau d'hélium plus un neutron (Figure 1). La fusion des noyaux légers dégage une énorme quantité d'énergie provenant de l'interaction forte, bien plus importante que la répulsion électrostatique entre les constituants des noyaux légers. Ceci se traduit par un défaut de masse ; le noyau résultant ayant une masse moins élevée que la somme des masses des noyaux d'origine.

Cette réaction n'est cependant possible qu'à des températures très élevées (plusieurs dizaines de millions de degrés) où la matière est à l'état de plasma. Ces conditions sont réunies au sein des étoiles ou lors de l'explosion d'une bombe à fusion nucléaire, qui amorce ainsi l'explosion thermonucléaire (bombe H).

Actuellement, aucun appareillage ne permet de produire de l'énergie en contrôlant les réactions de fusion nucléaire. Des recherches sont en cours afin d'obtenir un plasma sur une durée suffisante, afin que l'énergie de fusion produite soit supérieure à celle investie dans le chauffage des particules. Des recherches sont actuellement menées dans un cadre international afin de développer l'usage civil de l'énergie de fusion nucléaire pour la production électrique [7]

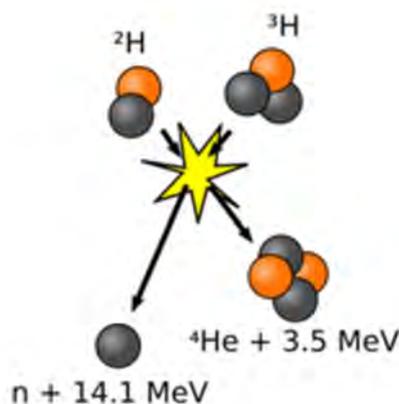


Figure 1:Exemple de fusion nucléaire

*La fission

Lorsqu'un neutron percute le noyau de certains isotopes lourds, il existe une probabilité que le noyau percuté se scinde en deux noyaux plus légers. Cette réaction, qui porte le nom de fission nucléaire, se traduit par un dégagement d'énergie très important (de l'ordre de 200 MeV par

événement, à comparer aux énergies des réactions chimiques, de l'ordre de l'eV). Cette fission s'accompagne de l'émission de plusieurs neutrons qui, dans certaines conditions, percutent d'autres noyaux et provoquent ainsi une réaction en chaîne (Figure 2.)° Dans un réacteur nucléaire, cette réaction en chaîne se déroule dans des conditions stables, à vitesse lente et contrôlée. Dans une bombe, où la matière est placée brusquement très loin de son domaine de stabilité, la réaction se multiplie si rapidement qu'elle conduit à une réaction explosive. L'importance de l'énergie émise lors de la fission provient du fait que l'énergie de liaison par nucléon du noyau initial est plus faible que celle des noyaux produits (environ 7,7 MeV par nucléon pour les éléments lourds, contre 8,8 pour le fer). La plus grande partie de l'énergie se retrouve sous forme d'énergie cinétique des neutrons et des noyaux fils, énergie récupérée sous forme de chaleur dans les réacteurs. D'après le CEA (Le commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), l'énergie produite par 1 kg d'uranium naturel dans un réacteur nucléaire est égale à l'énergie de 10 tonnes équivalent pétrole ¹⁸⁾

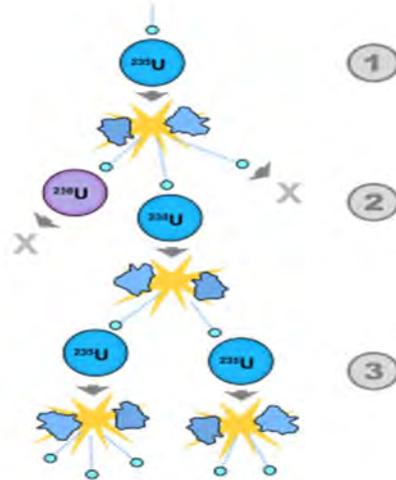


Figure 2: Exemple de fission nucléaire

1.1.2.2 Le charbon

Le charbon est une roche sédimentaire d'origine organique contenant au moins 50% de carbone. Au cours de plusieurs millions d'années, l'accumulation et la sédimentation de débris végétaux dans un environnement de type tourbière provoque une modification graduelle des conditions de température, de pression et d'oxydo-réduction dans la couche de charbon qui conduit, par carbonisation, à la formation de composés de plus en plus riches en carbone : la tourbe (moins de 50 %), le lignite (50 à 60 %), la houille (60 à 90 %) et l'antracite (93 à 97 %). Le charbon couvre 28,9 % des besoins énergétiques mondiaux en 2013, le charbon est actuellement la seconde ressource énergétique de l'humanité, derrière le pétrole (31,1 %), et la première source d'électricité avec 41,3 % de la production en 2013. Près des trois quarts de la consommation mondiale en 2015 sont concentrés sur trois pays : Chine 50 %, Inde 10,6 % et États-Unis 10,3 %.

Les réserves mondiales de charbon sont estimées à 891,5 milliards de tonnes fin 2015, dont 26,6 % aux États-Unis, 17,6 % en Russie et 12,8 % en Chine ¹⁹⁾

Le charbon a été utilisé comme combustible dès le XI^e siècle ; son extraction dans les mines a rendu possible la révolution industrielle au XIX^e siècle.

La combustion du charbon est responsable de 46 % des émissions de CO₂ dues à l'énergie en 2013, contre 34 % pour le pétrole et 20 % pour le gaz naturel. Pour atteindre l'objectif des négociations internationales sur le climat de maintenir la hausse des températures en deçà de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle, il faudrait globalement s'abstenir d'extraire plus de 80 % du charbon disponible dans le sous-sol mondial, d'ici à 2050.

Chapitre1: Généralités sur les sources d'énergies et présentation de la cellule solaire à base de CIGS

Dans son appellation courante, le terme désigne généralement la houille. Autrefois, il était appelé charbon de terre en opposition au charbon de bois.

La production de charbon ne cesse d'augmenter et représente 39% de l'énergie produite dans le monde, soit 250 000 kilos de charbon chaque seconde, soit près de 7,9 milliards de tonnes de charbon par an. Le charbon assure 40 % de la production mondiale d'électricité, taux bien supérieur en Chine (80 %) et en Inde (68 %). En 2013 la production mondiale a été de 7,896 millions de tonnes.

En 2011 la production mondiale a été de 7.678 millions de tonnes (contre 4.677 Mt en 1990). Les principaux producteurs mondiaux ont été la Chine (3.471 Mt en 2011) les États-Unis (1.000 Mt), l'Inde (585 Mt), l'Australie, l'Indonésie et la Russie ^[10]

D'une façon générale, on distingue au niveau mondial trois principaux types de charbon:

*La houille

Elle est une roche carbonée sédimentaire correspondant à une qualité spécifique de charbon, intermédiaire entre le lignite et l'antracite (soit 80 à 90 % de carbone)(Figure 3). De couleur noirâtre, elle provient de la carbonisation d'organismes végétaux et peut donc servir de fossile. Ce combustible est utilisé depuis le XI^e siècle et son extraction dans les mines a rendu possible la révolution industrielle au XIX^e siècle. Depuis, la houille constitue une des principales sources d'énergie des pays industrialisés. L'appellation courante de charbon désigne généralement la houille.



Figure 3: Morceau de houille

*L'antracite :

L'antracite est une roche sédimentaire d'origine organique (Figure 4) C'est une variété de charbon grise, noirâtre et brillante extraite des mines.

Dans le processus (géologique) naturel de formation du charbon, c'est le stade le plus achevé de la houillification ; il contient 92 à 95 % de carbone, ce qui en fait un des charbons les plus riches en carbone et les plus caloriques (cependant, il semblerait que différentes qualités d'antracite soient présentes sur le marché du charbon).^[11]



Figure 4: Morceau d'anthracite

*Le charbon brun:

Le charbon brun a un pouvoir calorifique inférieur à 23.9 GJ/t . Il inclue les lignites, dont le pouvoir calorifique est en deçà de 17.4 GJ/t . La transformation en électricité sur place est à plus de 90%.

1.1.2.3 Le gaz naturel

Il est un mélange gazeux d'hydrogènes et de carbures naturellement présent dans certaines roches poreuses. Il est utilisé comme combustible fossile ou par la carbochimie.

Avec 21,4 % de l'énergie consommée en 2013, il est la troisième source d'énergie la plus utilisée au monde, après le pétrole (31,1 %) et le charbon (28,9 %) ; sa part a fortement progressé elle n'était que de 16 % en 1973.

L'exploitation non-conventionnelle du gaz naturel étant récente, l'étendue de ses réserves est encore assez mal connue. En 2015, selon BP (British Pétroleum), les réserves mondiales prouvées, en hausse de 18,8 % par rapport à 2005 et de 56 % par rapport à 1995, correspondaient à 52,8 ans de production. Elles étaient concentrées pour 42,8 % au Moyen-Orient. L'Iran, la Russie et le Qatar détenaient à eux seuls 48,6 % des réserves mondiales.

L'Agence internationale de l'énergie évalue les émissions mondiales de CO_2 dues au gaz naturel à 6 381 Mt (millions de tonnes) en 2013, en progression de 73,5 % depuis 1990 ; ces émissions représentent 20 % des émissions dues à l'énergie, contre 46 % pour le charbon et 34 % pour le pétrole. Le secteur gazier engendre en outre des émissions de méthane (CH_4), gaz dont le potentiel de réchauffement global est 25 fois plus élevé que celui du CO_2 .^[12]

L'usage du gaz naturel dans l'industrie, les usages domestiques puis la production d'électricité, se développait rapidement depuis les années 1970 et était sur le point de devancer le charbon. Cependant, avec le renchérissement observé depuis le début du XXI^e siècle, les tassements dans la consommation des pays développés, les besoins des pays émergents et les progrès réalisés dans le traitement du charbon, ce dernier tend à retrouver un certain essor.

Pour autant, la production mondiale de gaz naturel a enregistré une croissance de 27 % entre 2005 et 2015. Cette progression tient notamment à l'exploitation récente des gaz non conventionnels. En 2010, les États-Unis sont ainsi devenus grâce à eux les premiers producteurs de gaz naturel, déclassant la Russie. En 2015, les États-Unis ont produit 22 % du total mondial et la Russie 16,1 % ; cette dernière reste néanmoins largement en tête en termes d'exportations, devant le Qatar.

Les principaux consommateurs de gaz naturel sont en 2015 les États-Unis (22,8 %), la Russie (11,2 %), la Chine (5,7 %) et l'Iran (5,5 %). La consommation mondiale a progressé de 25 % entre 2005 et 2015, alors qu'elle a baissé de 28 % au Royaume-Uni, 22 % en Italie et 14 % en Allemagne, mais bondi de 309 % en Chine.^[12, 13]

Deux filières de gaz sont aujourd'hui considérées :

***Le gaz de pétrole liquéfié (GPL):**

Le gaz de pétrole liquéfié, abrégé en GPL (appellation utilisée en France) ou LPG (dans les autres pays francophones, tels que la Belgique et le Luxembourg) est un mélange d'hydrocarbures légers, stocké à l'état liquide et issu du raffinage du pétrole pour 40 % et de traitement du gaz naturel pour 60 %. Les hydrocarbures constituant le GPL, dans son appellation officielle, sont essentiellement le propane et le butane ; le mélange peut contenir jusqu'à 0,5 % d'autres hydrocarbures légers tels que le butadiène ^[13]

***Le gaz naturel pour véhicule (GNV)**

Le gaz naturel pour véhicules (abrégé en GNV) est du gaz naturel utilisé comme carburant automobile. Le gaz naturel est constitué d'environ 97 % de méthane, il s'agit du même gaz que celui distribué en France sur le réseau de GRDF (Gaz Réseau Distribution France) et qui est utilisé par les particuliers pour la cuisine ou le chauffage. Le GNV est généralement stocké sous pression (200 bars) dans des réservoirs spécifiques à l'intérieur du véhicule, mais des essais ont également été faits avec du gaz stocké en phase liquide. Il est aussi possible d'utiliser du méthane produit (dans une moindre mesure) dans des stations de méthanisation (usines de traitement des ordures ménagères, stations d'épuration et digesteurs agricoles) ^[13]

1.1.2.4 Le pétrole

Le pétrole (en latin petroleum, du grec petra, « roche », et du latin oleum, « huile ») est une roche liquide d'origine naturelle, une huile minérale composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures, piégée dans des formations géologiques particulières. L'exploitation de cette source d'énergie fossile et d'hydrocarbures est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides : fioul, gazole, kérosène, essence, GPL, tandis que le naphta produit par le raffinage est à la base de la pétrochimie, dont sont issus un très grand nombre de matériaux usuels : plastiques, textiles, synthétiques, caoutchoucs synthétiques (élastomères), détergents, adhésifs, engrais, cosmétiques, etc., et que les fractions les plus lourdes conduisent aux bitumes, paraffines et lubrifiants. Le pétrole dans son gisement est fréquemment associé à des fractions légères qui se séparent spontanément du liquide à la pression atmosphérique, ainsi que diverses impuretés comme le dioxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, l'eau de formation et des traces métalliques.

Avec 31,1 % de l'énergie primaire consommée en 2013, le pétrole est la source d'énergie la plus utilisée dans le monde devant le gaz naturel (21,4 %) et le charbon (28,9 %) ; sa part a fortement reculé : elle atteignait 46,2 % en 1973.

En 2015, selon BP (British Pétroleum), les réserves mondiales prouvées de pétrole atteignaient 239,4 milliards de tonnes, en progression de 23,5 % par rapport à 2005 et de 51 % par rapport à 1995. Elles représentaient 50,7 années de production au rythme de 2015.

L'Agence internationale de l'énergie évalue les émissions mondiales de CO₂ dues au pétrole à 10 825 Mt (millions de tonnes) en 2013, en progression de 27,3 % depuis 1990 ; ces émissions représentent 34 % des émissions dues à l'énergie, contre 46 % pour le charbon et 20 % pour le gaz naturel. ^[14]

1.1.3 Les énergies renouvelables

Présentement, le plus grand problème à l'utilisation des énergies non renouvelables, c'est leur disponibilité en quantité limitée et leurs effets néfastes sur le plan environnemental, ce qui suscite l'humanité à rechercher de nouvelles sources d'énergie.

Ces sources inépuisables, peu ou pas polluantes, sont : l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie, l'énergie solaire.

Elles présentent aujourd'hui environ 14% de la production mondiale de l'énergie.

1.1.3.1 L'énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

1.1.3.2 L'énergie de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies la « biomasse énergie » est la partie de la biomasse utilisée ou utilisable comme source d'énergie ; soit directement par combustion (ex : bois énergie), soit indirectement après méthanisation (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (agrocarburant). La biomasse peut être toute matière organique d'origine végétale, (micro algues incluses) animale, toute, bactérienne, ou fongique (champignons).

La source de biomasse peut être la nature sauvage et/ou cultivée (agro carburants, agro combustibles). Sa production et combustion ont des coûts environnementaux, mais son utilisation pour produire chaleur et électricité a l'avantage de créer ou entretenir des emplois locaux et pérennes, de l'amont (approvisionnement) à l'aval de la filière (exploitation énergétique), de ne pas être intermittente et de sécuriser le réseau électrique, et à condition de disposer de stocks suffisants, car sa production est souvent très saisonnière et dépendante de contraintes météorologique.

Globalement, on peut utiliser la biomasse de trois façons différentes: en la brûlant, en la faisant pourrir ou en la transformant chimiquement.

*La brûler, c'est l'utiliser comme un combustible de chaudière. On se sert aussi bien des déchets de bois, de récoltes que certains déchets, comme les ordures ménagères, les déchets industriels banals ou certains résidus agricoles.

*En pourrissant, sous l'effet des bactéries, certains déchets putrescibles (comme certaines boues de stations d'épuration des eaux usées ou la fraction organique des déchets ménagers, les épluchures par exemple) produisent du biogaz. Ce mélange de gaz est en majorité composé de méthane, utilisable, une fois épuré, pour alimenter, lui aussi, des chaudières ou des véhicules fonctionnant au GNV.

*En cultivant certaines cultures, comme le colza, les betteraves ou certaines céréales, telles que le blé, peuvent être transformés en biocarburant. L'huile de colza transformée est un excellent substitut au gazole. Alors que la transformation chimique des céréales ou de la betterave peut fournir de l'ETBE, un additif qui, ajouté à l'essence, permet de réduire certaines émissions polluantes de nos voitures. Le Sénégal cultive du colza, de la betterave et du blé mais l'exploitation ne se fait pas sentir par les populations. Cependant, si les autorités exploitaient ces derniers à bon escient, le pays ferait un bon en avant dans le domaine énergétique

1.1.3.3 L'énergie éolienne

Elle est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme

une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable. Le rendement énergétique de même que la puissance développée des éoliennes sont fonction de la vitesse du vent ; dans la plage de fonctionnement de l'éolienne, la puissance est approximativement proportionnelle au cube de cette vitesse. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 3 à 25 m/s. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure. Les éoliennes actuellement commercialisées ont besoin d'un vent dans la plage de 3 à 25 m/s, que ce soit celles d'Enercon, celles d'AREVA pour l'offshore, ou celles d'ALSTOM, pour les éoliennes terrestres comme en offshore. La Chine a émis une référence technique pour les turbines terrestres dans les zones cycloniques, standard applicable depuis février 2016, mais non obligatoire, mis au point par le fabricant chinois Windey, qui a développé des turbines pouvant faire face à des vents extrêmement puissants grâce à leur structure mécanique renforcée et à un algorithme de contrôle qui stoppe les éoliennes au-delà d'une vitesse de 70 m/s. Ces turbines ont ainsi résisté au cyclone Haiku le 8 août 2012, avec des vents de plus de 60 m/s. Comme l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables, l'utilisation massive d'éolien nécessite, soit une énergie d'appoint pour les périodes moins ventées, soit des moyens de stockage de l'énergie produite (batteries, stockage hydraulique ou plus récemment, hydrogène, méthanation ou air comprimé). Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en des formes d'énergies plus utiles, notamment l'énergie mécanique ou l'électricité. L'énergie éolienne ne produit pas de pollution et constitue une forme d'énergie indéfiniment durable. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort ($4,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité. C'est le même principe que celui de notre bonne dynamo de vélo. Il existe deux grandes catégories d'éoliennes: les aérogénérateurs domestiques de faibles puissances qui fournissent en électricité des sites isolés, pour des besoins individuels ou de petits réseaux collectifs, et les éoliennes de grandes puissances raccordées aux réseaux nationaux, dont les plus grandes ont une puissance aujourd'hui de 2500kW^[15]

1.1.3.4 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marins, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

Son principe est semblable à celui de l'éolienne. Simplement, ce n'est plus le vent mais l'énergie mécanique de l'eau qui entraîne la roue d'une turbine^[15] qui à son tour entraîne un alternateur. Ce dernier transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La puissance disponible dépend de deux facteurs: la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. Deux types de solutions sont possibles, selon la configuration du site.

Sur les grands fleuves ou au bas des montagnes, on construit un barrage. L'eau s'engouffre au bas du barrage, passe dans une sorte de galerie au bout de laquelle est située les turbines. Le passage de l'eau fait tourner les hélices qui entraînent un alternateur. C'est ce dernier qui produit le courant.

Sur les petites rivières, on met en place des microcentrales qui ne barrent pas le cours d'eau:

Un petit canal est construit, où une partie de l'eau s'engouffre et va faire tourner les turbines de la centrale au fil de l'eau.

1.1.3.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le Système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).
- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui varie énormément d'un endroit à un autre. Celle-ci est forte à très forte dans les régions océaniques tempérées et subpolaires ainsi que dans les régions équatoriales alors qu'elle est faible à très faible dans les régions arides subtropicales ou polaires.

- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

Globalement la Terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt (soit 170 millions de milliards ou $1,7 \times 10^{17}$ joules par seconde), dont 122 sont absorbés alors que le reste est réfléchi. L'énergie totale absorbée sur une année est donc de 3 850 zetta joules (10^{21} joules, ZJ) ; par comparaison, la photosynthèse capte 3 ZJ, le vent contient 2,2 ZJ, et l'ensemble des usages humains de l'énergie, 0,5 ZJ dont 0,06 ZJ sous forme d'électricité [16]

Le flux maximum d'énergie solaire reçu au sol terrestre se rencontre sous les tropiques secs (ou arides), c'est-à-dire dans les déserts chauds où les conditions météorologiques et géographiques sont optimales : basse latitude, vaste espace, ensoleillement ininterrompu, ciel clair, grande sécheresse de l'air. Le Sahara, le plus grand désert chaud du monde, est la région de la Terre qui reçoit le plus amplement la chaleur et la lumière du Soleil. C'est en effet la contrée du globe où la durée de l'insolation moyenne est la plus élevée (jusqu'à 4 300 h/an soit entre 97 et 98 % du jour), et aussi celle où l'irradiation solaire moyenne est la plus grande, avec plus de 280 W/m² en moyenne sur l'année nuits comprises

Celles qui sont relativement proches de zones de consommation importantes dans les pays développés disposant de la technique requise pour capter l'énergie solaire, voient des réalisations de plus en plus importantes, comme dans le désert des Mojaves (Californie et Arizona) où se trouvent les plus grandes centrales solaires thermodynamiques au monde, notamment la centrale solaire SEGS d'une puissance totale de 354 MW et celle de Solana d'une puissance de 280 MW [16].

Mais cette énergie, comme nous le verrons, n'est pas facile à capter. Les hommes ont développé trois techniques pour utiliser l'énergie du soleil :

- *La plus ancienne : Elle est certainement la plus importante, quoique discrète, utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, surface vitrée orientée vers le Sud, etc.). L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment.

Dans une maison solaire passive, l'apport solaire permet de faire des économies d'énergie importantes.

L'habitat passif désigne un bâtiment dont les dépenses d'énergie de chauffage sont réduites d'environ 80 % par rapport à une maison neuve construite selon les normes allemandes d'isolation thermique de 1995, normes déjà très exigeantes. L'énergie solaire passive permet donc de chauffer, tout ou partie, d'un bâtiment pour un coût proportionnel quasi nul, en tirant parti des conditions d'un site et de son environnement, selon les principes de l'Architecture bioclimatique.

- *Le solaire thermique:

Chapitre 1: Généralités sur les sources d'énergies et présentation de la cellule solaire à base de CIGS

Elle peut être utilisée pour chauffer des bâtiments ou l'eau domestique qui y est utilisée, grâce à des chauffe-eaux solaires. Dans ces cas précis, son usage est qualifié de direct, ce qui signifie qu'il peut également être indirect.

En effet, l'énergie solaire thermique peut aussi être utilisée pour produire de la vapeur d'eau (ou d'un autre liquide) qui peut alors servir, par exemple, à faire tourner un alternateur, et donc à produire de l'énergie électrique. Ce système est notamment utilisé dans les centrales solaires thermiques.

L'énergie solaire thermique se distingue de l'énergie solaire photovoltaïque, qui est obtenue par la conversion du rayonnement solaire directement en électricité.

*Le solaire photovoltaïque:

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine.

Cette énergie n'est cependant pas totalement renouvelable, car la fabrication des panneaux photovoltaïques, leur installation et leur exploitation consomment de l'énergie issue en grande partie de sources non renouvelables ; mais un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qui a été utilisé pour le fabriquer.

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules regroupés forment une installation

solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et le réseau de transport.

En novembre 2015 a été lancée l'Alliance internationale pour l'énergie solaire (ou ISA pour « International solar alliance »), projet porté par Narendra Modi, visant à réunir les états riches en ressources solaires pour coordonner les politiques de développement du solaire thermique et photovoltaïque (formation, développement de standards communs, partage d'expériences, coentreprises...). La cérémonie de lancement, organisée par l'Inde et la France, a eu lieu lors de la COP21 à Paris, avec le soutien du secteur privé selon Engie (société anonyme)

Si cette transformation ne se fait pas sans pertes (le rendement du photovoltaïque est environ trois fois moindre que celui du thermique), elle permet des applications beaucoup plus larges (transport, alimentation de petits appareils, etc.).

L'énergie solaire spécialement semble, a priori, une solution efficace pour remplacer le pétrole.

La production de baril atteint actuellement un pic et les spécialistes pensent qu'elle diminuera pendant les prochaines années. L'Union Européenne fixe à 20% la part des énergies renouvelables en 2020, et 50% en 2040^[17]. La production d'énergie solaire devrait être l'une des plus importantes, car elle présente de nombreux avantages :

-Le soleil envoie chaque année sur la Terre plus de 40000 fois les besoins en énergies fossiles de l'humanité. Autant dire une énergie inépuisable, gratuite et omniprésente.

-L'énergie solaire peut aussi bien produire de la chaleur (solaire thermique), et de l'électricité (solaire photovoltaïque).

-Le coût proportionnel est quasi nul: lorsque le panneau solaire est installé, l'énergie ne coûte rien, mais l'investissement et l'entretien représentent des dépenses certaines.

-Contrairement à d'autres ressources énergétiques, l'énergie solaire est décentralisée. Ce qui explique également pourquoi beaucoup d'endroits isolés en disposent déjà.

Le monde occidental se prépare donc à l'avenir en investissant dans cette énergie renouvelable.

La France développe actuellement un champ de panneaux solaires en Guyane, et octroie des chauffe-eaux solaires aux habitants. En 2025, la Guyane sera énergétiquement indépendante et l'Espagne construit actuellement le plus grand parc de panneaux solaires d'Europe en Andalousie^[17]. Mais qu'en est-il de l'Afrique? Cette énergie devrait être une aubaine pour ce

Chapitre 1: Généralités sur les sources d'énergies et présentation de la cellule solaire à base de CIGS

Continent, qui a l'ardeur du soleil comme une de ses richesses. Mais l'Afrique est aussi le continent qui semble le moins disposé à pouvoir en profiter. Il est encore trop tôt pour savoir si le solaire constitue vraiment une alternative au pétrole, mais une chose est sûre, le soleil est l'énergie de l'avenir et la solution la plus prometteuse pour le futur énergétique, de l'humanité. Comme notre travail est porté sur le CuInGaSe_2 , l'un des matériaux promoteur dans la conversion photovoltaïque, nous allons dans ce qui suit, s'accrocher sur l'énergie photovoltaïque.

1.1.3.6 Energie photovoltaïque

1.1.3.6.1 Histoire de l'énergie photovoltaïque et principes de base de la conversion photovoltaïque

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu. A la différence des autres énergies renouvelables, l'énergie solaire est disponible partout sur la terre. Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial. Celle-ci sera d'autant plus grande et d'autant plus rapide que des méthodes permettant de produire de l'électricité solaire à moindre coût seront utilisées [18, 19].

Les années soixante voient un ralentissement de l'évolution du rendement des cellules au silicium mais des progrès rapides en ce qui concerne les cellules à base de CdS, qui sont au nombre de deux; les cellules Cu_2S -CdS et les cellules CdTe-CdS. En 1973, les rendements record en laboratoire pour le silicium cristallin étaient déjà de 15%. Entre 1973 et 1976 débutèrent aussi des couches minces à base de CuInSe_2 et à base de silicium amorphe. Celles-ci ont rapidement rattrapé les couches minces déjà existantes à base de CdTe et Cu_2S et ensemble ces quatre filières ont franchi la barrière des 10% de rendement vers 1980. Jusqu'au début des années quatre-vingt-dix les trois couches minces restantes ont évolué ensemble jusqu'aux environs de 15%, puis le CuInSe_2 a évolué par ajout de gallium en Cu(In,Ga)Se_2 pour devenir le leader avec un rendement atteignant plus 21% au laboratoire et d'environ 14% sur le marché de l'industrie [19].

1.1.3.6.2 Le soleil

Le soleil est une étoile, la plus proche de la terre; 150 millions de km, le soleil est principalement composé de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium. La fusion thermonucléaire dans son centre libère une énergie énorme sous forme de rayonnements.

A la surface sa température; la photosphère, avoisine les 6000°C et monte à 15 millions de degrés au centre, là où se déroulent les réactions de fusion thermonucléaire et où naissent les photons. L'activité solaire est réglée par un cycle d'environ 11 ans d'un maximum au suivant, lié aux variations de son champ magnétique; 10^4 fois plus puissant que celui de la terre.

1.1.3.6.3 L'absorption du rayonnement solaire

L'optimisation de l'efficacité de la conversion photovoltaïque se base donc sur le spectre solaire. En traversant les différentes couches de notre atmosphère, certaines longueurs d'ondes sont atténuées, voire absorbées par certains composants tels que l'ozone (absorption des rayons U.V) ou les vapeurs d'eau (absorption des rayons infrarouges).

1.1.3.6.4 Conversion du rayonnement

La conversion s'effectue par l'intermédiaire des composants électroniques à base des matériaux semi-conducteurs (cellules solaires) le groupement d'un ensemble des cellules solaires constitue le panneau solaire ou le panneau photovoltaïque.

Une cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif constitué de deux semi-conducteurs de conductions différentes, type p (les trous sont les porteurs majoritaires) et type n (les électrons sont les porteurs majoritaires), il permet de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Les semi-conducteurs candidats pour qu'ils soient les bases des cellules solaires doivent présenter une stabilité physique pour assurer la fiabilité des photopiles au cours du temps et ayant des gaps adaptés pour l'absorption du spectre solaire avec un coefficient d'absorption plus élevé.

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut se résumer en deux étapes :

*Un photon d'énergie $E = h\nu$ pénétrant dans la cellule solaire est absorbé par le matériau semi-conducteur.

*Si l'énergie du photon incident est suffisamment élevée, le photon va pouvoir faire passer un électron de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC) du matériau semi-conducteur et créer ainsi une paire électron-trou. Ces électrons et trous sont séparés par un champ électrique interne (jonction) et collectés entre une grille (face avant) et un contact ohmique réalisé (face arrière) puis débités dans la charge.

1.2 Présentation de la cellule solaire à base du CIGS

De nos jours plusieurs matériaux peuvent être utilisés comme semi-conducteur dans une cellule photovoltaïque électrochimique. Le choix du matériau repose sur divers facteurs, dont sa capacité à absorber les photons provenant des rayons solaires.

Beaucoup de matériaux ont été étudiés dans la littérature. Certains éléments comme le silicium, le germanium et le sélénium sont des semi-conducteurs intrinsèques. Les autres semi-conducteurs (extrinsèques) sont classés selon leur appartenance aux groupes du tableau périodique: III-V, II-VI, IV-VI, etc. Quelques exemples de matériaux déjà utilisés dans les piles solaires sont: CdS, CdSe, CdTe, GaAs, InP, MoSe₂, TiO₂, WSe₂. Les composés ternaires ont également leur place dans ces études, plus particulièrement les matériaux de structure chalcopyrite I-III-VI₂ comme CuInSe₂ et CuGaSe₂.

Dans cette partie, nous présenterons un des matériaux chalcopyrites tels que le Cu(In,Ga)Se₂ qui possède des propriétés particulièrement intéressantes.

1.2.1 Structure d'une cellule à base du CIGS

La configuration la plus célèbre de la cellule solaire à base du CIGS est formée d'une superposition de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat (Figure 5). Ce dernier est généralement une plaque de verre sodocalcique (Soda-Lime Glass,SLG).

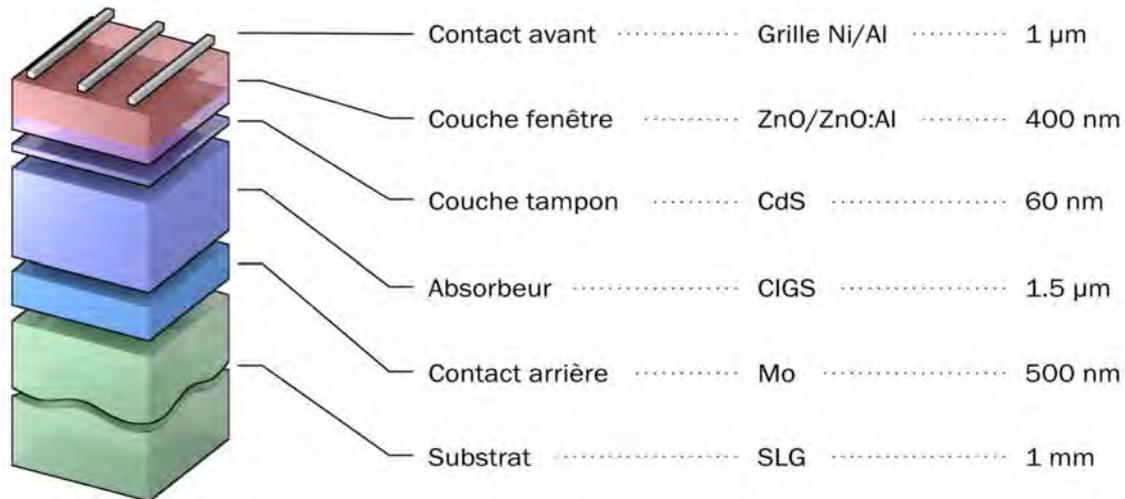


Figure 5: Structure standard d'une cellule à base de CIGS.

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur est 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique. La couche située directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbeur, le CIGS. Il s'agit d'un semi-conducteur de type p qui forme la première partie de l'hétérojonction p-n. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou, son épaisseur est 1 μm à 3 μm .

Les méthodes de dépôt du CIGS sont variées, les plus communes étant la co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de sélénium.

L'hétérojonction p-n avec le CIGS est formée en ajoutant une couche appelée «couche tampon». Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du CIGS lors du dépôt par pulvérisation cathodique des couches suivantes [20]. Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS), c'est le matériau le plus utilisé. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives (Zn(O,S), (Zn,Mg)O, In₂(S,Se)₃, etc.). L'épaisseur typique d'une couche tampon en CdS est d'environ 50 nm. La méthode la plus courante de dépôt du CdS est le bain chimique (Chemical Bath Deposition, CBD). La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre (Window Layer). Cette couche est composée d'un dépôt d'oxyde de zinc (ZnO) et d'un dépôt d'oxyde transparent Conducteur (Transparent Conducting Oxide, TCO). La couche de ZnO est résistive et sert à limiter la formation de court-circuits dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [21]. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium (ZnO:Al) et l'oxyde d'indium et d'étain (Indium Tin Oxide, ITO) déposés par pulvérisation cathodique. Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, ce dernier devant être absorbé dans la couche de CIGS. L'épaisseur de la couche fenêtre est de 300 nm à 500 nm. Le contact avant final est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le nickel sert de couche d'accroche et permet d'éviter

Chapitre 1: Généralités sur les sources d'énergies et présentation de la cellule solaire à base de CIGS
 l'oxydation de l'aluminium liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt.

1.2.2 Propriétés du CIGS

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS dépend fortement des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. Une bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire pour optimiser un dispositif à base de CIGS.

1.2.3 Propriétés électroniques

Le CuInSe_2 et le CuGaSe_2 sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1,035 eV et 1,68 eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande conduction (EC) [22]. Comme nous l'avons vu précédemment, le CIGS est un composé solide de ces deux matériaux. Le ratio $x = [\text{Ga}] / ([\text{In}] + [\text{Ga}])$ détermine le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. La largeur de la bande interdite du CIGS varie en fonction de x entre les valeurs du pur CIS et du pur CIGS, suivant la loi empirique suivante [23]

$$E_g = 1,035 + 0,65x - 0,264x(1 - x) \quad (1-1)$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1,035 eV et 1,68 eV en fonction du taux de gallium. La valeur optimale d' E_g dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur de E_g réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{sc}). Cependant, c'est la valeur de E_g qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1,2 eV [24], ce qui correspond à un taux de Gap proche de 30%. La présence d'un gradient de concentration en Ga dans la couche d'absorbeur permet donc d'obtenir une variation de la bande interdite dans l'épaisseur du matériau.

1.2.4 Propriétés optiques

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couche mince, c'est surtout parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l'intervention de phonons et il en résulte un coefficient d'absorption optique α élevé (comparé à un semi-conducteur à gap indirect comme le silicium). Pour une énergie de photon $h\nu$ donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement:

$$\alpha(h\nu) = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g) \quad (1-2)$$

A : Constante de proportionnalité, qui dépend des états liés à l'absorption du photon et de la nature de la radiation.

ν (Hz) étant la fréquence du photon incident

h étant la constante de Planck ($6,624 \cdot 10^{-34}$ J.s)

Cette relation illustre clairement l'influence du gap sur la plage d'énergies dans laquelle le CIGS absorbe.

On remarque qu'il existe un écart d'un ordre de grandeur entre le Si et le CIS, ce qui montre l'intérêt de ce dernier pour une utilisation en couches minces. Ainsi, une couche de CIGS d'une épaisseur de 1 μm suffit à absorber 95% du spectre solaire pour les photons dont l'énergie est supérieure à E_g .

Chapitre 1: Généralités sur les sources d'énergies et présentation de la cellule solaire à base de CIGS

L'absorption des photons permet la génération des paires électron-trou et donc la génération de courant électrique. Le taux de génération de paires électron-trou dans le matériau absorbeur d'une cellule solaire, à une distance x de l'interface, peut s'écrire [25]:

$$G_{\lambda}(x) = (1 - s)(1 - r(\lambda))(1 - a(\lambda))f(\lambda)\alpha(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)x}d\lambda \quad (1-3)$$

Avec s le facteur d'ombrage des grilles de contact avant de la cellule, r le coefficient de réflexion en face avant, $a(\lambda)$ l'absorption en face avant par l'émetteur, $f(\lambda)$ le flux de photons incident, α le coefficient d'absorption optique vu précédemment et λ la longueur d'onde des photons

1.2.5 Orientation cristalline

Le CIGS employé dans les dispositifs photovoltaïques est une couche mince polycristalline. Dans la majorité des cas, les plans cristallins parallèles à la surface ont des plans (112) et (220/204) (et dans une moindre mesure, les plans (116/312)). On utilise la notation (220/204) car les plans (220) et (204) ne sont pas discernables en diffraction de rayons X pour les compositions de CIGS utilisées dans l'état de l'art (soit $x = ([Ga]/([In] + [Ga])) = 0.3$). En effet, dans le CIS pur la distance interplanaire des plans (220) est inférieure à celle des plans (204). Dans le cas du CIGS pur, c'est l'inverse. La variation de composition du CIGS entraîne une variation des distances interplanaires entre ces deux extrêmes. Ainsi, pour des compositions proches de $x = 0.3$, $d_{220} \approx d_{204}$. La notation des plans (116/312) s'explique de la même manière. L'orientation cristalline du CIGS dépend fortement des conditions dans lesquelles il est élaboré, mais aussi des propriétés du substrat [26, 27]. La plupart des études montrent que l'orientation (220/204) permet d'obtenir de meilleures performances photovoltaïques. Il n'existe actuellement pas d'explication claire de cet effet. Il a été montré qu'une orientation préférentielle en (220/204) permet aux atomes de Cd de mieux diffuser dans le CIGS lors du dépôt de la couche de CdS. Cela peut avoir pour effet de générer une couche d'inversion dans le CIGS (jonction enterrée), améliorant la qualité de la diode [28]. Cependant, cette hypothèse est aussi contestée. D'autres études avancent plus généralement que l'orientation (220/204) permet de former une interface CdS/CIGS avec moins de défauts [28, 29]

1.2.6 Mécanismes de recombinaison

Nous constatons que dans une cellule solaire, des paires électron-trou sont créées par absorption de la lumière. Les recombinaisons de ces paires électron-trou font partie des phénomènes fondamentalement limitant pour la performance des dispositifs photovoltaïques. Un mécanisme de recombinaison donné est caractérisé par un taux de recombinaison R (qui dépend des temps de vie de chaque type de porteurs) et E_i le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque) représentant le nombre de recombinaisons par unité de temps et par unité de volume de matériau semi-conducteur. Il existe trois principaux mécanismes : l'effet Auger, la recombinaison radiative et la recombinaison assistée par un piège dans la bande [30].

1.2.7 Dopage

Les cellules standard du CIGS utilisées sont de type p. Ce dopage est dû à la présence de défauts cristallins générant des états accepteurs (dopage intrinsèque). Dans le cas du CIGS, les niveaux d'énergie théoriques correspondant aux principaux défauts cristallins présents, varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga.

Les niveaux accepteurs sont principalement dus aux lacunes de cuivre (V_{Cu}) et d'indium (V_{In}), ainsi qu'aux substitutions d'indium par le cuivre (Cu_{In}). Cependant le dopage p du CIGS est essentiellement lié aux V_{Cu} pour deux raisons. Premièrement, ils génèrent un niveau accepteur très proche (0.03eV) du maximum de la bande de valence. Deuxièmement, leur énergie de formation est la plus favorable ($\Delta E_f = 0.6eV$). Quant aux défauts générant des niveaux donneurs (In_{Cu} et Cu_{In}), ils possèdent une énergie de formation beaucoup élevée que les V_{Cu} . C'est donc l'abondance de ce dernier défaut dans le CIGS qui est à l'origine de son dopage p [31].

1.2.8 Les joints de grain

Les cellules solaires à base du CIGS utilisés sont polycristallin et possèdent donc des joints de grains. Au niveau de ces interfaces, le CIGS présente divers défauts structurels chargés positivement principalement des lacunes de sélénium V_{Se} . Ces défauts chargés entraînent localement une courbure des bandes (zone de déplétion) et peuvent devenir une source de recombinaisons. Un des principaux intérêts du CIGS est que sa structure électronique aux joints de grains n'est pas particulièrement néfaste pour les performances de la cellule. La première explication vient du fait que les défauts chargés sont passivés par l'apport d'oxygène (exposition à l'air ou recuit) ou de sodium (naturellement présent dans le substrat en verre sodocalcique) dans la couche de CIGS. Cela a pour effet d'inhiber les effets de charge aux joints de grains. Selon un second modèle, le caractère bénin des joints de grain peut être expliqué par la faible teneur en Cu de la surface des grains du CIGS. Cette dernière a été observée de manière précise (tomographie atomique) dans des études récentes. Cela entraîne un abaissement du maximum de la bande de valence par absence d'états électroniques liés aux orbitales d du Cu. Il en résulte une barrière aux trous qui permet de limiter les recombinaisons. Ainsi, il a été démontré que des cellules dont le matériau absorbeur présente de petits grains (donc d'avantage de joints de grains) pouvaient atteindre des rendements équivalents à des cellules basées sur du CIGS à gros grains [32]

1.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.3.1 Avantages

- *Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;
- * Une haute fiabilité; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs
- *Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entre tiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. Généralement la maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel ;
- *La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore olfactive.

1.3.2 Inconvénients

- *La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- * L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- * Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%) ;
- * Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées ;
- *Enfin, lorsque les stockages de l'énergie électriques sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le cout du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

1.4 Conclusion

Ce chapitre est divisé en deux parties, nous a permis en premier lieu de définir les différentes sources d'énergie mondiale; à savoir les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables en considérant que l'énergie solaire est l'énergie du future.

Chapitre1: Généralités sur les sources d'énergies et présentation de la cellule solaire à base de CIGS

En second lieu nous avons présenté une cellule solaire à base de CIGS et montrer aussi les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Cette étude nous a permis de spécifier le semi-conducteur le plus prometteur pour la fabrication des cellules solaires en couches minces, le déséliniure de cuivre et d'indium

CuInSe_2 noté CIS sous sa forme chalcopyrite. Les propriétés physicochimiques de ce matériau peuvent être améliorées par le changement d'une proportion d'indium et de sélénium respectivement par le galium et le soufre pour former des composés quaternaires de type Cu(In,Ga)(Se,S)_2 , ce qui augmente son efficacité. Notre étude portera sur le CuInGaSe_2 . Dans le chapitre qui suit, nous ferons une étude bibliographique sur le régime dynamique fréquentiel.

CHAPITRE 2 :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL

1.1 Introduction

Le régime dynamique fréquentiel est obtenu en excitant la photopile à partir d'une source, lumineuse ou électrique variable ou en modulation de fréquence. Dans ce chapitre nous présentons un certains nombres de travaux importants relatifs aux méthodes de détermination des paramètres de recombinaison des porteurs de charge minoritaires dans la base de quelques photopiles en régime dynamique fréquentiel. Un certains nombres de modèles électriques utilisés pour la détermination de paramètres comme R_s , R_{sh} , et Z vont être présentés.

1.2 Des expressions analytiques précises pour les paramètres du model exponentiel simple de la cellule solaire ^[33]

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

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{\eta V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2-1)$$

Où R_s , R_{sh} , I_{ph} , I_s , V , η et V_T sont respectivement la résistance série, la résistance shunt, le photocourant, le courant de saturation, la tension aux bornes de la charge, le facteur d'idéalité et la tension thermique.

De l'équation (2-1), la caractéristique courant-tension de la cellule solaire est donnée puis deux points de fonctionnement sont considérés :

Le premier lorsque la cellule solaire est en situation de circuit ouvert pour déterminer la

résistance série par l'expression suivante : $R_s = - \left(\frac{\partial V}{\partial I} \right)_{V=V_{co}} \quad (2-2)$

Le second lorsque la cellule est en situation de court-circuit pour la détermination de la

résistance shunt par la relation : $R_{sh} = - \left(\frac{\partial V}{\partial I} \right)_{I=I_{cc}} \quad (2-3)$

Ces deux considérations ont permis d'obtenir des valeurs de résistances série et shunt qui concordent à celles trouvées par d'autres méthodes.

1.3 Mesure des paramètres électriques d'une cellule en arséniure de gallium « GaAs/Ge », par spectroscopie d'impédance ^[34]

Dans cet article, il est proposé une méthode expérimentale de détermination des paramètres électriques. L'étude est faite sur une cellule solaire en Arséniure de Gallium par la méthode spectroscopie d'Impédance.

Les mesures sont réalisées sur une cellule GaAs/Ge de taille (20 x 40 mm), la température de la salle est de $22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. La cellule est polarisée à l'obscurité, la tension de polarisation est comprise entre 0,3V et 0,9V et l'amplitude du signal alternatif est de 10 mV avec une fréquence variant de 1HZ à 60 KHZ.

Le spectre d'impédance obtenu est un demi-cercle (diamètre R_p), permettant de déterminer les paramètres électriques de la cellule (R_s, R_p, C)

Des observations faites sur cette méthode ont permis aux auteurs de dire que lorsque la cellule est en circuit ouvert, les demi-cercles ne sont plus parfaits.

La résistance parallèle R_p qui est un paramètre important de la cellule car étant la combinaison de deux résistances : la résistance dynamique et la résistance shunt R_{sh} . En

Général $R_{sh} \gg R_D$ lorsque ces cellules sont en circuit ouvert, ce qui entraîne que $R_p \approx R_D$.

L'expression de la résistance dynamique est donnée par la relation suivante :

$$R_D = \frac{V_T \cdot \eta}{I} \quad (2-4)$$

V_T la tension thermique

η facteur d'idéalité

I le photocourant de la cellule solaire

1.4 Nouvelle méthode de caractérisation de l'impédance d'une cellule solaire ^[35]

Dans cet article les auteurs nous font part d'une technique de caractérisation d'impédance dynamique d'une cellule solaire par une méthode basée sur la spectroscopie d'impédance.

Pour cette nouvelle méthode de caractérisation d'impédance dynamique, les auteurs utilisent un courant continu modulé par un petit signal carré en lieu et place d'un signal sinusoïdal fréquemment utilisé en spectroscopie d'impédance.

Cette méthode permet de réduire le matériel expérimental, de simplifier en rendant plus accessibles les mesures de l'impédance.

Les mesures sont effectuées sur une cellule en silicium cristallin de surface (10 cm x 10 cm)

Les conditions expérimentales sont :

La température de la cellule est égale à la température ambiante de la salle

La cellule est polarisée à l'obscurité

Les courants et les tensions d'entrée et de sortie de la cellule test peuvent être visualisés par un oscilloscope numérique. Les données sont transférées au PC par l'intermédiaire du port de transmission de données GPIB. L'impédance dynamique de la cellule solaire est calculée sur la base de MATLAB en utilisant la technique de transformée de Fourier rapide (FFT :Fast Fourier Transform).

Dispositif expérimental (Figure 6):

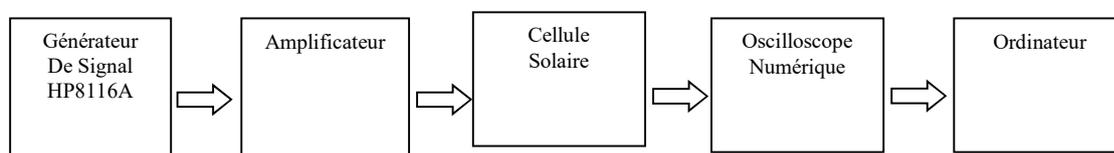


Figure 6: Dispositif expérimental utilisé en spectroscopie d'impédance

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire en régime dynamique est représenté à la (Figure 7):

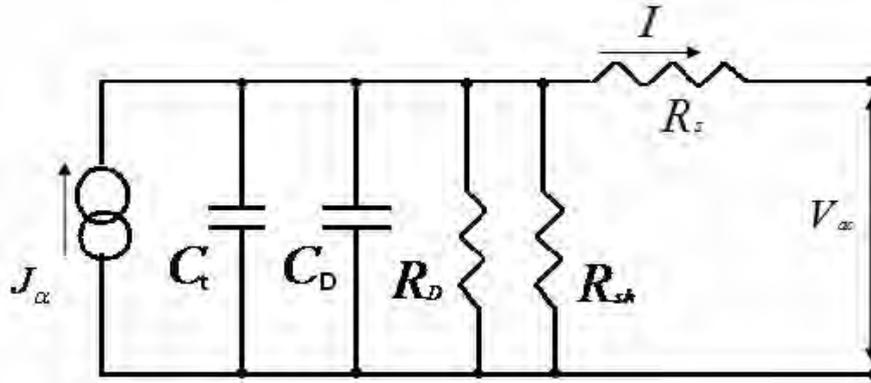


Figure 7: Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

L'impédance dynamique du circuit ci-dessus s'écrit sous la forme suivante :

$$R_{pv} + i \cdot X_{pv} = R_S + \frac{R_D \cdot R_{Sh} \cdot (R_{Sh} + R_D)}{(R_{Sh} + R_D)^2 + (\omega \cdot R_D \cdot R_{Sh} \cdot C)^2} - \frac{i \cdot \omega \cdot (R_{Sh} \cdot R_D)^2 \cdot C}{(R_{Sh} + R_D)^2 + (\omega \cdot R_D \cdot R_{Sh} \cdot C)^2} \quad (2-5)$$

Avec :

R_{pv} étant la composante résistive de l'impédance dynamique

et X_{pv} étant la composante réactive de l'impédance dynamique

Les valeurs de la résistance dynamique obtenues à partir des méthodes de caractérisation de l'impédance dynamique sont consignées dans le Tableau 1 ci-dessous :

TABLEAU 1: Résistance dynamique

Tension (v)	0,2	0,3	0,4
R_{d1} (Ω)	15,53	4,90	1,40
R_{d2} (Ω)	15,53	4,71	1,39

R_{d1} est obtenue à partir de la méthode de détermination qui utilise un courant continu modulé par un petit signal carré.

R_{d2} est obtenue à partir de la méthode de détermination qui utilise un signal sinusoïdal. Cet article montre une nouvelle méthode simple pour mesurer les impédances des cellules solaires en utilisant un signal carré en lieu et place d'un signal sinusoïdal. Les résultats expérimentaux de la nouvelle méthode donnent des valeurs d'impédance comparables à celles des études précédentes. Cette étude compare deux techniques de mesure basées sur le même principe, en utilisant un signal d'entrée sinusoïdal et un signal entrée carré, plutôt qu'une mesure absolue qui dépend-elle de l'exactitude et de la qualité de l'équipement d'essai.

1.5 Impédance dynamique du module pv dépendant de sa tension et de sa fréquence [36]

Cet article présente une méthode de détermination de l'impédance dynamique à partir du modèle électrique équivalent suivant (Figure 8)

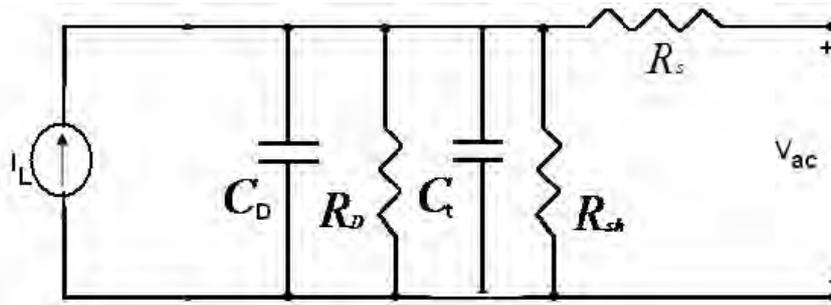


Figure 8:Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Ainsi à partir des représentations de Nyquist et de Bode, les spectres de l'impédance et de la phase pour différentes valeurs de la fréquence sont mis en évidence. L'étude des résistances dynamique et parallèle en fonction de la phototension a été aussi présentée.

1.6 Mesure des paramètres électriques d'une photopile par la méthode de la spectroscopie d'impédances ^[37]

L'auteur de ce document présente une méthode de détermination des paramètres d'une photopile.

Ainsi en utilisant le diagramme de Nyquist, il a représenté les spectres de l'impédance selon quelques modèles électriques de base:

Le Spectre d'impédance d'une résistance pure (R) que nous présentons à la (Figure 9)

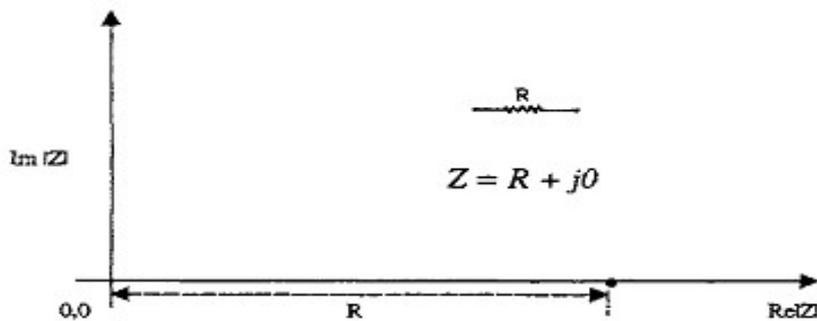


Figure 9:Impédance d'une résistance pure (R)

Le Spectre d'impédance d'une capacité pure (C) que nous présentons à la (Figure 10)

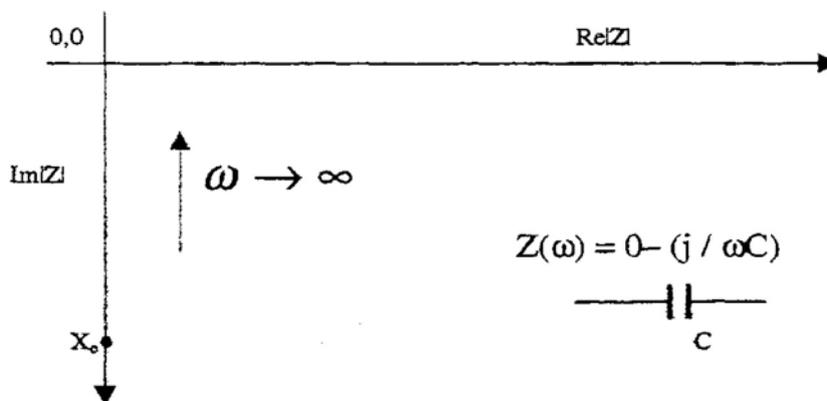


Figure 10: Impédance d'une capacité pure (C)

Le Spectre de l'impédance spectroscopique d'une inductance pure (L) que nous présentons à la(Figure 11)

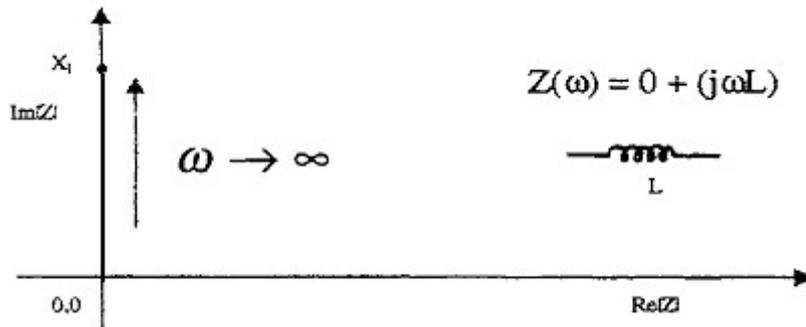


Figure 11: Impédance d'une inductance pure (L)

Le Spectre de l'impédance spectroscopique d'un circuit R-C en série que nous présentons à la (Figure 12)

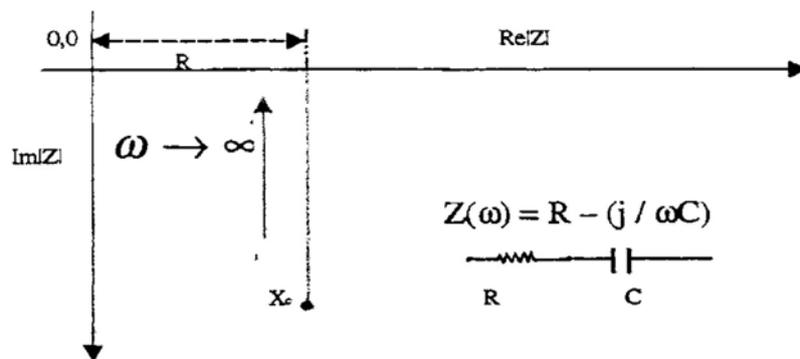


Figure 12: Impédance d'un circuit R-C en série

Le Spectre d'impédance d'un circuit R-L en série que nous exposons à la (Figure 13)

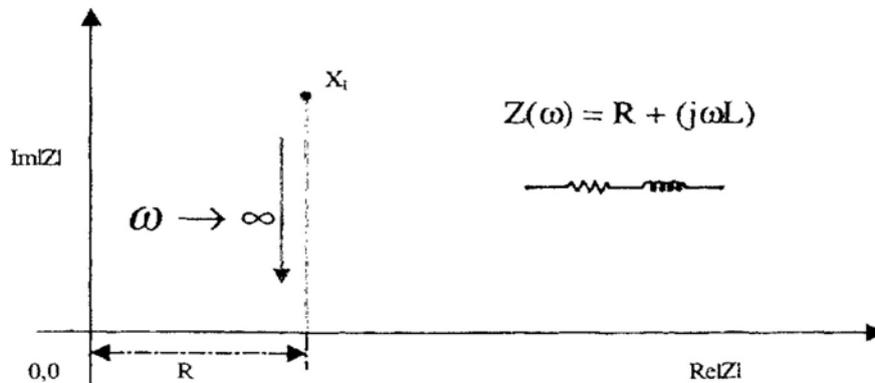


Figure 13: Impédance d'un circuit R-L en série

Le Spectre d'impédance d'un circuit R-C en parallèle que nous montrons à la (Figure 14)

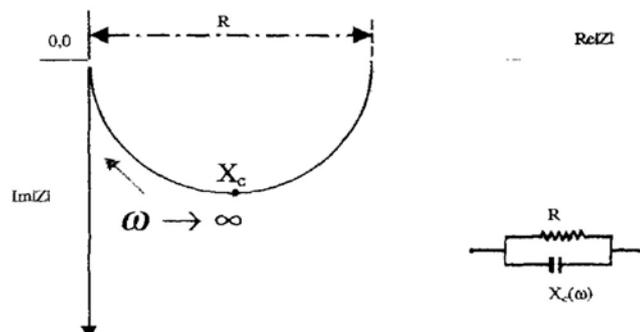


Figure 14: Impédance d'un circuit R-C en parallèle

Le Spectre d'impédance d'un circuit R-L en parallèle que nous reproduisons à la (Figure 15)

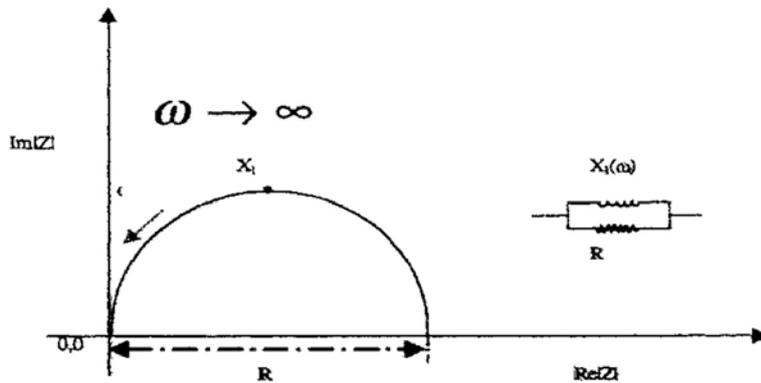


Figure 15: Impédance d'un circuit R-C en parallèle

Après cette étude théorique sur les circuits, l'auteur a déterminé quelques paramètres électriques de la photopile par la méthode de la spectroscopie d'impédance

1.7 Etude comparative des modèles à une et deux diodes en vue d'une simulation précise des photopiles [38]

Dans cet article, afin de mieux décrire les paramètres électriques d'une cellule solaire, il est proposé deux modèles de circuits électriques équivalents : l'un comportant une seule diode caractérisant le courant de diffusion de Shockley et l'autre ayant deux diodes représentant le courant de Shockley et le courant de recombinaison qui est dû à les centres de pièges dans la zone de charge d'espace. Les modèles à une diode (ou à une exponentielle) et à deux diodes (où à deux exponentielles) sont représentés aux (Figure 16) et (Figure 17) respectivement :

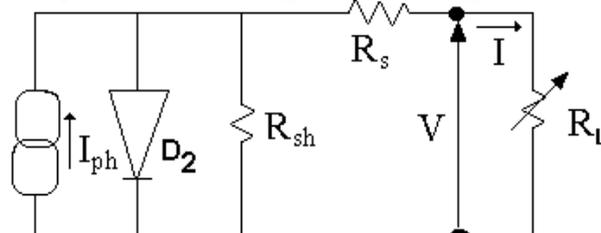


Figure 16: Circuit électrique équivalent du modèle à une diode sous éclairement.

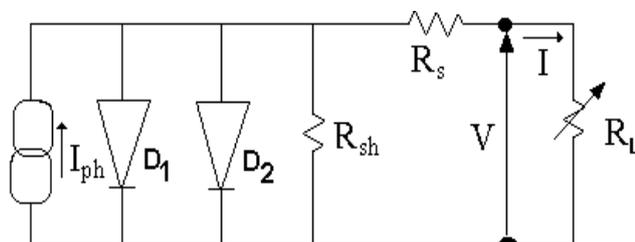


Figure 17: Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes sous éclairement

où I_{ph} et I sont le photocourant et le courant dans le circuit extérieur de la photopile; D_1 , D_2 les diodes ; R_s , R_{sh} et R_L les résistances série, shunt et de charge; V la tension aux bornes de R_L . En appliquant la loi des nœuds, dans le cas général (modèle à deux diodes), on obtient l'expression (2-6) :

$$I = I_{ph} - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{sh}} - I_{s1} \cdot \left\{ \exp \left[q \cdot \frac{V+I \cdot R_s}{K \cdot T} \right] - 1 \right\} - I_{s2} \cdot \left\{ \exp \left[q \cdot \frac{V+I \cdot R_s}{A \cdot K \cdot T} \right] - 1 \right\} \quad 2-6$$

avec I_{s1} et I_{s2} courants de saturation des diodes 1 et 2 respectivement ; A le facteur d'idéalité. Pour déterminer les paramètres I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_{s2} et A, de nombreuses méthodes d'approximation sont proposées. Parmi celles-ci, il y'a les méthodes de :

1.7.1 Méthode de SINGAL :

Dans cette méthode, les différentes approximations faites sont :

+ l'effet R_{sh} est négligeable.

+ $I_{ph} > I_s$ et $I_{sc} = I_{ph}$.

+ $R_s I_{ph} < V_{oc} / 4$.

De l'équation (2-6), il s'en suit :

$$I_s = I_{sc} \exp \left(- \frac{V_{oc}}{V_{th}} \right) \quad (2-7)$$

$$(R_s)_F = V_{oc} \cdot \frac{[FF - (FF)_{R_s=0}]}{\Delta FF \cdot I_{sc}} \quad (2-8)$$

$$(R_s)_V = V_{oc} \cdot \frac{\left[\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)_{R_s=0} \right]}{\Delta V_{mp} \cdot I_{sc}} \quad (2-8)$$

Où

$$(FF)_{R_s=0} = \left(1 - \frac{1}{u} \right) \cdot \left(1 - L \log \frac{u}{v} \right) \quad (2-9)$$

$$\Delta FF = \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc} \cdot R_s} \right) \cdot [FF - (FF)_{R_s=0}] \quad (2-9)$$

$$\Delta FF = - \left[\omega^2 \cdot \frac{(u-2)}{u^3} - 2 \cdot v \cdot \omega \cdot \frac{\left(1 - L \log \frac{u}{v} \right)}{u^3} \right] \quad (2-10)$$

$$\left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)_{R_s=0} = 1 - L \log \frac{u}{v} \quad (2-11)$$

$$\Delta V_{mp} = \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc} \cdot R_s} \right) \cdot \left[\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)_{R_s=0} \right] \quad (2-12)$$

$$\Delta V_{mp} = - \omega \cdot \frac{(u-2)}{u^2} \quad (2-13)$$

avec

$$v = \frac{V_{oc}}{V_{th}} \quad (2-14)$$

$$\omega = v - L \log v \quad (2-15)$$

$$u = \omega + 1 \quad (2-16)$$

Ces différentes données sont utilisées dans le programme afin de trouver les valeurs des paramètres A, R_s et I_{s2}.

1.7.2 Méthode de WARASHINA et USHIROKAWA:

Cette méthode part des conditions aux limites V_{oc} et I_{sc} et des considérations suivantes :

+ l'effet R_{sh} est négligeable.

+ I_{sc} = I_{ph}.

+ $\exp(V_{oc} / V_{th}) \gg \exp(R_s I_{sc} / V_{th})$.

De l'équation (II-6), il s'en suit :

$$I_{s2} = I_{sc} \left\{ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_{th}}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{V_{th}}\right) \right\}^{-1} \quad (2-17)$$

$$R(I) = \left(- \frac{dV}{dI} \right) = R_s + \frac{A \cdot K \cdot T}{q \cdot (I_{sc} - I)} \quad (2-18)$$

Les paramètres A et R_s sont déterminés graphiquement à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la courbe linéaire $R \left(\frac{1}{I_{sc} - I} \right)$ qui se déduit de la courbe expérimentale I(V).

Ceci permet de calculer le paramètre I_{s2} en remplaçant R_s dans l'équation (2-17).

1.7.3 Méthode de ARAUJO et SANCHEZ:

Dans cette méthode, les auteurs utilisent des variables réduites suivantes :

$$v = \frac{V_{oc}}{V_{th}} \quad (2-19)$$

$$V_r = \frac{I_{ph} \cdot R_s}{V_{th}} \quad (2-20)$$

où v_{oc} et V_r sont déterminés à partir des équations fonctions du point de puissance maximum :

$$V_{oc} = 2 \cdot V_r - \frac{a+1}{\text{Log } a} \cdot \text{Log} \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{ph}} \right) - 1 \quad (2-21)$$

$$V_{oc} = \frac{\left\{ a \cdot \text{Log} \left(\frac{a}{a+1} \right) - V_r \cdot \left(1 - a^{-a/(a+1)} \right) \right\}}{\left(1 - \frac{V_{mp}}{V_{oc}} \right)} \quad (2-22)$$

avec

$$a = \frac{V_{oc}}{V_{th}} + 1 - \frac{2 \cdot R_s \cdot I_{ph}}{V_{th}} \quad (2-23)$$

L'intersection des droites représentant les équations (2-21) et (2-22), donne la solution graphique (V_r, V_{oc}) d'où les paramètres A et R_s sont déduits, et que I_{s2} est obtenu à partir de la relation suivante :

$$I_{s2} = I_{ph} \exp \left(- \frac{V_{oc}}{V_{th}} \right) \quad (2-24)$$

Ainsi les résultats obtenus sont comparés à ceux présentés en utilisant le modèle à une exponentielle ou le modèle à deux exponentielles.

1.7.4 Modèle à une exponentielle

Les variations de A et de R_s sont représentées pour des mesures effectuées à la température de 30°C et sous éclairage variable de 0,3AM1 à 1,5AM1. Ici, on note que le résultat obtenu avec la méthode de WARASHINA et USHIROKAWA, est distinct des autres pour les faibles éclairages. Par contre, la méthode de l'analyse numérique donne un résultat similaire à ceux obtenus par les trois méthodes ci-dessus citées.

Pour évaluer l'efficacité d'une méthode, il est judicieux de considérer la moyenne quadratique des distances entre les points expérimentaux et la courbe théorique correspondant aux paramètres du circuit équivalent calculés. Les valeurs relativement fortes de Q (moyenne quadratique) à faible éclairage, dénotent un certain désaccord entre l'expérience et le résultat calculé pour le modèle à une exponentielle. Cet écart peut être attribué soit au fonctionnement de la photopile ou à la méthode de calcul.

Modèle à deux exponentielles

La résolution numérique de l'équation (1-2) par CHARLES et AL, permet d'obtenir cinq paramètres et on peut noter que la valeur de la résistance R_s ne semble pas varier avec l'éclairage, ni aussi I_{s1} et I_{s2} . Les valeurs obtenues par la moyenne quadratique (Q) sont plus faibles que celles du modèle à une exponentielle : elles se rapprochent des points théoriques de l'équation à deux exponentielles. Ainsi, le fonctionnement de la photopile met en œuvre un courant de diffusion et un courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace.

Différentes méthodes d'approximation de calculs des paramètres électriques d'une photopile, sont présentées après avoir proposé deux modèles de circuits électriques équivalents (modèle à une exponentielle ou à deux exponentielles). Les mesures théoriques et expérimentales ont une très large gamme de différence pour le modèle à une exponentielle, par contre pour le modèle à deux exponentielles, les mesures se rapprochent. Ceci permet de dire que le modèle à deux exponentielles décrit mieux le fonctionnement réel de la photopile au silicium.

1.8 Vitesses de recombinaisons intrinsèques d'une photopile monofaciale à jonction horizontale et a une dimension ^[39, 40]

Dans le but de contrôler la qualité des vitesses de recombinaison intrinsèque caractérisant certains phénomènes combinatoires des porteurs minoritaires en excès au niveau des interfaces et des surfaces des photopiles à base du CIGS, des études pertinentes ont été faites.

Ces études ont menées à la détermination des expressions des vitesses de recombinaisons en régimes dynamique fréquentiel en éclairage monochromatique.

Lorsqu'on éclaire la photopile monofaciale avec une lumière monochromatique en modulation de fréquence :

L'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base en régime dynamique fréquentiel est de la forme:

$$\frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x,t)}{L(\omega)^2} = -\frac{G(x,t)}{D(\omega)} + \frac{\partial \delta(x,t)}{D \partial t} \quad (2-26)$$

$\delta(x, t)$ et $G(x, t)$ sont respectivement la densité et le taux de génération des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur x et du facteur temporel t. Leurs expressions sont

$$\delta(x,t) = \delta(x) \cdot \exp(i\omega t) \quad (2-27)$$

$$G(x,t) = g(x) \cdot \exp(i\omega t) \quad (2-28)$$

$\delta(x)$ et $g(x)$ sont les composantes spatiales respectives de la densité et du taux de génération.

Le taux de génération des paires électrons-trous par longueur d'onde est égal au taux de disparition des photons dans le matériau ^[41, 42].

Eclairage par la face avant :

$$g_1(x) = \phi(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad (2-29)$$

Avec :

$\phi(\lambda)$: Le flux incident monochromatique

$\alpha(\lambda)$: Le coefficient d'absorption monochromatique

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion monochromatique

$L(\omega)$ et $D(\omega)$ sont respectivement la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion complexe fonction de la fréquence angulaire, données par les relations suivantes [41]:

$$L(\omega) = \sqrt{\tau \cdot D_0} \cdot \sqrt{\frac{1 - i\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (2-30)$$

et

$$D(\omega) = D_0 \left[\frac{1 + \omega^2\tau^2}{(1 - \omega^2\tau^2)^2 + (2\omega\tau)^2} \times (1 - i\omega\tau) \right] \quad (2-31)$$

L_0 et D_0 représentent respectivement la longueur de diffusion intrinsèque et le coefficient de diffusion intrinsèque. L'expression de D_0 est donnée par la formule d'Einstein[43]:

$$D_0 = \mu \cdot \frac{K_b \cdot T}{q} \quad (2-32)$$

Avec μ qui représente la mobilité du matériau, K_b la constante de Boltzmann, T la température de la cellule et q la charge élémentaire de l'électron.

Selon l'éclairement par la face avant, le taux de génération est donné comme suit :

$$g_1(x) = \phi(\lambda)\alpha(\lambda)(1 - R(\lambda)) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad (2-33)$$

L'équation (2-26) est une équation différentielle du second degré avec second membre dont la solution, peut être mise sous la forme :

Eclairement par la face avant :

$$\delta_1(x) = A_1 \cdot \cosh\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) + B_1 \cdot \sinh\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) - \frac{L(\omega)^2 \cdot \phi(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda))}{D(\omega)^2 \cdot [L(\omega)^2 \cdot \alpha(\lambda)^2 - 1]} \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad (2-34)$$

Les constantes A_1 et B_1 sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes:

A la jonction ($x = 0$) :

$$\left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{Sf}{D} \cdot \delta(0) \quad (2-35)$$

Sf désigne la vitesse de recombinaison des porteurs à la jonction et traduit le flux des porteurs qui traversent la jonction.

A la face arrière ($x = H$) :

$$\left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=H} = \frac{-Sb}{D} \cdot \delta(H) \quad (2-35)$$

Sb désigne la vitesse de recombinaison des porteurs à la face arrière et traduit la manière dont les porteurs sont perdus au niveau de l'interface arrière de la photopile.

Le coefficient et la longueur de diffusion varient en fonction de la fréquence de modulation pour une durée de vie moyenne des porteurs minoritaires supposée constante, en régime dynamique fréquentiel. Ainsi, les expressions des vitesses de recombinaison intrinsèques à la jonction et à la face arrière qui varient en fonction de la fréquence de modulation sont données par les relations qui suivent dans 2.8.1.

1.8.1 Vitesse de recombinaison a la face arriere

Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction $S_f (\geq 10^4 \text{ cm.s}^{-1})$, la densité de courant présente un gradient nul, on peut écrire:

$$\left. \frac{\partial J_{ph}}{\partial S_f} \right|_{S_b \rightarrow \infty} = 0 \quad (2-35)$$

La résolution de l'équation (2-35) pour un éclairage par la face avant donne le résultat suivant :

$$S_b = \frac{D}{L} \cdot \frac{L\alpha(\lambda).ch\left(\frac{H}{L}\right) - L.\alpha(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda).H) - sh\left(\frac{H}{L}\right)}{ch\left(\frac{H}{L}\right) - L.\alpha(\lambda).sh\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-\alpha(\lambda).H)} \quad (2-36)$$

1.8.2 Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

Pour des grandes valeurs de la vitesse de recombinaison des porteurs de charge en face arriere de la photopile ($S_b \geq 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$), la densité de photocourant présente un gradient nul c'est-à-dire :

$$\left. \frac{\partial J_{ph}}{\partial S_b} \right|_{S_f \rightarrow \infty} = 0 \quad (2-37)$$

La résolution de l'équation (2-37) pour un éclairage par la face avant donne le résultat suivant :

$$S_f 0 = \frac{D}{L} \cdot \left[\frac{L\alpha(\lambda) - [L\alpha(\lambda)ch\left(\frac{H}{L}\right) + sh\left(\frac{H}{L}\right)]\exp(-\alpha(\lambda))}{L\alpha(\lambda)sh\left(\frac{H}{L}\right)\exp(-\alpha(\lambda)).H + ch\left(\frac{H}{L}\right)\exp(-\alpha(\lambda)) - 1} \right] \quad (2-38)$$

La vitesse de recombinaison intrinsèque traduit une augmentation de la vitesse en fonction de la fréquence de modulation de l'éclairage. Cela suppose qu'il y'a une recombinaison très importante des porteurs minoritaires en excès à la jonction et à la face arriere de la photopile. Nous estimons que, l'effet de la fréquence de modulation sur la photopile réduit la performance de la photopile.

1.9 Conclusion

L'étude bibliographique que nous venons de faire, nous présente des techniques de caractérisation de l'impédance dynamique d'une cellule solaire basées sur la méthode de la spectroscopie d'impédance ou en utilisant un courant continu modulé par un signal carré faible. Par contre, l'influence de la longueur d'onde ou de la fréquence sur certains paramètres électriques et de recombinaison tels que: la capacité de transition, l'impédance, la résistance série, la résistance shunt n'ont pas été déterminés. Dans le chapitre qui suit, notre étude portera sur la détermination quelques paramètres électriques, à montrer l'influence de la fréquence de modulation et de la longueur d'onde sur ces paramètres électriques

CHAPITRE 3 :

ETUDE THEORIQUE DE LA PHOTOPILE MONOFACIALE A BASE DE CIGS SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL.

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons nous focaliser sur l'étude technique des paramètres électriques et de recombinaisons d'une cellule solaire bifaciale au CIGS de type $n^+ - p - p^+$ en régime dynamique fréquentiel sous éclairage monochromatique.

L'étude se subdivisera en trois parties :

D'abord, nous établirons les équations régissant la diffusion des porteurs en excès générés dans la base lorsque la face avant est éclairée par une lumière monochromatique en régime dynamique fréquentiel.

Ensuite, nous étudierons la densité de photocourant et de la phototension lorsque la face avant est éclairée par une lumière monochromatique

Enfin, après avoir résolu l'équation de continuité de la densité des porteurs minoritaires photogénérés, nous déterminerons les paramètres électriques et les paramètres de recombinaisons intrinsèques de la photopile en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence de modulation.

1.1.1 Présentation de la photopile monofaciale à jonction horizontale à base de CIGS

1.1.2 Description d'une photopile monofaciale à base de CIGS

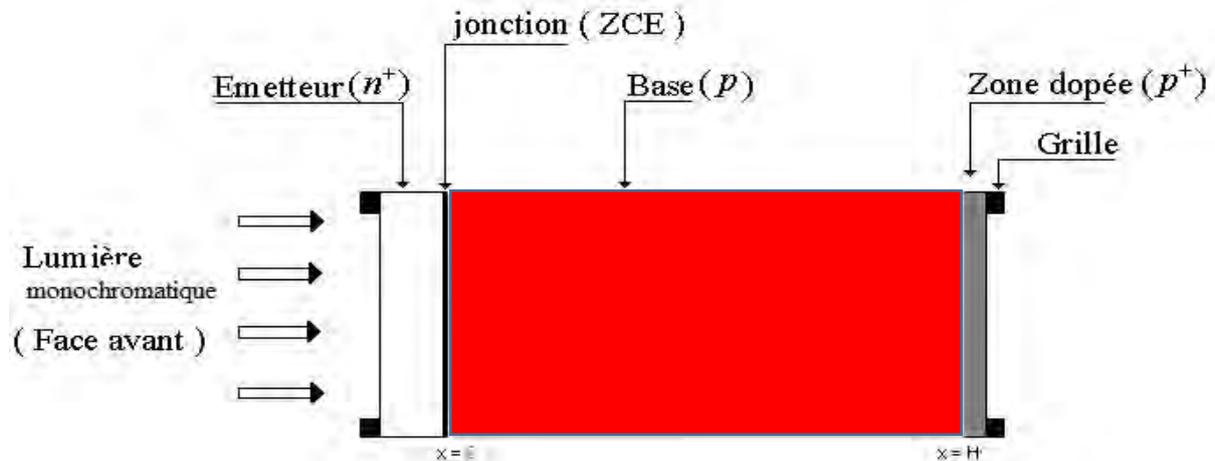


Figure 18: Structure d'une photopile monofaciale à base de CIGS de type $n^+ - p - p^+$

Cette photopile monofaciale au CIGS représentée à la (Figure 18) est composée de quatre parties: l'émetteur, la base, la jonction (ou zone de charge d'espace) et la zone arrière de la base.

- L'émetteur de type n^+ : l'épaisseur e est faible ($0.46 \mu\text{m}$), il est fortement dopée en atomes donneurs (10^{15} atomes par cm^3) et recouverte d'une grille métallique qui permet de collecter les charges électriques photogénérées. Cette partie de la cellule est aussi appelée face avant de la photopile et peut recevoir de la lumière incidente.

- La base de type p : Cette partie est relativement peu dopée (10^{15} atomes par cm^3) en atomes accepteurs. Mais son épaisseur est beaucoup plus importante que celle de l'émetteur. Elle peut

s'élever jusqu'à 3 μm . Etant de type p, cette partie de la structure présente un défaut d'électrons (porteurs minoritaires). L'étude caractéristique de la cellule portera essentiellement sur cette partie qui est la zone de prédominance des phénomènes d'absorption, de génération, de recombinaison et de diffusion.

- La jonction émetteur-base (ou zone de charge d'espace):

Lorsqu'on met en contact les deux semi-conducteurs dopés différemment (émetteur de type n et base de type p) alors on obtient une jonction où règne un champ électrique très intense. Ce champ permet la séparation des paires électron-trou qui arrivent à la jonction.

De ce fait, un rayon lumineux qui frappe la cellule peut pénétrer dans le cristal à travers la grille collectrice et provoquer l'apparition d'une tension électrique autour de la jonction, si le rayon possède une énergie suffisante.

-La zone arrière de la base de type P^+ : c'est la zone située à la face arrière de la base, elle est constituée de molybdène. Cela induit l'existence d'un champ électrique arrière qui permet de renvoyer vers l'interface émetteur-base les porteurs minoritaires générés près de la face arrière [44, 45]

Pour relier la cellule à une charge extérieure c'est-à-dire pour la collecte du courant résultant de l'absorption de la lumière (des photons), des électrodes sous forme de grilles métalliques sont déposées par sérigraphie sur les deux faces avant et arrière servant de contacts électriques. Pour améliorer les performances de la cellule solaire ces grilles doivent laisser passer le maximum de flux lumineux incident. C'est la cause pour laquelle une couche d'anti-reflet est déposée sur ces deux électrodes pour augmenter la quantité de lumière absorbée par la cellule. Dans le cadre de notre étude, nous ferons les approximations suivantes :

* la contribution de l'émetteur au photocourant sera négligée par rapport à celle de la base [46]
 * le champ cristallin sera négligé au niveau de la base de la photopile, seul le champ électrique à la jonction sera pris en compte.

* On va utiliser un modèle mathématique unidimensionnel, la jonction de la photopile sera prise comme origine ($x = 0$).

Il y a création de paires électron-trou dans la base, lorsque la photopile est éclairée suffisamment. La distribution des porteurs charge minoritaires photogénérées (électrons) dans la base est régie par une équation de continuité.

1.2 Densité des porteurs minoritaires générés dans la base de la photopile à base du CIGS par une lumière monochromatique en modulation de fréquence

1.2.1 Equation de continuité en régime dynamique fréquentiel

Des paires électron-trou sont générés aussi bien dans la jonction, au niveau de l'émetteur et dans la base de la photopile excitée.

En tenant compte des phénomènes d'absorption, 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 est de la forme:

$$D \cdot \frac{\partial^2 \delta_n(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta_n(x,t)}{\tau} = -G_n(x,t) + \frac{\partial \delta_n(x,t)}{\partial t} \quad (3-1)$$

Où

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

$$\delta_n(x,t) = \delta_n(x) \exp(i\omega t) \quad (3-2)$$

avec $\delta_n(x)$ la composante spatiale et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle.

* $G_n(x,t)$ est le taux de génération [41, 42] donné par l'expression :

$$G_n(x,t) = g_n(x) \exp(i\omega t) \quad (3-3)$$

avec $g_n(x)$ la composante spatiale et $e^{i\omega t}$ la composante temporelle. On a :

$$g_n(x) = \alpha(\lambda) \phi(\lambda) (1-R) \left[k_1 e^{-\alpha x} + k_2 e^{-\alpha(H-x)} \right] \quad (3-4)$$

n , k_1 et k_2 symboles du mode d'éclairage : $n = 1, k_1=1$ et $k_2=0$; $n = 2, k_1=0$ et $k_2=1$; $n = 3, k_1=1$ et $k_2=1$ pour un éclairage respectif de la face avant, de la face arrière et simultanément des deux faces de la photopile.

$\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ ; $\phi(\lambda)$ le flux incident monochromatique ; $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du matériau à la longueur d'onde λ ; H l'épaisseur de la photopile.

D est le coefficient de diffusion

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

Posons :

$$L^2 = \tau D \quad (3-5)$$

et

$$\frac{1}{L(\omega)^2} = \frac{1}{L^2} \times (i\omega\tau + 1) \quad (3-6)$$

où $L(\omega)$ est la longueur de diffusion complexe

En introduisant les équations (3-2) et (3-4) dans (3-1) nous obtenons l'équation (3-7):

$$\frac{\partial^2 \delta_n(x)}{\partial x^2} - \frac{1}{L(\omega)^2} \cdot \delta_n(x) = - \frac{g_n(x)}{D} \quad (3-7)$$

1.2.2 Solution de l'équation de continuité et conditions aux limites

1.2.2.1 Solution de l'équation de continuité

La solution générale de l'équation (3-7) s'écrit sous la forme :

$$\delta_n(x) = \delta_{1n}(x) + \delta_{2n}(x) \quad (3-8)$$

$\delta_{1n}(x)$ est la solution particulière de l'équation avec second membre et $\delta_{2n}(x)$ la solution générale de l'équation sans second membre.

1.2.2.2 Solution particulière de l'équation avec second membre

$$\delta_{1n}(x) = K \cdot \exp(k_1 e^{-\alpha x} + k_2 e^{-\alpha(H-x)}) \quad (3-9)$$

En remplaçant (3-9) dans (3-7) on obtient une équation qui permet de calculer K .

On trouve :

$$K = \frac{-\alpha(\lambda) \cdot \phi(\lambda) (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \quad (3-10)$$

$$\delta_{1n}(x) = \frac{-\alpha(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot (1-R) \cdot L^2}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \cdot \exp(k_1 e^{-\alpha x} + k_2 e^{-\alpha(H-x)}) \quad (3-11)$$

1.2.2.3 Solution générale de l'équation sans second membre

$$\delta_{2n}(x) = A_n \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_n \sinh\left(\frac{x}{L}\right) \quad (3-12)$$

Expression de la densité des porteurs de charges selon le mode d'éclairage est donnée par la relation (3-13)

$$\delta_n(x) = A_n \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B_n \sinh\left(\frac{x}{L}\right) - \frac{\alpha \cdot (\lambda) \phi(\lambda) \cdot (1-R) \cdot L^2 \cdot \exp(k_1 e^{-\alpha x} + k_2 e^{-\alpha(H-x)})}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1)} \quad (3-13)$$

1.2.2.4 Conditions aux limites

1.1 Les expressions des coefficients A_n et B_n sont déterminées en utilisant les conditions aux limites suivantes [39, 40]:

à la jonction ($x = 0$):

$$\frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{Sf_n}{D} \delta_n(0) \quad (3-14)$$

à la face arrière de la base ($x = H$):

$$\frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x} \Big|_{x=H} = -\frac{Sb_n}{D} \delta_n(H) \quad (3-15)$$

Sf_n et Sb_n désignent respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction et à la face arrière de la base.

1.2 Densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base.

La résolution de l'équation (3-13) donne l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur x dans la base et pour un éclairage par la face avant de la photopile. Avec les conditions aux limites des équations (3-14) et (3-15), on détermine les coefficients A_1 et B_1 correspondant à un éclairage par la face avant. Pour cela, on obtient un système de deux équations à deux inconnues A_1 et B_1 . La résolution de ce système conduit aux expressions suivantes :

$$A_1 = \frac{\alpha \cdot (\lambda) \phi(\lambda) \cdot (1-R) \cdot L^3 \left\{ D \cdot (Sb_n - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H) + (Sf_n + \alpha \cdot D) \left[D \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot Sb_n \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \right\}}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1) \left[L \cdot D \cdot (Sb_n + Sf_n) \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + Sf_n \cdot Sb_n \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \quad (3-16)$$

$$B_1 = \frac{\alpha \cdot (\lambda) \phi(\lambda) \cdot (1-R) \cdot L^3 \left\{ L \cdot Sf_n \cdot (Sb_n - \alpha \cdot D) \cdot \exp(-\alpha \cdot H) - (Sf_n + \alpha \cdot D) \left[D \cdot \sinh\left(\frac{H}{L}\right) + L \cdot Sb_n \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) \right] \right\}}{D \cdot (\alpha^2 \cdot L^2 - 1) \left[L \cdot D \cdot (Sb_n + Sf_n) \cdot \cosh\left(\frac{H}{L}\right) + (D^2 + Sf_n \cdot Sb_n \cdot L^2) \sinh\left(\frac{H}{L}\right) \right]} \quad (3-17)$$

En mettant les coefficients A_1 et B_1 dans l'équation (3.-13), on obtient l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès qui dépend de la profondeur x dans la base, des vitesses de recombinaison à la jonction Sf_1 et en face arrière Sb_1 , de la longueur d'onde λ et de la pulsation ω .

1.2.1 Etude de la densité des porteurs de charge minoritaires

Nous représentons aux quatre figures 19,20,21 et 22 la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur x dans la base pour des longueurs d'ondes du visible et de l'infrarouge respectivement en circuit ouvert et en court-circuit.

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

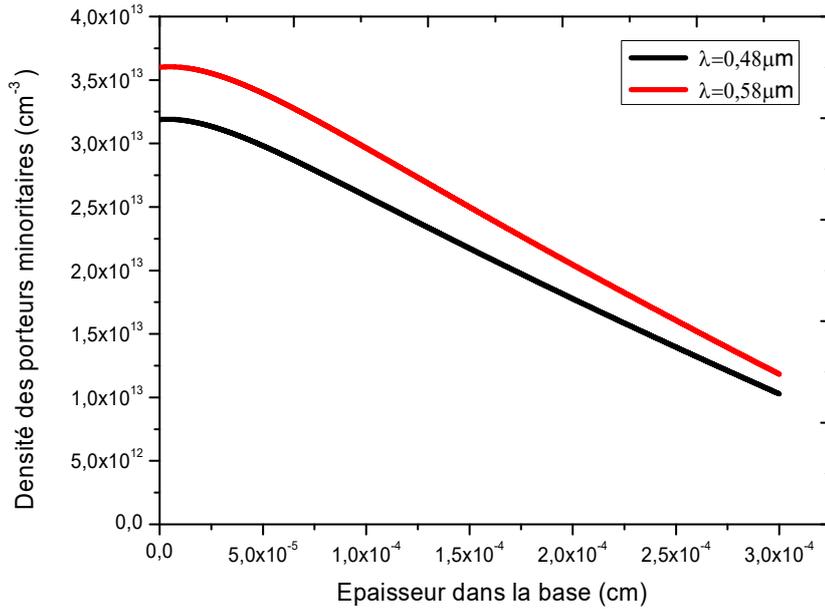


Figure 19: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d'onde du visible. $S_f = 10 \text{ cm.s}^{-1}$ (Circuit ouvert) ; $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

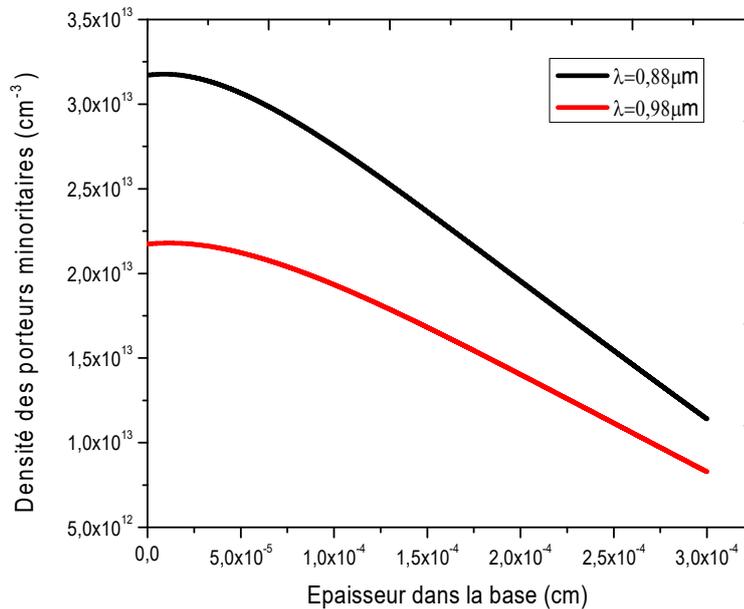


Figure 20: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d'onde de l'infrarouge. $S_f = 10 \text{ cm.s}^{-1}$ (Circuit ouvert) ; $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

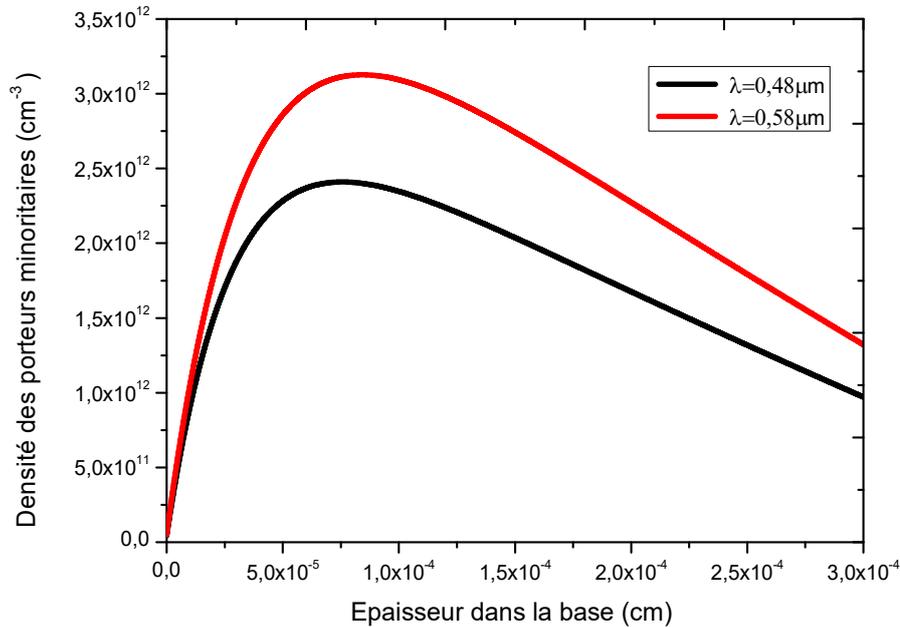


Figure 21: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d'onde du visible. $S_f = 6.10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ (court-circuit) ; $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

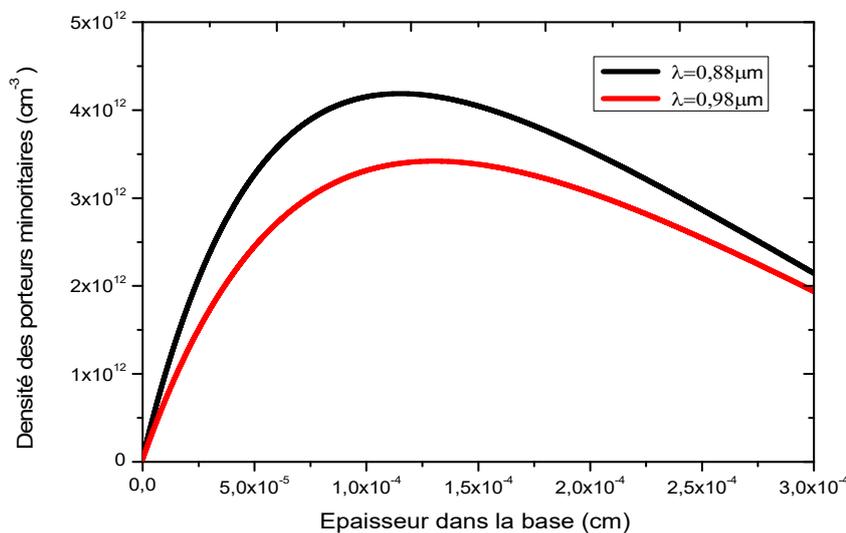


Figure 22: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d'onde de l'infrarouge. $S_f = 6.10^6 \text{ cm.s}^{-1}$ (court-circuit) ; $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

Aux (Figures 19 et 20), toutes les courbes débutent par un maximum puis décroissent progressivement. Le maximum de densité correspond à un gradient des porteurs nul (il n'y a donc pas de passage d'électron). Ensuite cette densité décroît avec la profondeur x dans la base. De ce fait, les porteurs ne peuvent pas traverser la jonction pour produire un photocourant. Ils

vont se recombinaison. Cette décroissance ou encore le gradient négatif correspond aux recombinaisons des porteurs minoritaires dans la base [47].

Aux (Figures 21 et 22) pour une longueur d'onde donnée, nous constatons deux paliers :
-au premier palier, la densité des porteurs minoritaires augmente avec l'épaisseur dans la base jusqu'à un maximum, ce qui correspond à la traversée des porteurs de charge minoritaires à la jonction pour participer à la génération du photocourant [48]

-au deuxième palier, la densité des porteurs minoritaires diminue avec l'épaisseur dans la base, ce qui correspond aux recombinaisons en surface et en volume des porteurs qui ne traversent pas la jonction [48].

Le module de la densité des porteurs de charge minoritaires en court-circuit comme en circuit-ouvert augmente avec la longueur d'onde.

L'augmentation du module de la densité correspond à une augmentation des porteurs générés dans la base puisque l'absorption diminue quand la longueur d'onde augmente [49].

On voit également que pour les faibles valeurs de la longueur d'onde (λ), l'absorption se fait près de la jonction tandis que pour les grandes valeurs de longueur d'onde, l'absorption se déplace en profondeur. Les allures obtenues aux figures 19, 20, 21 et 22 sont dues au fait que le CIGS à une épaisseur réduite de l'ordre du micromètre [50]

1.2.2 Profil du module de la densité relative des porteurs de charge photogénérées dans la base

Pour appréhender l'impact de la vitesse de recombinaison à la jonction, nous traçons les densités relatives en fonction de la profondeur de la base pour un éclairage par la face avant de la photopile.

Aux (Figure 23) et (Figure 24), nous représentons la densité relative des porteurs de charges minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de longueur d'onde respectivement en situation de circuit ouvert et en court-circuit :

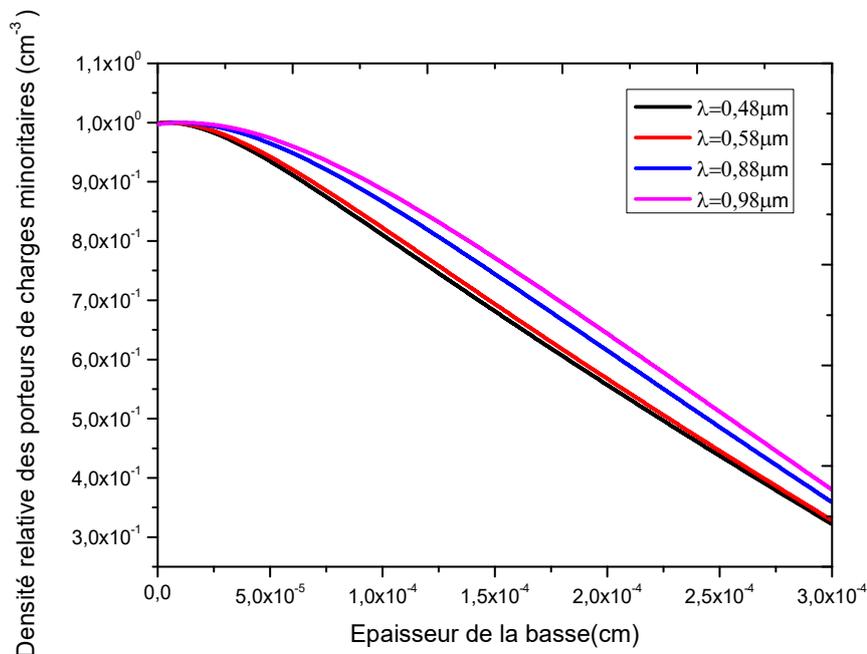


Figure 23: Profil de la densité relative des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $S_f = 10\text{cm.s}^{-1}$ (Circuit ouvert) ; $\omega = 10^5\text{rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4\text{cm.s}^{-1}$

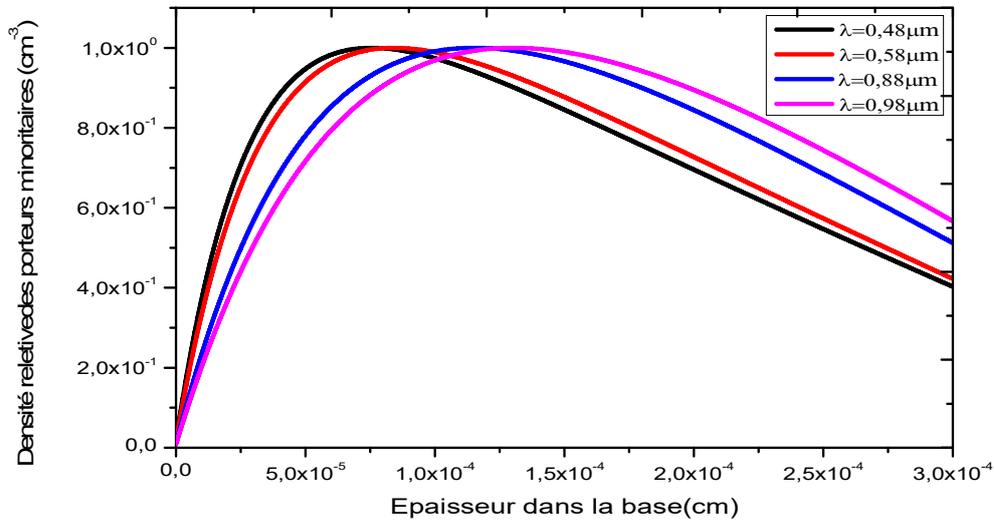


Figure 24: Profil de la densité relative des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $S_f = 6.10^6 \text{cm.s}^{-1}$ (Court-circuit) ; $\omega = 10^5 \text{rad.s}^{-1}$; $S_b = 410^4 \text{cm.s}^{-1}$

Aux figures 23 et 24, l'épaisseur de la cellule où le module de la densité des porteurs minoritaires est maximal correspond à l'extension de la zone de charge d'espace. On remarque que l'épaisseur de cette dernière s'élargit avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f . Cela est dû au fait que les porteurs sont plus stockés en circuit-ouvert qu'en court-circuit [51].

Pour une valeur de vitesse de recombinaison à la jonction S_f fixe au voisinage du court-circuit (Figure 24) l'élargissement de la zone de charge d'espace est plus important avec les grandes valeurs de la longueur d'onde. Nous pouvons dire que les petites longueurs d'onde offrent une épaisseur de la zone de charge d'espace réduite par rapport aux grandes longueurs d'ondes.

Après avoir étudié l'effet de la longueur d'onde sur la densité des porteurs minoritaires, nous procéderons à l'étude de l'effet de la fréquence.

Nous représentons aux (Figure 25 et 26) le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base de la photopile pour différentes fréquences de modulation, respectivement en situation circuit ouvert et en court-circuit

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

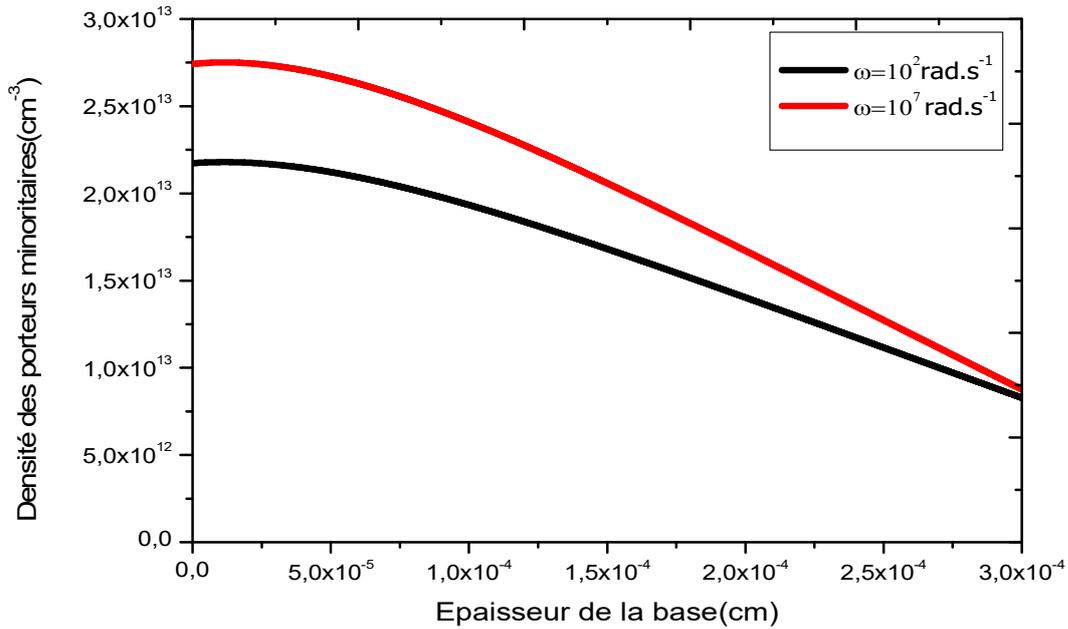


Figure 25: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes fréquences de modulation $\lambda = 0,98\mu\text{m}$; $S_f = 10\text{cm.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4\text{cm.s}^{-1}$, (Circuit ouvert)

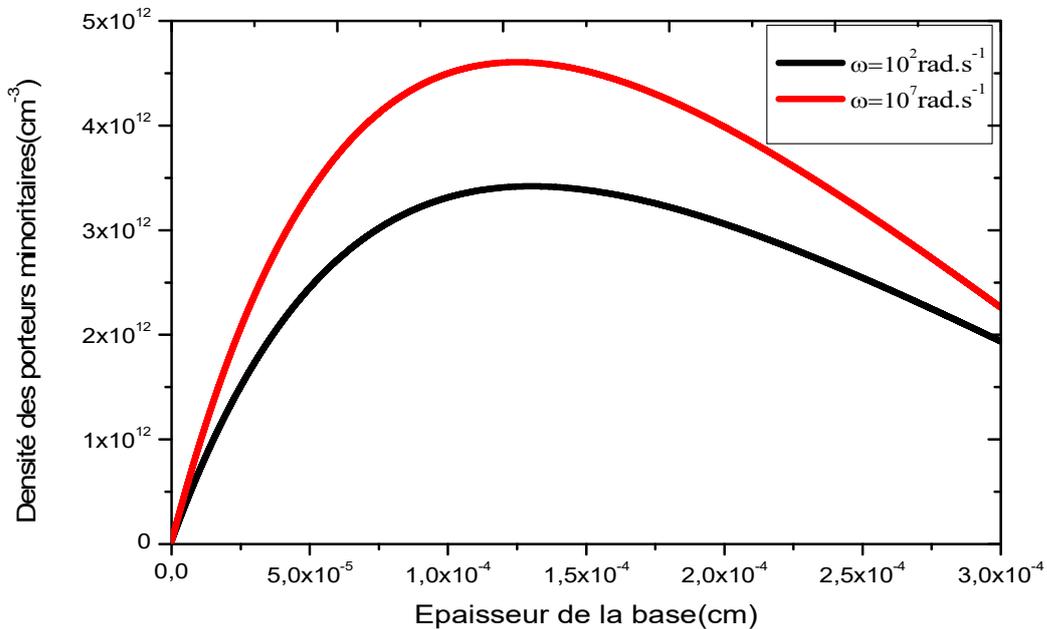


Figure 26: Profil de la densité des porteurs de charge minoritaires en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes fréquences de modulation. $\lambda = 0,98\mu\text{m}$; $S_f = 6.10^6\text{cm.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4\text{cm.s}^{-1}$, (Circuit ouvert)

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

A la figure 25, toutes les courbes débutent par un maximum puis décroissent progressivement avec la profondeur x dans la base.

Pour chaque courbe considérée, le module de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base diminue en fonction de la profondeur de la base. L'augmentation de la fréquence de l'éclairage constitue un blocage pour les porteurs minoritaires photogénérés dans la base. Car la photopile n'a pas le temps de se relaxer et il y a peu de charge qui vont franchir la jonction pour participer au photocourant.

A la figure 26, on constate deux paliers :

au premier palier, la densité des porteurs minoritaires augmente avec l'épaisseur de la base jusqu'à un maximum, ceci correspond à la traversée des porteurs de charge minoritaires à la jonction pour participer à la génération du photocourant .

au deuxième palier, la densité des porteurs minoritaires diminue avec l'épaisseur dans la base, ceci correspond aux recombinaisons en surface et en volume des porteurs qui ne traversent pas la jonction [52].

Pour une longueur d'onde donnée le module de la densité augmente avec la fréquence.

L'augmentation du module de la densité avec la longueur d'onde correspond à une augmentation des porteurs générés dans la base puisque l'absorption diminue quand la longueur d'onde augmente [53]

Pour une longueur d'onde donnée, l'augmentation de la densité avec la fréquence est due au fait que la fréquence empêche la relaxation des porteurs

1.3 Etude du coefficient d'absorption

Le CIGS est utilisable dans les dispositifs photovoltaïques du fait de son gap direct[54]. Ainsi, nous représentons le coefficient d'absorption du CIGS en fonction de la longueur d'onde des photons incidents à la (Figure 27):

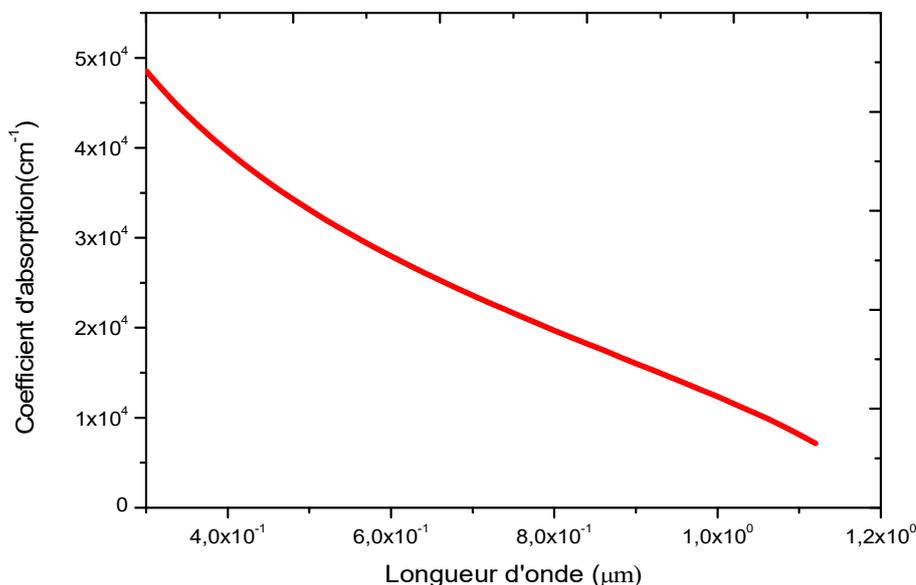


Figure 27: Coefficient d'absorption du CIGS en fonction de la longueur d'onde

Cette figure montre que le coefficient d'absorption diminue en fonction de l'augmentation de la longueur d'onde. Par conséquent la génération des paires électrons-trous augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde.

L'ordre de grandeur du coefficient d'absorption du CIGS est de 10^4 cm^{-1} , ce qui explique son utilisation en couche mince. Par conséquent, il faut quelque micromètre de CIGS pour absorber la totalité de la lumière incidente [55]

1.4 Densité de photocourant

1.4.1 Généralités

Le photocourant rapporté à la surface de la cellule solaire est appelé densité de photocourant.

Elle est due à la diffusion des porteurs minoritaires de charge à travers la jonction. Connaissant l'expression de la densité de porteurs minoritaires, nous pouvons déterminer l'expression de la densité du photocourant en utilisant la loi de FICK. Elle est donnée par la relation (3-18):

$$J_n(\lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n}) = q \cdot D \cdot \left. \frac{\partial \delta_n(x, \lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n})}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (3-18)$$

D'après la relation (3-18) l'expression de la densité de photocourant devient une fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi les densités des photocourants J_n peuvent être représentées en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f suivant les différents modes d'éclairage de la photopile. Nous nous intéresserons qu'à la face avant.

1.4.2 Profil de la densité de photocourant

La résolution de l'équation (3-18) pour un éclairage par la face avant ($n = 1$) donne l'expression de la densité de photocourant. Elle est de la forme suivante :

$$J_1(\lambda, \omega, S_{f_1}, S_{b_1}) = q \cdot D \cdot \left. \frac{\partial \delta_1(x, \lambda, \omega, S_{f_1}, S_{b_1})}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (3-19)$$

Avec S_{f_1} la vitesse de recombinaison à la jonction pour un éclairage par la face avant.

A partir de l'équation (3-19), nous allons étudier la densité de photocourant en fonction de la vitesse de combinaison à la jonction en faisant ressortir les effets de la fréquence de modulation et de la longueur d'onde.

Nous représentons aux (Figures 28 et 29) le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour respectivement des valeurs de la longueur

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel d'onde du visible et de l'infrarouge

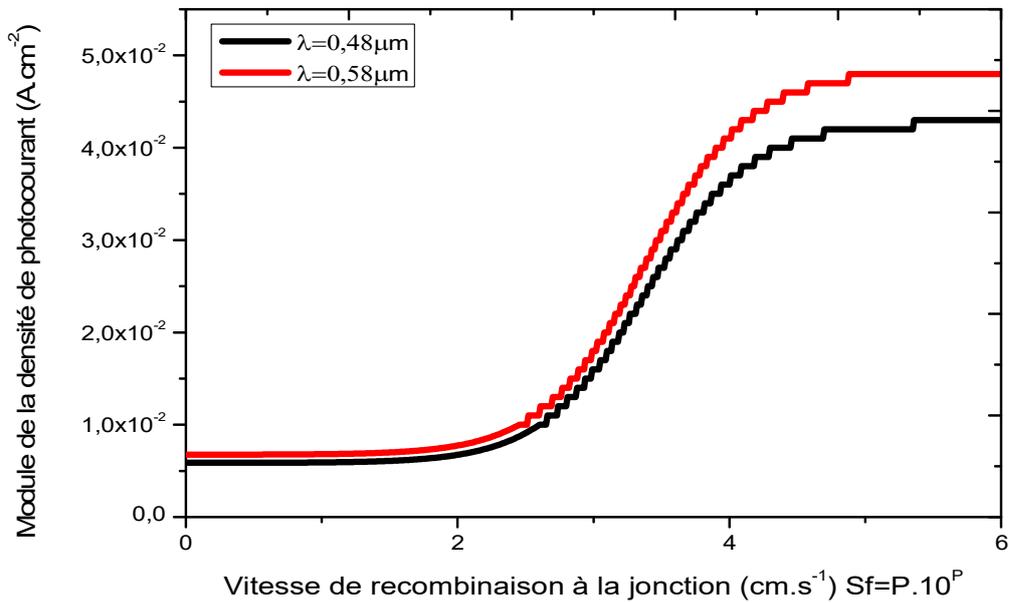


Figure 28: Module de densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur du visible. . $\omega=10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

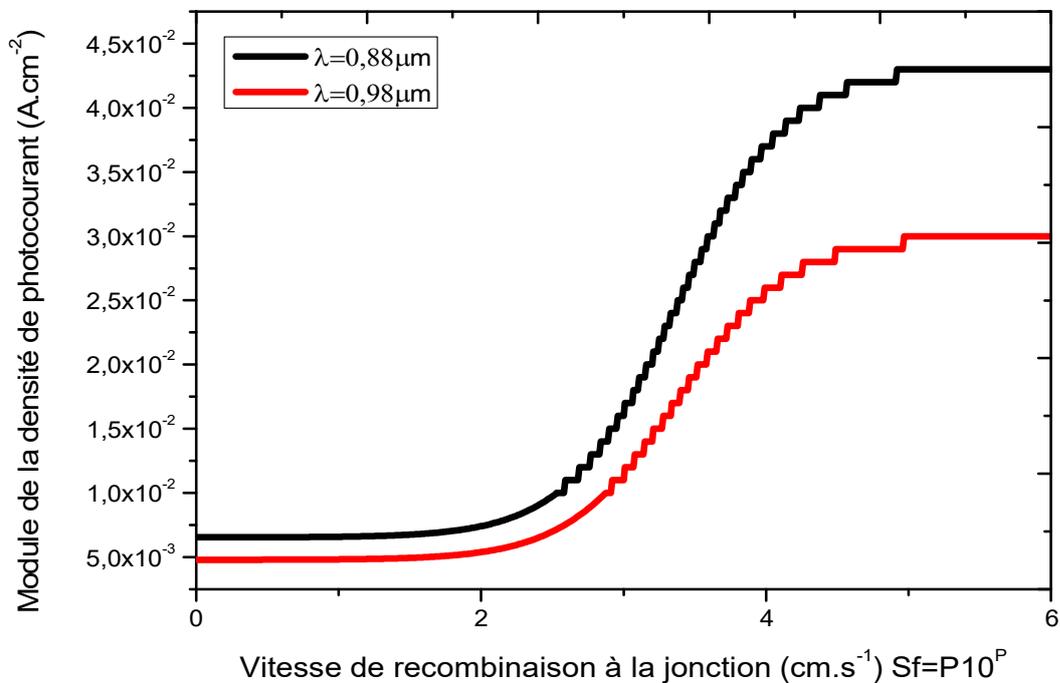


Figure 29: Module de densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur de l'infrarouge. $\omega=10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

On distingue deux paliers aux figures 28 et 29 :

Au premier palier, pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, c'est-à-dire lorsqu'on est en circuit ouvert ; le module de la densité du photocourant tend vers une valeur nulle. Cela s'explique par le fait qu'il n'y a pratiquement pas de porteurs de charges minoritaires.

Au deuxième palier, pour des grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, nous assistons à une situation de court-circuit.

L'état de court-circuit est une situation de transfert total vers l'émetteur de tous les électrons photogénérés dans la base et qui parviennent à la jonction. Pour une telle situation, il n'y a plus de blocage de porteurs à la jonction et le photocourant est maximal.

Nous notons que la densité de photocourant augmente avec la vitesse de recombinaison jusqu'à une certaine valeur où elle reste constante.

C'est la raison pour laquelle, pour les grandes valeurs de vitesse de recombinaison à la jonction, le photocourant tend vers une valeur constante. Cette valeur constante est le courant de court-circuit.

Passons maintenant à l'étude de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de longueur d'onde.

1.5 Densité de phototension

1.5.1 Généralités

Au moment où la photopile est éclairée, il apparaît aux bornes de celle-ci une phototension V_n dont l'expression est donnée par la relation de Boltzmann :

$$V_n = V_T \ln \left(\frac{N_b}{n_i} \delta_n(0) + 1 \right) \quad (3-20)$$

Où N_b est le taux de dopage de la base ($N_b=10^{15}\text{cm}^{-3}$)

n_i est la densité intrinsèque des porteurs minoritaires $n_i=10^{15}\text{cm}^{-3}$

V_T la tension thermique définie par la relation (3-21):

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (3-21)$$

avec :

K la constante de Boltzmann

q la charge de l'électron

T la température absolue à l'équilibre thermique ($T=300^\circ\text{K}$)

n le type d'éclairement

Nous nous intéresserons qu'à la face avant $n=1$

1.5.2 Etude du profil de la phototension

Nous représentons aux (Figures 30 et 31), la variation de la densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison S_f à la jonction pour respectivement des longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge.

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairement monochromatique en régime dynamique fréquentiel

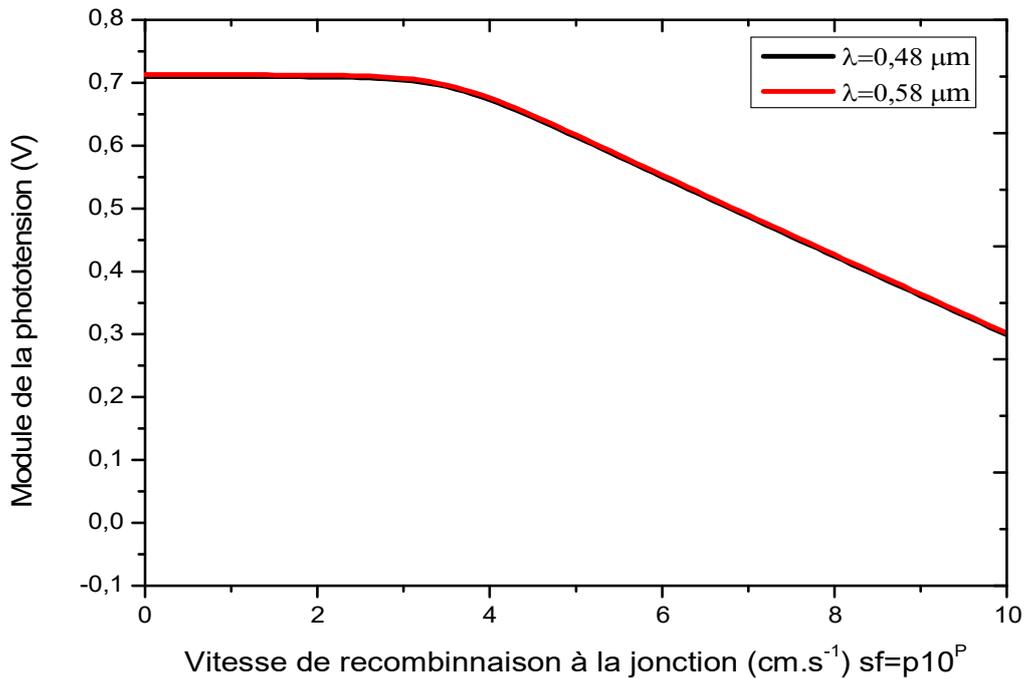


Figure 30: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur du visible. $\omega=10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

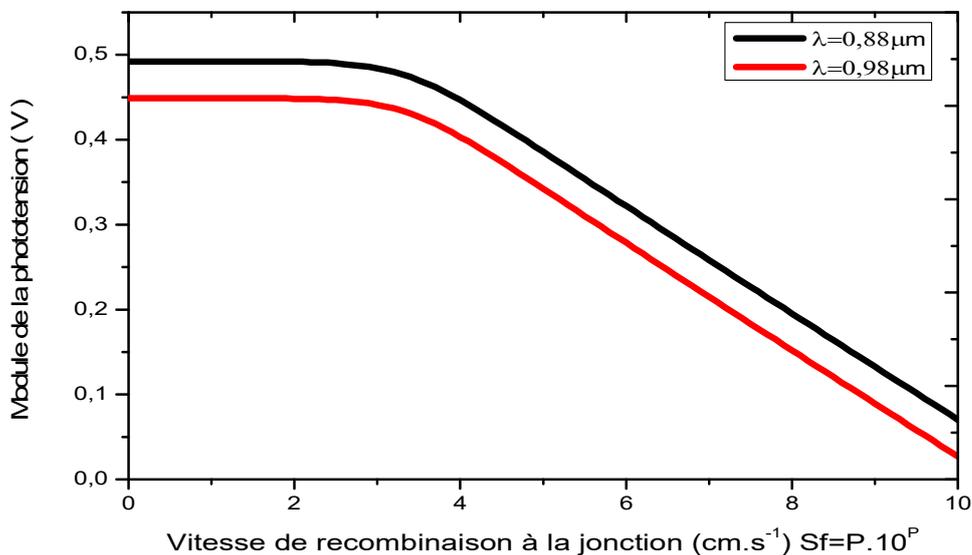


Figure 31: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour des valeurs de longueur de l'infrarouge. $\omega=10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

Les figures 30 et 31 indiquent que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction S_{fi} , la phototension présente, quel que soit le niveau d'éclaircement un palier. La valeur

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

de ce palier correspond à la tension de circuit ouvert où on note une accumulation de porteurs de charges bloqués à la jonction. Cet état de fait correspond à une tension maximale avec un courant débité quasi nul par la photopile dans une charge externe.

Lorsque la phototension, décroît pour s'annuler aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction S_{fl} , le courant débité par la photopile est maximal. Cette situation correspond au régime de court-circuit de la photopile. Ces résultats découlent du fait que lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente, la densité des porteurs de charges minoritaires diminue. Une baisse de la densité des porteurs de charges correspond à une diminution de la phototension et une augmentation du photocourant. C'est la raison pour laquelle, pour des vitesses de recombinaison à la jonction très élevées, on est en situation de court-circuit où la tension est nulle alors que le courant est suffisamment élevé. En règle générale, la phototension se caractérisant par un blocage des porteurs de charges dans la base, ses valeurs sont minimales au voisinage du court-circuit où les vitesses de recombinaison à la jonction sont élevées et maximales au voisinage du circuit ouvert où celles-ci sont quasi nulles. Ces figures montrent également que la phototension de court-circuit diminue avec la longueur d'onde.

Nous représentons aux (Figure 32) et (Figure 33) les variations de la densité de phototension en fonction de la vitesse de recombinaison S_f à la jonction pour différentes fréquence de modulation.

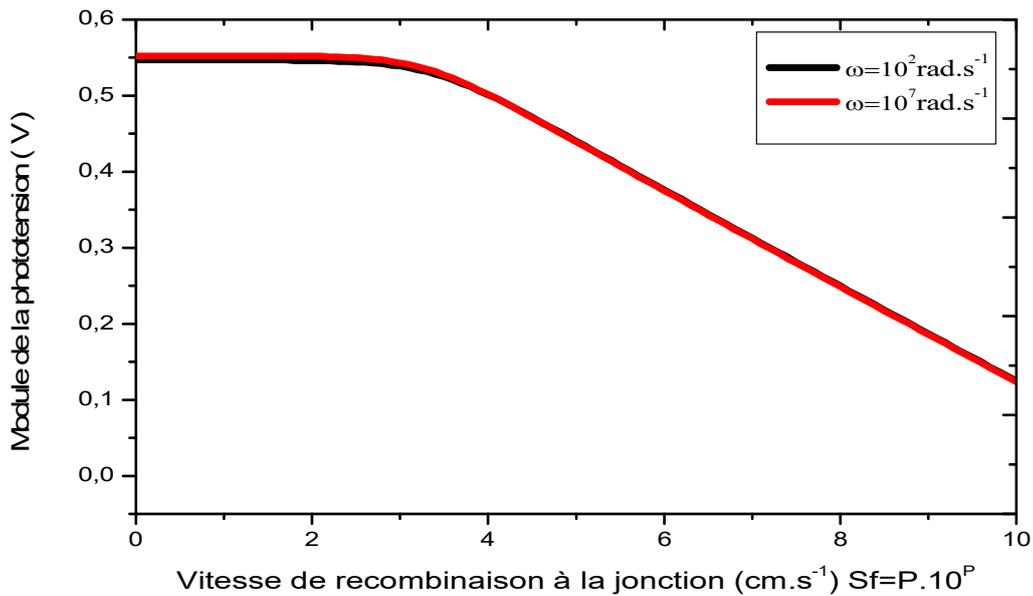


Figure 32: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de fréquences.

$$\lambda = 0,58 \mu\text{m}; S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$$

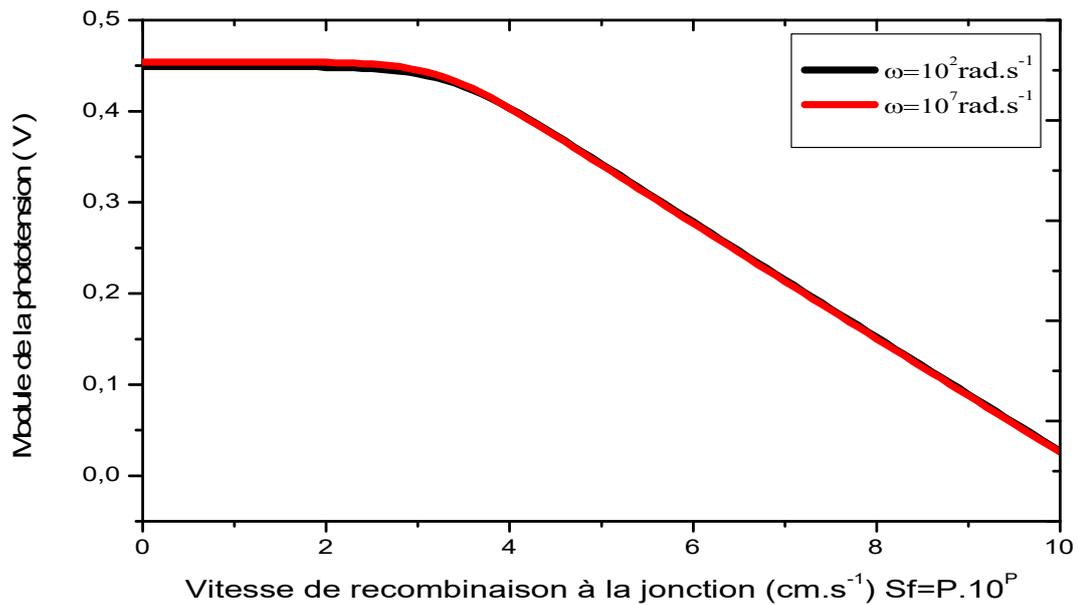


Figure 33: Module de densité de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de fréquence.
 $\lambda = 0,98\mu\text{m}$; $S_b = 410^4 \text{ cm.s}^{-1}$

Les figures 32 et 33 indiquent, pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension est maximale et correspond à la tension de circuit ouvert puis elle diminue progressivement pour s'annuler lorsque la vitesse de recombinaison croît. Ces figures montrent également que la phototension diminue avec la fréquence de modulation.

Nous constatons aussi que pour les petites valeurs de longueur d'onde la phototension maximale est plus grande que celle des grandes longueurs d'ondes

La phototension influe sur la capacité de diffusion.

1.6 La variation de la capacité de diffusion en fonction de la fréquence de modulation

Les figures (Figure 34) et (Figure 35) suivantes illustrent la variation de la capacité en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de longueurs d'onde en circuit ouvert et en court-circuit.

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

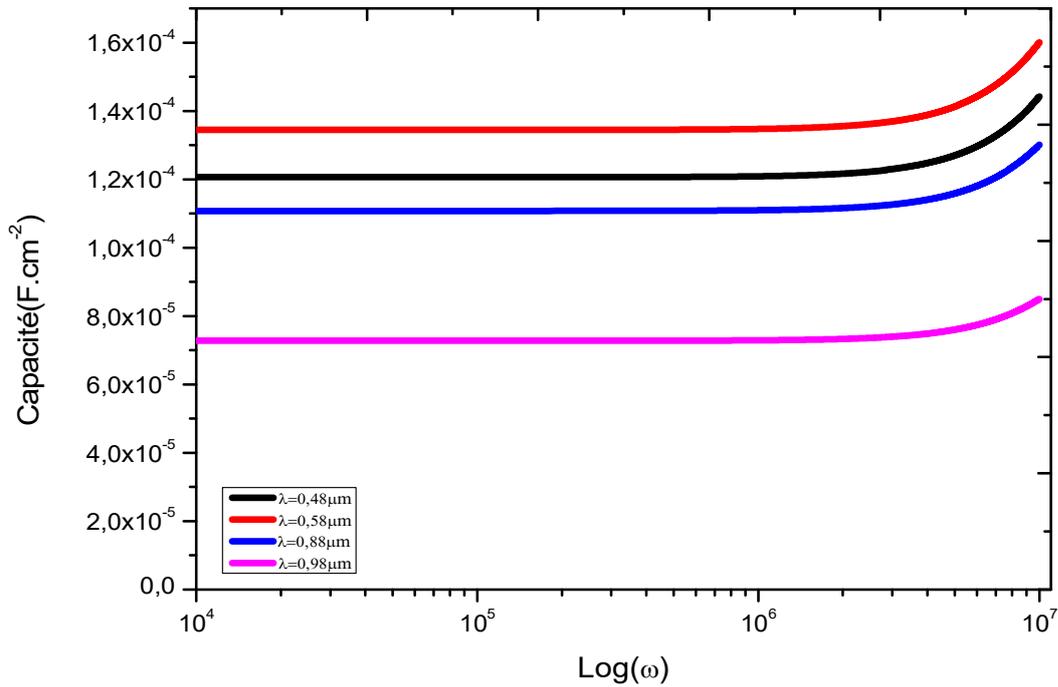


Figure 34: Variation de la capacité en fonction du logarithme de la fréquence pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $S_f = 10^1 \text{cm.s}^{-1}$. (Circuit-ouvert)

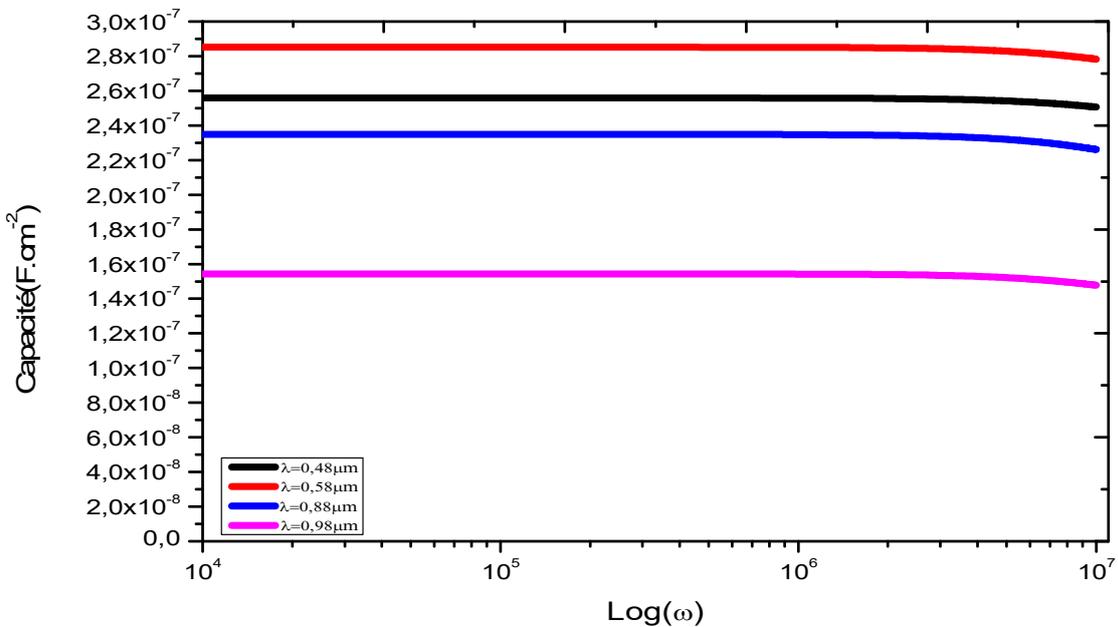


Figure 35: Variation de la capacité en fonction du logarithme de la fréquence pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $S_f = 6.10^6 \text{cm.s}^{-1}$. (Court-circuit)

Les figures 34 et 35 montrent que pour une longueur d'onde donnée, la capacité reste constante d'abord jusqu'à une fréquence égale à 10^6 Hz pour augmenter (figure 34) ou diminuer (figure 35) ensuite avec la fréquence de modulation. La constance de la capacité montre que le régime est quasi-statique jusqu'à 10^6 Hz. C'est à cette valeur de la fréquence que le régime dynamique fréquentiel commence.

1.6.1 Etude de la capacité de diffusion

Lorsque les porteurs minoritaires en excès diffusent dans la base d'une cellule solaire, ils ne traversent pas toute la jonction. Par conséquent ils induisent dans la base une capacité équivalente qui est la capacité de diffusion dont l'expression est donnée comme suit [56]:

$$C = \frac{dQ}{dV_{ph}} \quad (3-22)$$

Où : $Q = q\delta(0)$ est le nombre de porteurs par unité de surface.

En remplaçant Q par sa valeur on obtient :

$$C = q \frac{d\delta(0)}{dV_{ph}} \quad (3-23)$$

$$C = q \frac{d\delta(0)}{dS_f} \frac{1}{\frac{dS_f}{dV_{ph}}} \quad (3-24)$$

De l'expression de la phototension, nous obtenons finalement la relation suivante :

$$C = q \frac{n_i^2}{N_b V_T} + q \frac{\delta(0)}{V_T} \quad (3-25)$$

A la (Figure 36), nous présentons la variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de longueurs d'onde.

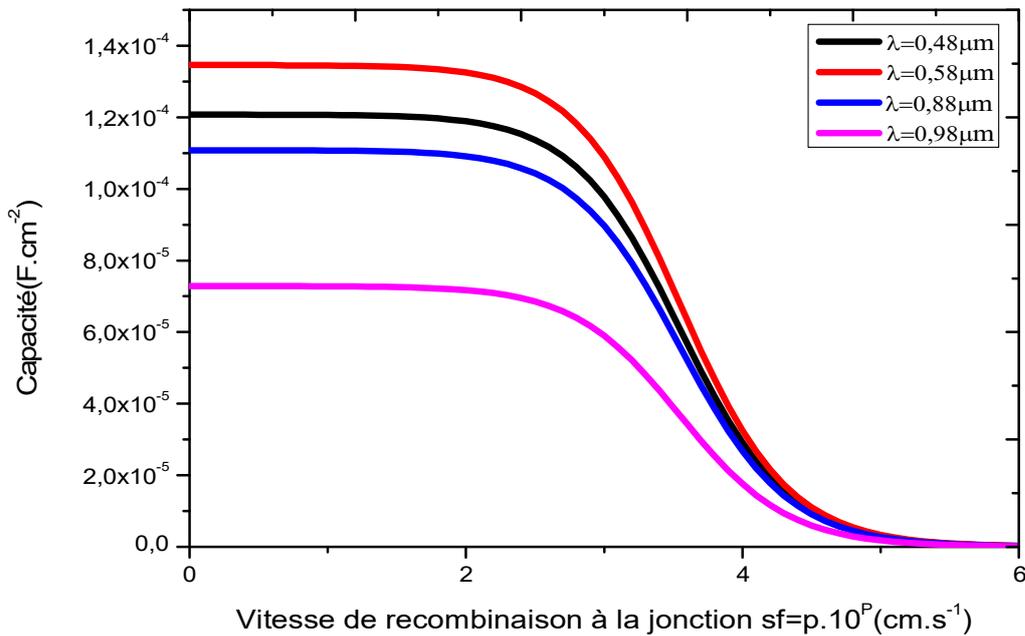


Figure 36: Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $\omega=10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 410^4 \text{ cm.s}^{-1}$.

La capacité diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction. Elle est maximale en circuit ouvert et presque nulle en court-circuit. Cela peut être expliqué d'une part par la forme de la densité des porteurs de charges minoritaire qui est maximale en circuit ouvert et d'autre part par le fait que la capacité est proportionnelle à la phototension. Cette dernière est maximale en circuit ouvert et minimale en court-circuit. Si on se réfère à un condensateur plan, la capacité est inversement proportionnelle à l'épaisseur du condensateur. Or nous avons trouvé qu'en circuit ouvert, l'épaisseur de la zone de charge d'espace est minimal contrairement en court-circuit où l'épaisseur de la zone de charge d'espace est maximal. La capacité augmente avec la longueur d'onde. L'augmentation de la capacité avec la longueur d'onde peut être expliquée par les propriétés optiques du CIGS, par exemple la longueur d'onde et le coefficient d'absorption élevé.

A la (Figure 37), nous présentons la variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence.

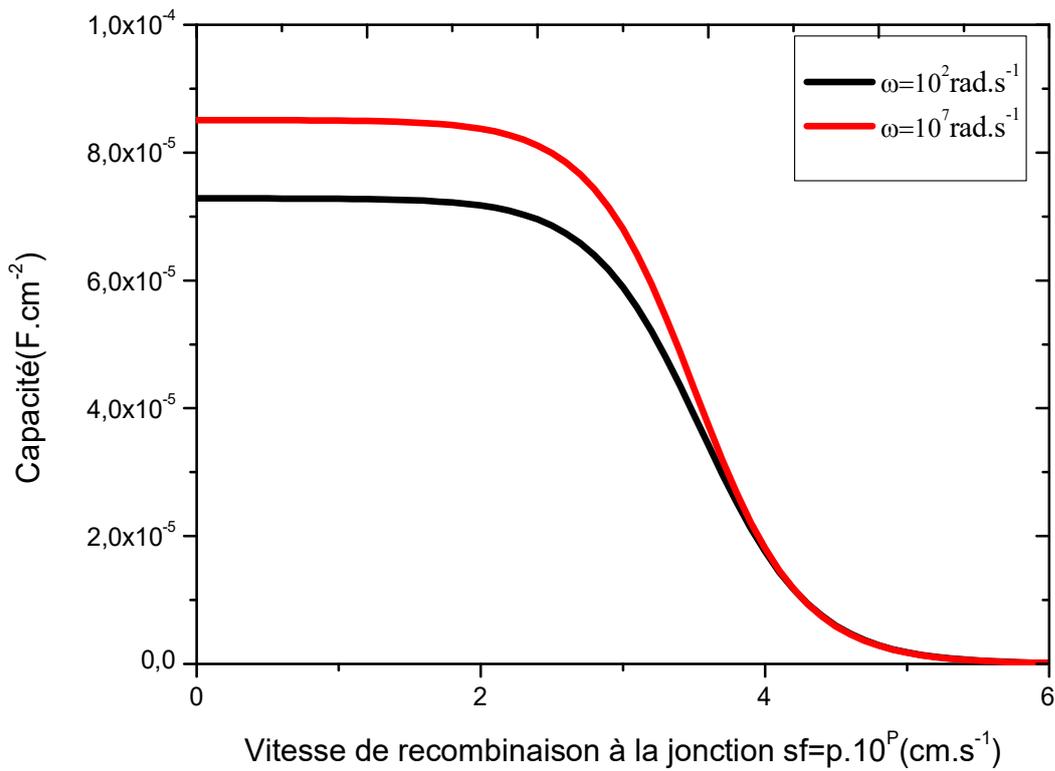


Figure 37: Variation de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la fréquence. $\lambda = 0,98\mu\text{m}$; $S_b = 410^4 \text{ cm.s}^{-1}$.

La capacité diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction. Elle est maximale en circuit ouvert et presque nulle en court-circuit. Cela peut être expliqué d'une part par la forme de la densité des porteurs de charges minoritaire qui est maximale en circuit ouvert et d'autre part par le fait que la capacité est proportionnelle à la phototension. Si on se réfère à un condensateur plan, la capacité est inversement proportionnelle à l'épaisseur du condensateur. Or nous avons trouvé qu'en circuit ouvert, l'épaisseur de la zone de charge d'espace est minimal contrairement en court-circuit où l'épaisseur de la zone de charge d'espace est maximal. La capacité augmente avec la fréquence. L'augmentation de la capacité avec la fréquence peut être expliquée par les propriétés optiques du CIGS, par exemple la longueur d'onde et le coefficient d'absorption.

1.6.2 Etude de l'efficacité de la capacité

La zone de collecte des porteurs de charges minoritaires correspond à une extension de la zone de charge d'espace X_0 qui dépend de la vitesse de recombinaison à la jonction. Cependant, lorsque la zone de charge d'espace est considérée comme un condensateur plan, on peut écrire :

$$U_{cc} = \frac{X_{0,co}}{X_{0,cc}} U_{co} \quad (3-26)$$

U_{cc} et U_{co} sont respectivement les énergies lorsque la photopile est en court-circuit et en circuit-ouvert. $X_{0,co}$ et $X_{0,cc}$ sont respectivement l'épaisseur de la zone de charge d'espace lorsque la photopile est en circuit ouvert et en court-circuit.

La capacité s'écrit dans ce cas :

$$C(\lambda, \omega) = \frac{\epsilon \cdot S}{X_o(\lambda, \omega)} \quad (3-27)$$

L'efficacité de la capacité de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$\eta = \frac{\Delta U}{U_{oc}} \quad (3-28)$$

Avec ΔU la différence d'énergie en circuit ouvert et en court-circuit.

Ainsi, l'expression de l'efficacité devient :

$$\eta(\lambda, \omega) = 1 - \frac{X_{o,co}(\lambda, \omega)}{X_{o,cc}(\lambda, \omega)} \quad (3-29)$$

Le Tableau 2 résume les valeurs de la densité maximale des porteurs minoritaires, de l'épaisseur de la zone de charge d'espace et de la capacité pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

Tableau 2: Valeurs de la densité maximale des porteurs minoritaires, de l'épaisseur de la zone de charge d'espace, de la capacité et du rendement pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

λ (nm)	$\delta_{max,co}$ (10^{13}cm^{-3})	$\delta_{max,cc}$ (10^{12}cm^{-3})	$X_{o,co}$ ($10^{-2} \cdot \mu\text{m}$)	$X_{o,cc}$ ($10^{-2} \cdot \mu\text{m}$)	C_{co} (mF. cm^{-2})	C_{cc} ($\mu\text{F}.$ cm^{-2})	η %
480	3,19044931	2,4100749	4,13	75,64	2,14	117,00	94,54
580	3,60422911	3,1270275	4,94	84,24	1,79	105,06	94,34
880	3.17749864	4,187250	8,83	115,20	1,00	76,82	92,33
980	2.1797098	3,4194892	11,59	130,31	0,76	67,91	91,10

La capacité en circuit-ouvert comme en court-circuit diminue quand la longueur d'onde augmente. Cette capacité est très faible en court-circuit. On remarque également que l'épaisseur de la zone de charge d'espace en circuit-ouvert comme en court-circuit augmente quand la longueur d'onde augmente, elle est très faible en circuit ouvert. Nous constatons aussi que le rendement de la capacité pour les longueurs d'onde du visible est supérieur aux rendements des longueurs d'onde de l'infrarouge. Nous constatons que le meilleur rendement est obtenu avec la longueur d'onde de 0,48 μm .

1.7 Etude de la caractéristique densité de photocourant-phototension de la photopile.

Représentons aux (Figure 38) et (Figure 39), la variation de la densité de photocourant en fonction de la phototension pour un éclairement par la face avant de la photopile.

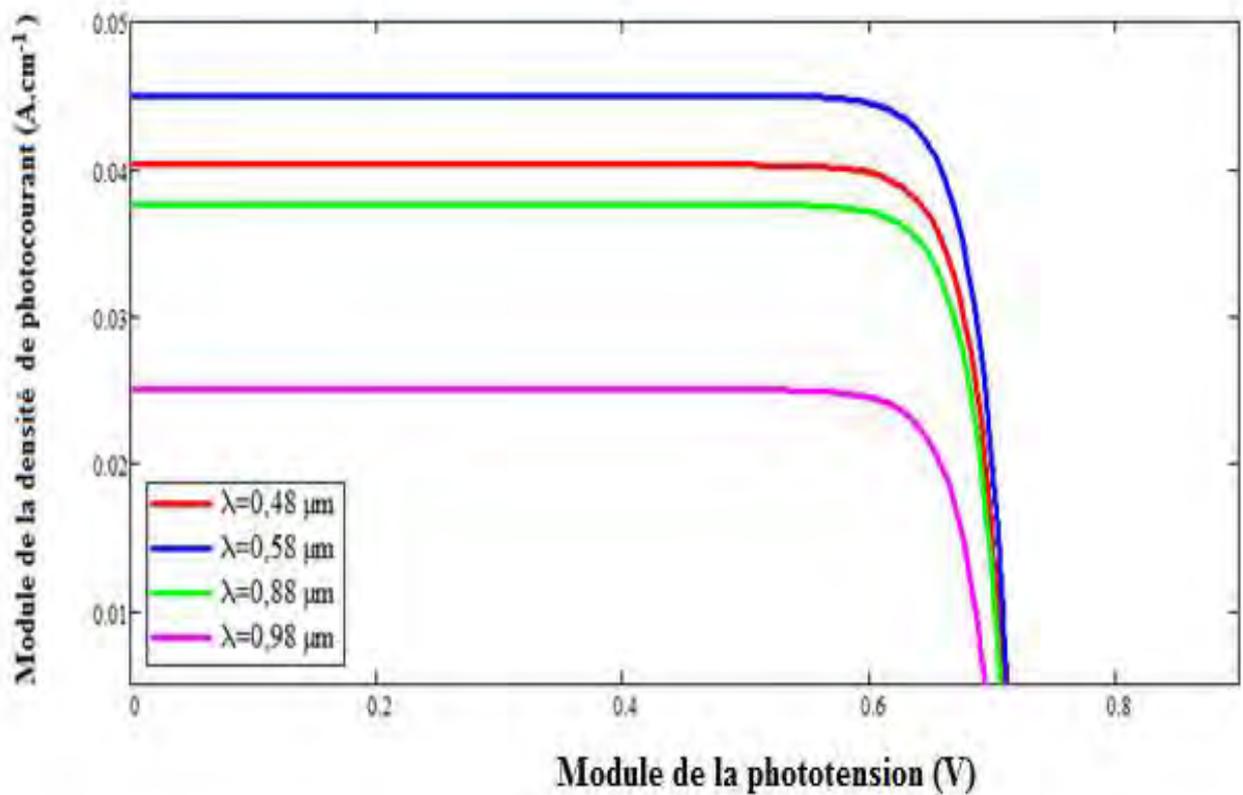


Figure 38: Variation du courant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $\omega=10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b=4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

Nous constatons que pour chaque longueur d'onde le photocourant est maximal pour les faibles valeurs de la phototension, ce qui correspond au courant de court-circuit. Lorsque la phototension augmente et tend vers la phototension de circuit ouvert, le photocourant diminue pour tendre vers zéro.

A la figure 39, nous allons représenter les variations du courant en fonction de la phototension pour un éclairage par la face avant de la photopile pour différentes valeurs de la fréquence.

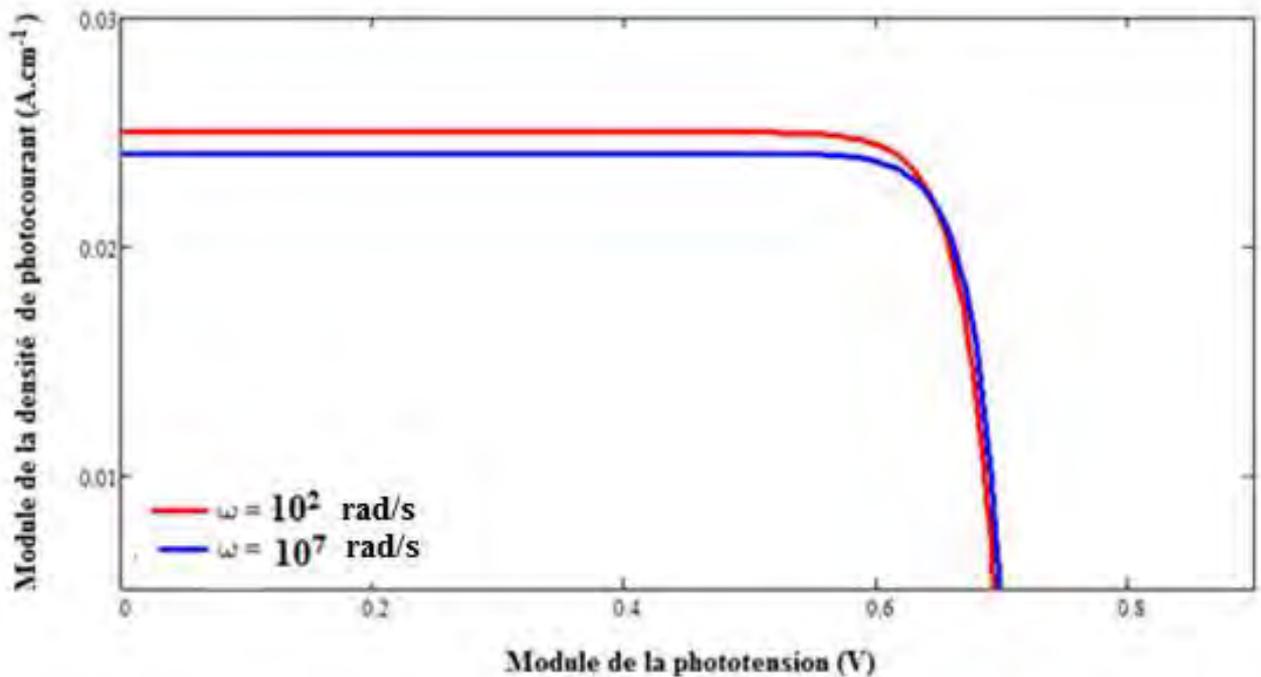


Figure 39: Variation du courant en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la fréquence. $\lambda = 0,98\mu\text{m}$; $S_b = 410^4 \text{ cm.s}^{-1}$.

Pour un éclairage par la face avant de la photopile, la caractéristique courant-tension montre pour des valeurs de tension inférieure 0,6V, la densité de courant est constante. Elle correspond à la valeur de la densité de court-circuit. Tandis que pour des valeurs de tension supérieure à 0,6V, elle décroît rapidement pour tendre vers zéro. Au moment où elle s'annule nous sommes au voisinage du circuit-ouvert.

Ces courbes montrent également que la tension du circuit- ouvert et le courant de court-circuit varient avec la fréquence.

Ces deux caractéristiques I-V ont la même allure. Elles possèdent chacune une partie horizontale qui correspond à une zone où le photocourant est indépendant de la phototension. Ces caractéristiques correspondent à celle d'une source de courant qui débite une intensité électrique constante quelle que soit la valeur de la tension ; cette valeur de l'intensité est assimilable au photocourant de court-circuit. Puisque nous sommes en présence d'une photopile qui n'est pas idéale, elle présente des pertes de courant.

Ces courants perdus sont caractérisés par la présence d'une charge interne dans la photopile qu'on appelle résistance de fuite ou résistance shunt.

1.8 Etude des vitesses de recombinaison

1.8.1 Etude de la vitesse de recombinaison S_b à la face arrière

Au niveau des figures 28 et 29, pour une longueur d'onde donnée, les courbes de variation du module de la densité du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction montrent qu'aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f , ces courbes présentent chacune un palier horizontal. Le gradient du photocourant par rapport à S_f tend alors vers zéro:

$$\frac{\partial J_1(\lambda, \omega, S_f, S_b)}{\partial S_f} = 0 \quad (3-30)$$

La résolution de cette équation nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison Sb_1 à la face arrière de la base de la photopile pour un éclairement par la face avant.

1.8.2 L'expression de la vitesse de recombinaison sb à la face arrière

L'expression de la vitesse de recombinaison Sb_1 à la face arrière de la photopile pour un éclairement par la face avant est définie par la relation suivante

$$Sb = \frac{D}{L} \cdot \frac{L\alpha(\lambda).ch\left(\frac{H}{L}\right) - L.\alpha(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda).H) - sh\left(\frac{H}{L}\right)}{ch\left(\frac{H}{L}\right) - L.\alpha(\lambda).sh\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-\alpha(\lambda).H)} \quad (3-31)$$

1.8.3 Diagramme de Nyquist de la vitesse de recombinaison sb_1 à la face arrière.

Nous représentons aux (Figure 40), (Figure 41), (Figure 42) et (Figure 43) le diagramme de Nyquist de la vitesse de recombinaison Sb_1 pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

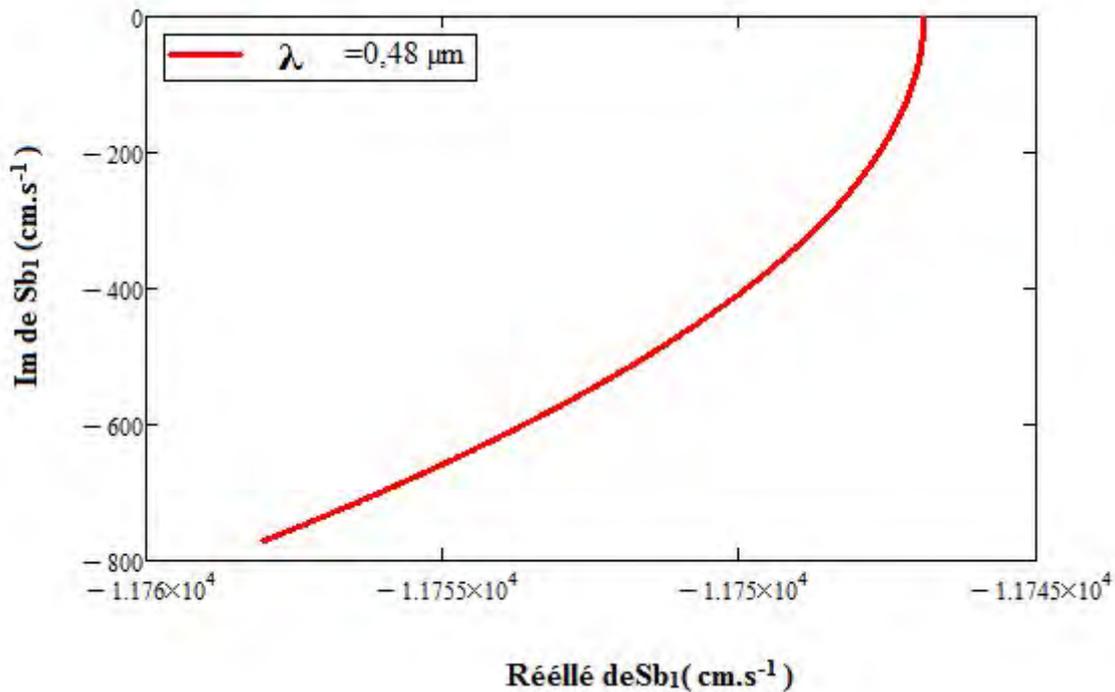


Figure 40: Variation de la partie imaginaire de Sb_1 en fonction de sa partie réelle.

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

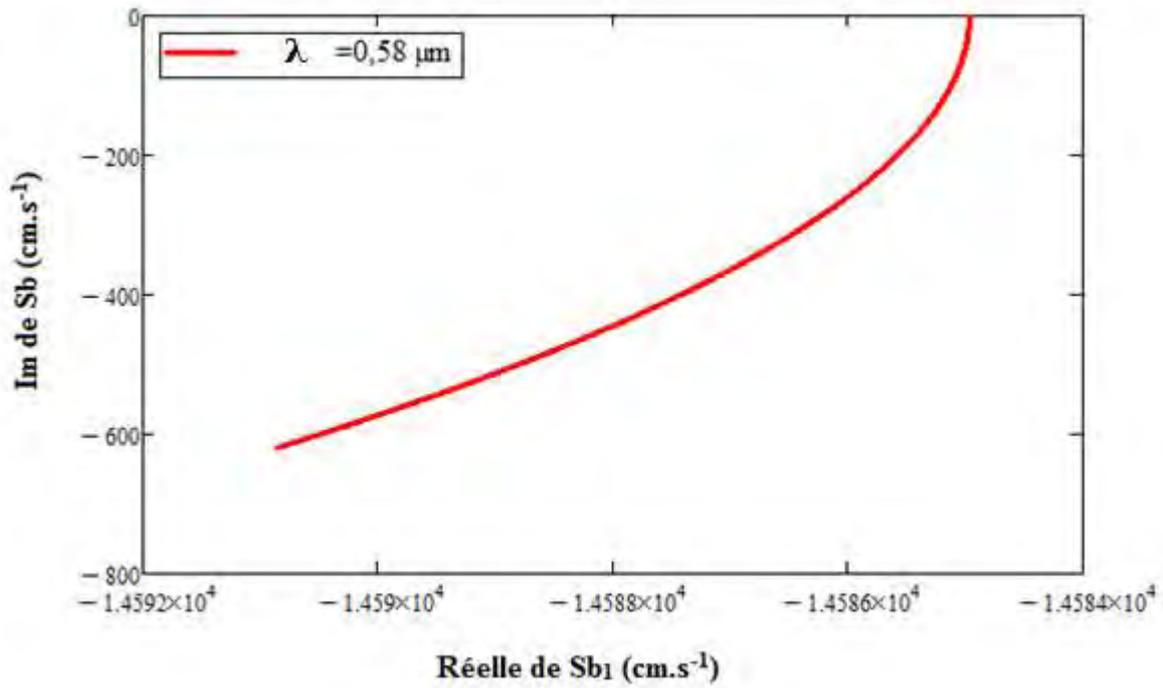


Figure 41: Variation de la partie imaginaire de S_{b1} en fonction de sa partie réelle.

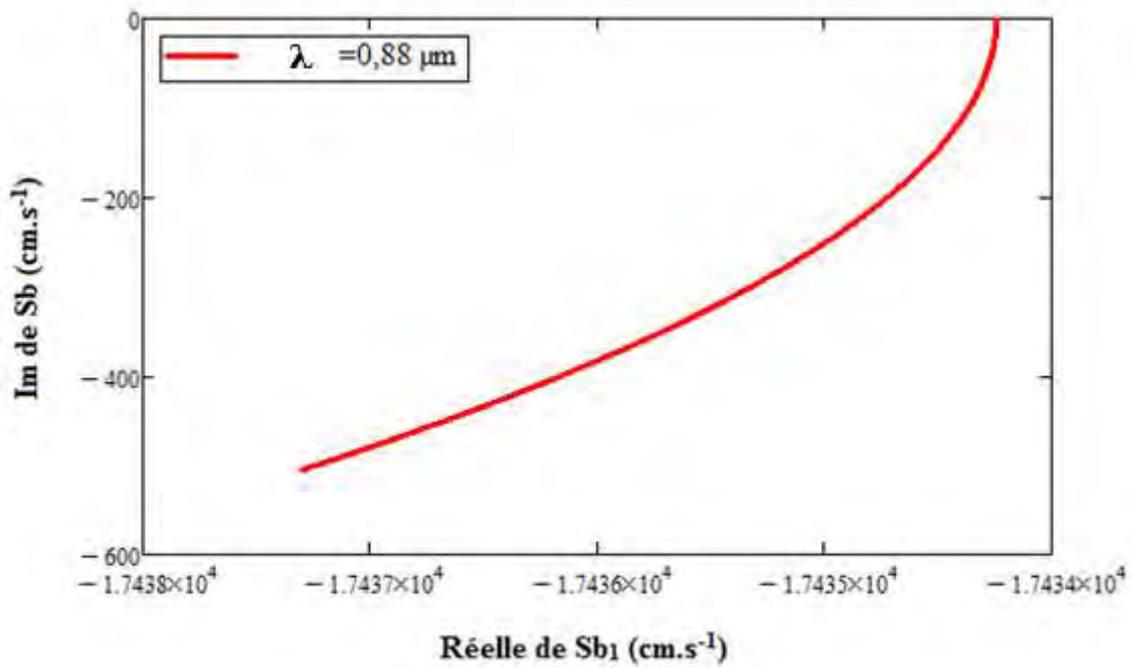


Figure 42: Variation de la partie imaginaire de S_{b1} en fonction de sa partie réelle.

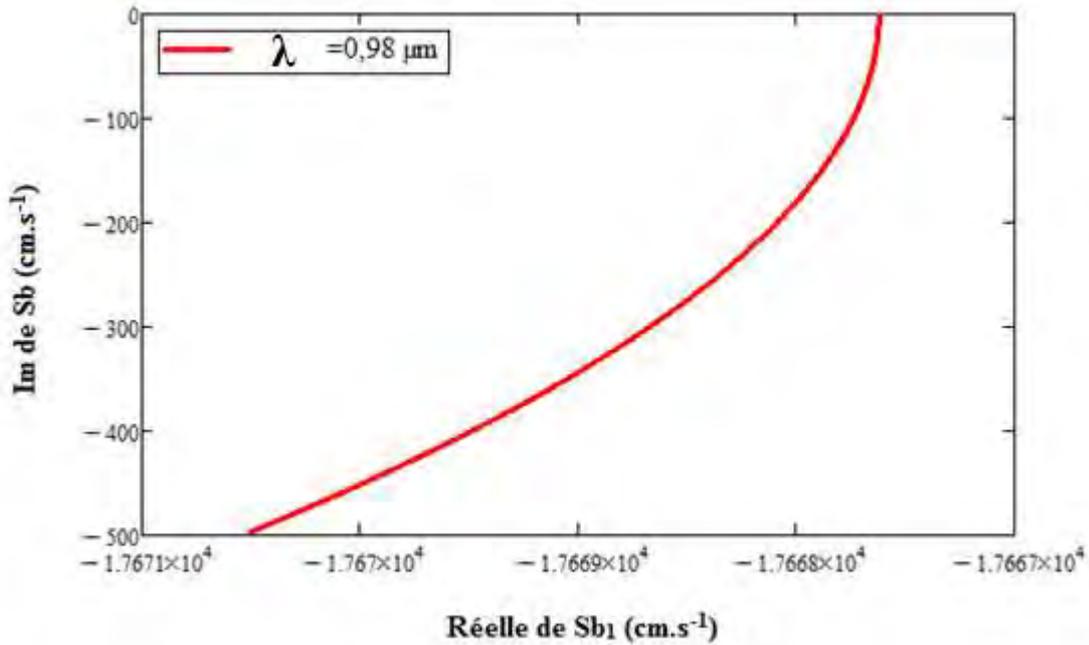


Figure 43: Variation de la partie imaginaire de Sb_1 en fonction de sa partie réelle.

Les courbes ci-dessus représentent de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb_1 , Ces courbes montrent l'existence des effets inductifs, car la partie imaginaire et la partie réelle de la vitesse de recombinaison à la face arrière sont négatives. Cependant, l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution du minimum de la partie imaginaire.

1.8.4 Le diagramme de Bode de la vitesse de recombinaison s_{b_1} a la face arrière.

Le diagramme de Bode est une méthode mise au point pour simplifier l'obtention des tracés de réponse en fréquence.

Nous représentons aux (Figure 44), (Figure 45), (Figure 46) et (Figure 47) les variations de la vitesse de recombinaison Sb_1 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

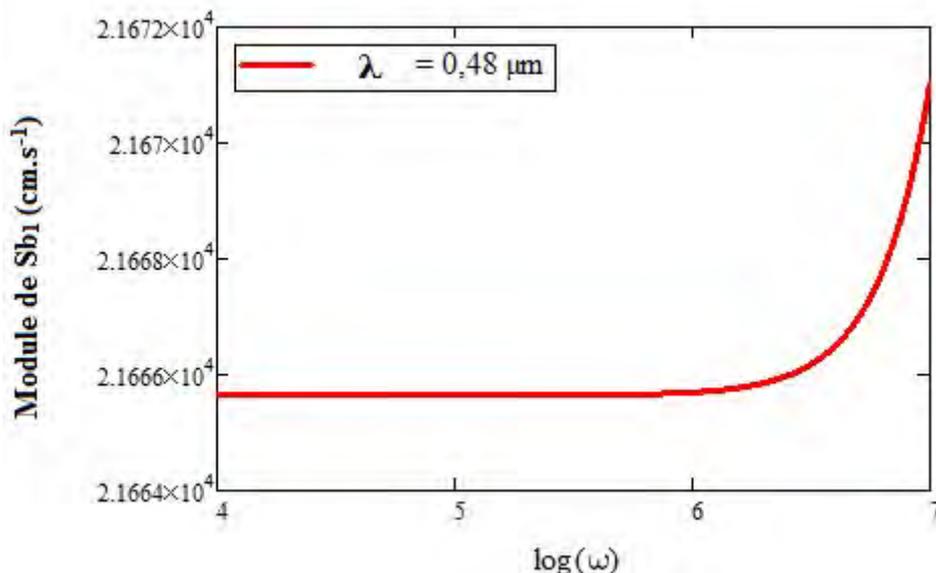


Figure 44: Variation de la vitesse de recombinaison Sb_1 en fonction de la fréquence.

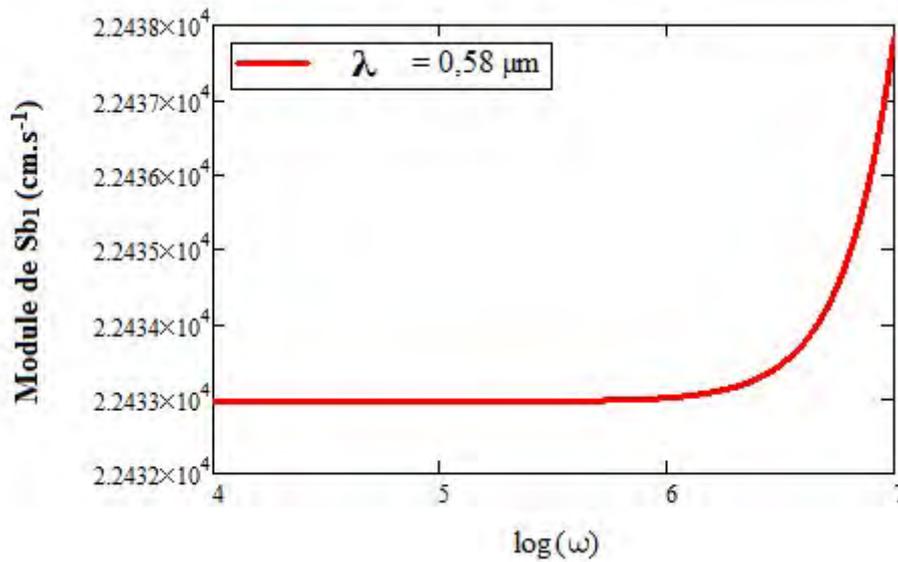


Figure 45: Variation de la vitesse de recombinaison Sb_1 en fonction de la fréquence

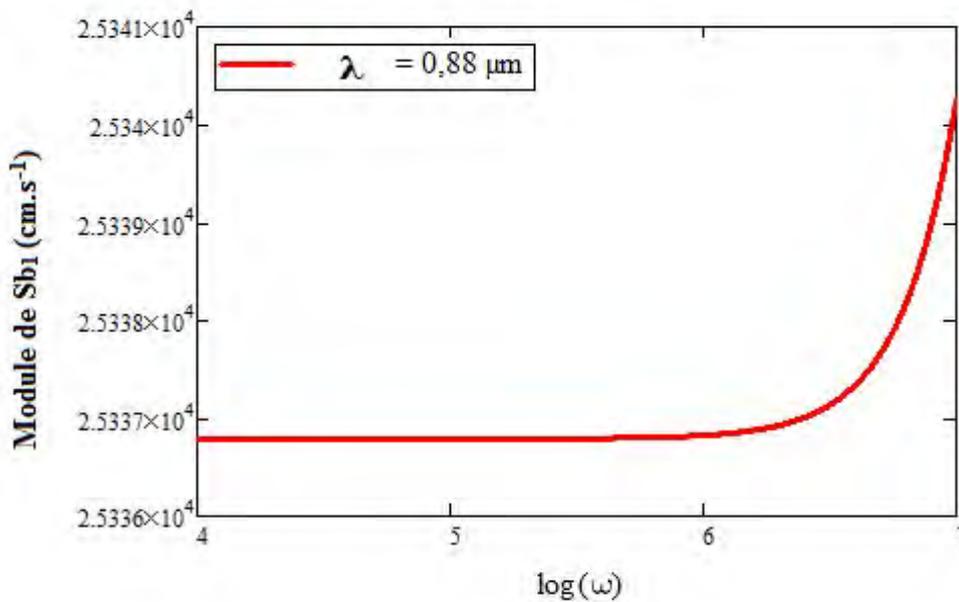


Figure 46: Variation de la vitesse de recombinaison Sb_1 en fonction de la fréquence.

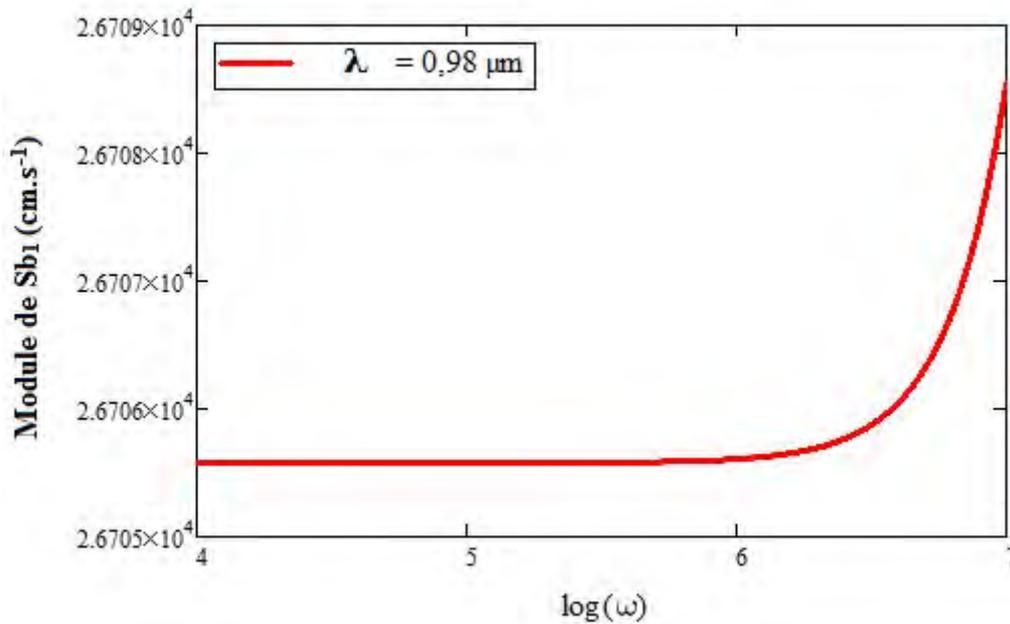


Figure 47: Variation de la vitesse de recombinaison Sb_1 en fonction de la fréquence.

Les figures ci-dessus montrent que pour une longueur d'onde donnée et pour des fréquences de modulation faibles ($\omega \leq 6.10^6$ Hz), la vitesse Sb_1 ne dépend que de la longueur d'onde. Cette vitesse est constante quel que soit la valeur de la longueur d'onde. La valeur minimale la vitesse Sb_1 croît avec l'augmentation de la longueur d'onde. Les grandes longueurs d'onde permettent d'avoir les plus grandes valeurs de Sb_1 c'est à dire plus de pertes de porteurs à la face arrière de la base. Au-delà de 6.10^6 Hz la vitesse Sb_1 augmente rapidement. Nous observons qu'à partir d'environ 7.10^7 Hz les vitesses Sb_1 sont les mêmes quel que soit la longueur d'onde. Cela montre que pour voir l'effet de la longueur d'onde sur Sb_1 il faut se placer dans une gamme de fréquence inférieure à 7.10^7 Hz.

1.8.5 Diagramme de Bode de la vitesse de recombinaison sb_1 a la face arrière pour un éclairement par la face avant : Phase de Sb_1

A la (Figure 48) nous présentons les variations de la phase de la vitesse de recombinaison Sb_1 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde

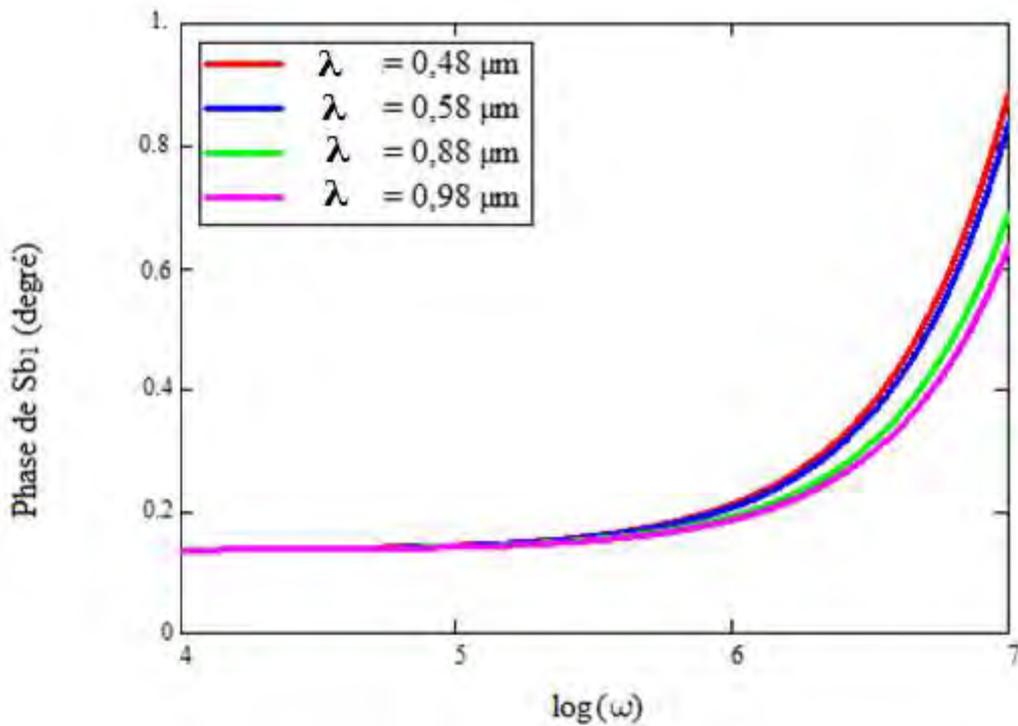


Figure 48: Variations de la phase de la vitesse de recombinaison Sb_1 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

Pour une longueur d'onde donnée, la représentation de la phase en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière montre qu'il existe une fréquence en dessous de laquelle la phase est constante, c'est le domaine du régime statique. Au-delà de cette fréquence, la phase augmente mais reste toujours négative. Pour ce type d'éclairage par la face avant, les phénomènes inductifs sont prédominants.

1.8.6 Circuits électriques équivalents à la vitesse de recombinaison en face arrière sb_1

La représentation de Bode de la phase de la vitesse de recombinaison en fonction du logarithme de la fréquence nous a permis de remarquer que la phase de la vitesse de recombinaison Sb_1 à la face arrière ne prend que des valeurs positives dans le cas d'un éclairage par la face avant. Les effets inductifs l'emportent sur les effets capacitifs. Cela nous permet de proposer un modèle électrique équivalent. A la (Figure 49) nous présentons le modèle électrique équivalent déduit de la vitesse de recombinaison en face arrière pour un éclairage par la face avant.

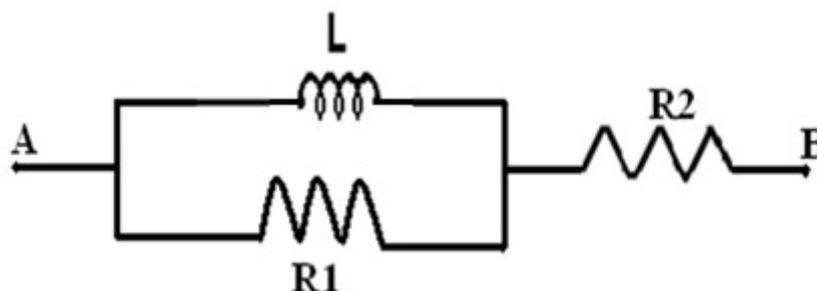


Figure 49: Circuit électrique équivalent déduit de la vitesse de recombinaison en face arrière.

1.9 Etude des vitesses de recombinaison intrinsèque Sf_0 à la jonction.

En étudiant la variation du module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière, nous constatons qu'aux grandes valeurs de Sb_1 , la densité de photocourant présente un palier. Donc le gradient de la densité de photocourant par rapport à la vitesse de recombinaison à la base (Sb_1) est nul. On obtient l'équation suivante

$$\frac{\partial J_1(\lambda, \omega, Sf_1, Sb_1)}{\partial Sb_1} = 0 \quad (3-32)$$

La résolution de cette équation (3-32) nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_0 à la jonction de la photopile pour un éclairage par la face avant.

1.9.1 Expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_1 à la jonction.

L'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf_1 à la jonction pour un éclairage par la face avant est donnée par la relation (3-36) :

$$Sf_0 = \frac{D}{L} \left[\frac{L\alpha(\lambda) - [L\alpha(\lambda)ch\left(\frac{H}{L}\right) + sh\left(\frac{H}{L}\right)]\exp(-\alpha(\lambda))}{L\alpha(\lambda)sh\left(\frac{H}{L}\right)\exp(-\alpha(\lambda)).H + ch\left(\frac{H}{L}\right)\exp(-\alpha(\lambda)) - 1} \right] \quad (3-33)$$

Nous représentons aux (Figure 50), (Figure 51), (Figure 52) et (Figure 53) les variations de la vitesse de recombinaison Sf_1 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

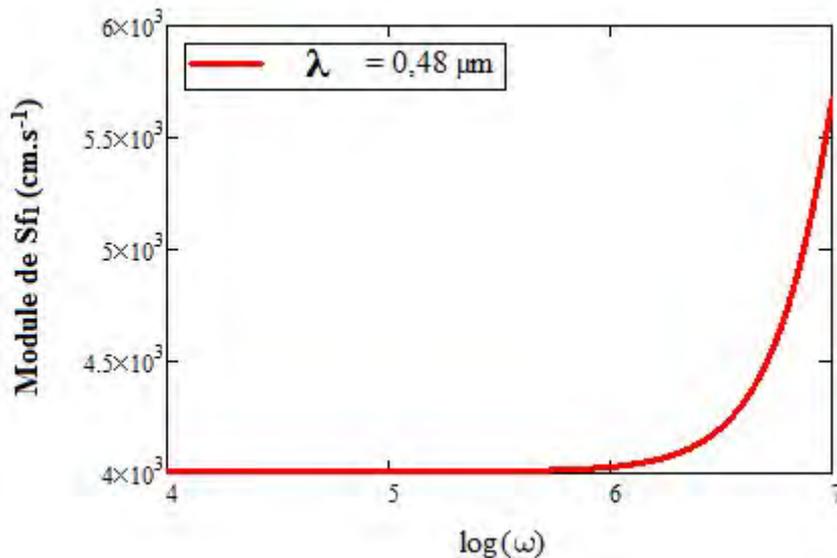


Figure 50: Variation de la vitesse de recombinaison Sf_1 en fonction de la fréquence

Chapitre 3 : Etude théorique de la photopile monofaciale à base de CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

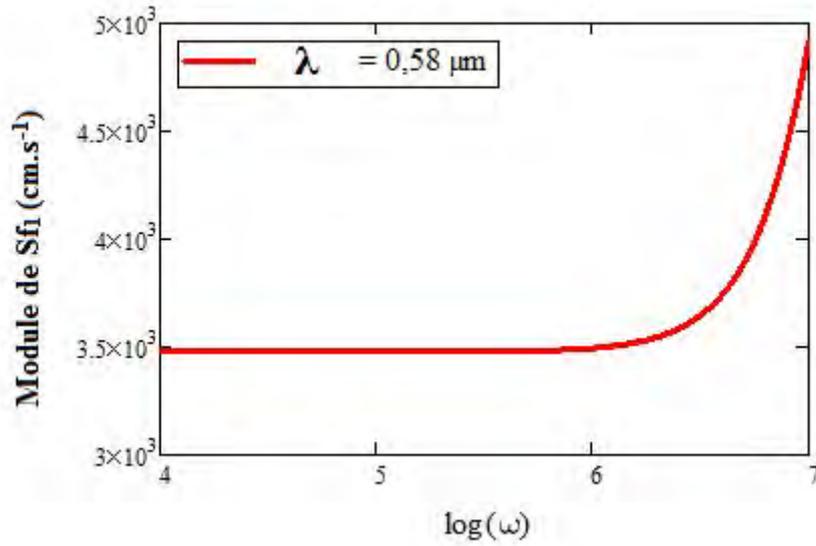


Figure 51: Variation de la vitesse de recombinaison Sf_1 en fonction de la fréquence

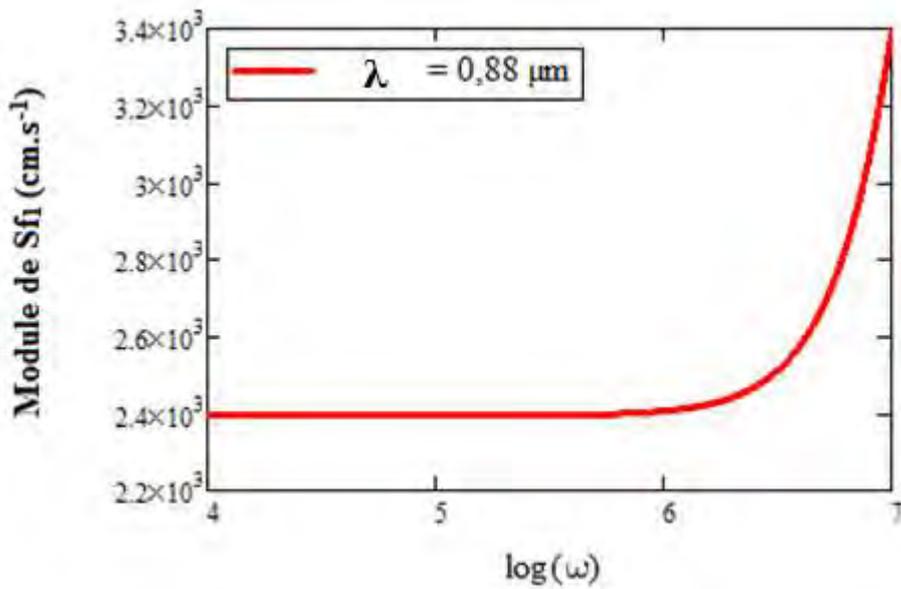


Figure 52: Variation de la vitesse de recombinaison Sf_1 en fonction de la fréquence

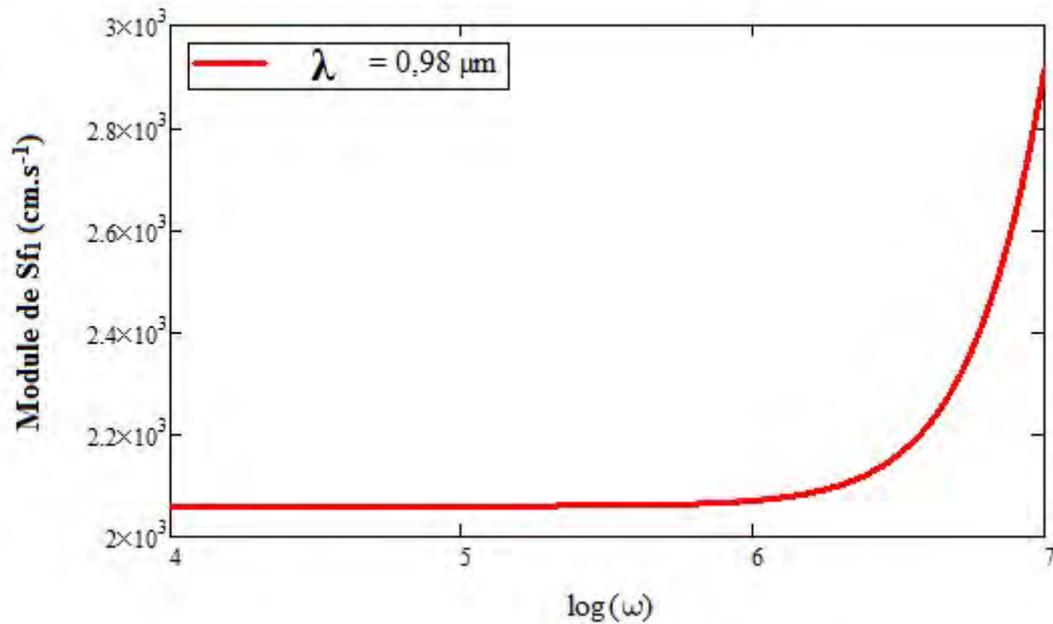


Figure 53: Variation de la vitesse de recombinaison Sf1 en fonction de la fréquence

Les figures 50, 51, 52 et V53 montrent que pour une longueur d'onde donnée et pour des fréquences de modulation faibles ($\omega \leq 6.10^6$ Hz), la vitesse Sf₁ ne dépend que de la longueur d'onde. Cette vitesse est constante quel que soit la valeur de la longueur d'onde. La valeur minimale la vitesse Sf₁ décroît avec l'augmentation de la longueur d'onde. Elle est insensible aux faibles fréquences et croît, de façon exponentielle pour les grandes fréquences de modulation c'est-à-dire au-delà de 6.10^6 Hz. Nous observons qu'à partir d'environ 7.10^7 Hz les vitesses Sf₁ sont les mêmes quel que soit la longueur d'onde.

Cela montre que pour voir l'effet de la longueur d'onde sur Sf₁ il faut se placer dans une gamme de fréquence inférieure à 7.10^7 Hz.

1.9.2 Diagramme de bode de la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sf₀₁: Phase de Sf₁

A la (Figure 54) nous présentons le diagramme de Bode de la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sf₁

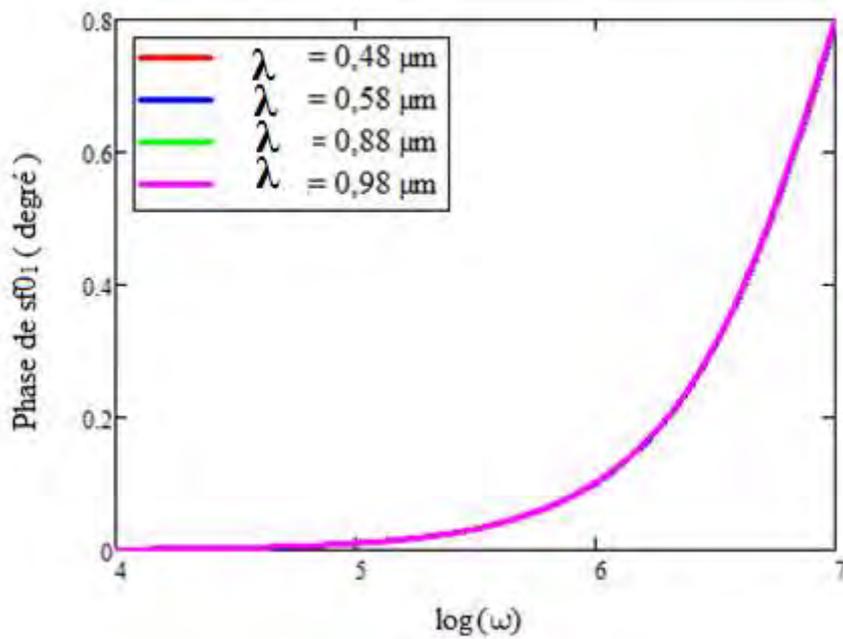


Figure 54: Phase de la vitesse de recombinaison Sf_1 en fonction de la fréquence de modulation pour différentes longueurs d'onde.

La phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sf_1 est positive quel que soit la longueur d'onde. De surcroît on remarque qu'elle est nulle aux faibles fréquences ($\omega \leq 5 \cdot 10^5$ Hz) et croît exponentiellement lorsque la fréquence est élevée.

Les résultats observés pour les vitesses de recombinaison intrinsèques Sf_1 sont identiques à ceux obtenus pour les vitesses de recombinaison en face arrière Sb_1 .

1.10 Conclusion

L'étude théorique de la photopile bifaciale au CIGS sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel que nous venons de faire, nous a permis d'analyser l'influence de la fréquence et de la longueur d'onde sur le photocourant, sur la phototension, la capacité de diffusion et sur les vitesses de recombinaison. Cette analyse nous permet aussi de dire que, la densité des porteurs de charge présente un gradient négatif pour de grandes valeurs de la fréquence de modulation. Le module de la densité des porteurs de charge minoritaires en court-circuit comme en circuit-ouvert augmente avec la longueur d'onde et la fréquence.

Selon le mode de fonctionnement de la photopile, les résistances série et shunt ont été étudiées en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf . Les diagrammes de Bode et de Nyquist de l'impédance de la photopile, vont nous permettre de mettre en exergue les effets capacitifs et inductifs de la photopile.

CHAPITRE 4 :

DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES D'UNE PHOTOPILE MONOFACIALE A BASE DE DISELENUIRE DE CUIVRE D'INDIUM ET DE GALLIUM (CuInGaSe₂ NOTE CIGS)

1.1 Introduction

Le chapitre que nous sommes sur le point d'entamer aura comme objectif la détermination des paramètres électriques de la photopile monofaciale éclairée par une lumière monochromatique en modulation de fréquence par la méthode de la spectroscopie d'impédance.

Afin de pouvoir déterminer les paramètres électriques (résistances série et shunt, la capacité, l'impédance) en vue d'un contrôle de la qualité d'une photopile, plusieurs modèles de circuits électriques équivalents de la photopile ont été proposés

Nous nous intéresserons aux méthodes de détermination des paramètres électriques en utilisant la représentation de Nyquist pour déterminer la résistance série, la résistance shunt et l'impédance. La fréquence de coupure est obtenue grâce aux diagrammes de Bode.

Nous allons y proposer aussi une méthode de détermination de la puissance et du facteur de forme de la photopile.

1.2 Etude de la résistance shunt

Proposons un circuit électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne en court-circuit à la (Figure 55) [57, 58]

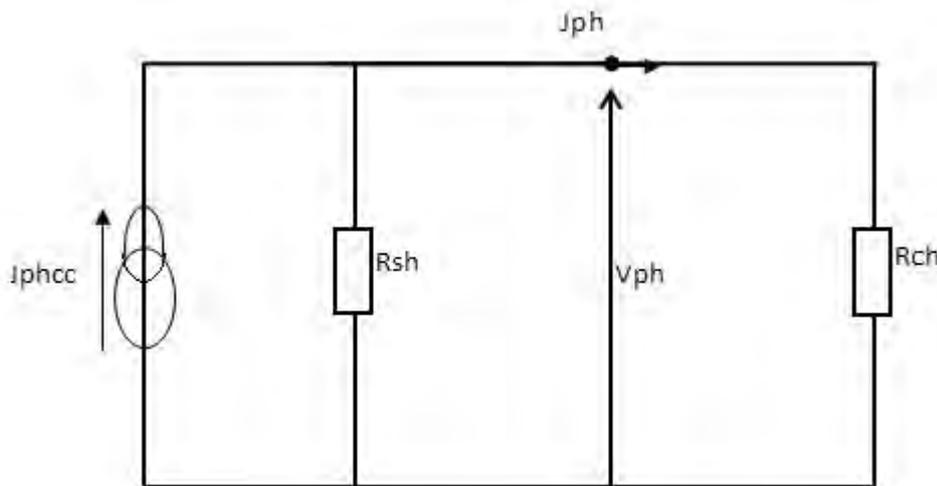


Figure 55: Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en court-circuit.

J_{phcc} : densité de photocourant de court-circuit

R_{sh} : résistance shunt

J_{ph} : densité de photocourant

V_{ph} : phototension

R_{ch} : résistance de charge

La loi à la maille (R_{sh} , V_{ph} , R_{sh}) appliquée à ce circuit permet d'écrire :

$$V_{ph} = R_{sh}(J_{phcc} - J_{ph}) \quad (4-1)$$

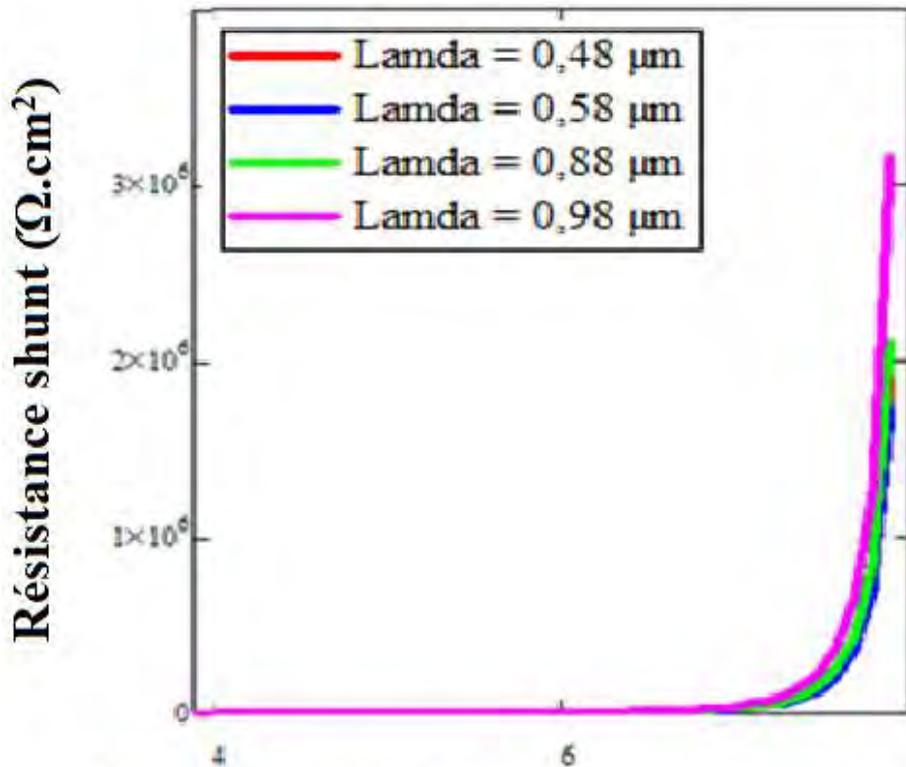
De cette expression, on tire la résistance shunt, qui s'écrit :

$$R_{sh} = \frac{V_{ph}}{I_{cc} - J_{ph}} \quad (4-2)$$

1.3 Variation de la résistance shunt

La résistance shunt découle des recombinaisons des porteurs de charges en volume, en surface et aux interfaces (émetteur-base, contact-émetteur, contact-base) d'une photopile. Elle est aussi indicatrice d'une bonne qualité d'une photopile car lorsqu'elle est grande ou faible, le courant de fuite à travers la photopile est faible ou grand

Représentons à la (Figure 56) les variations de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de longueurs d'onde.



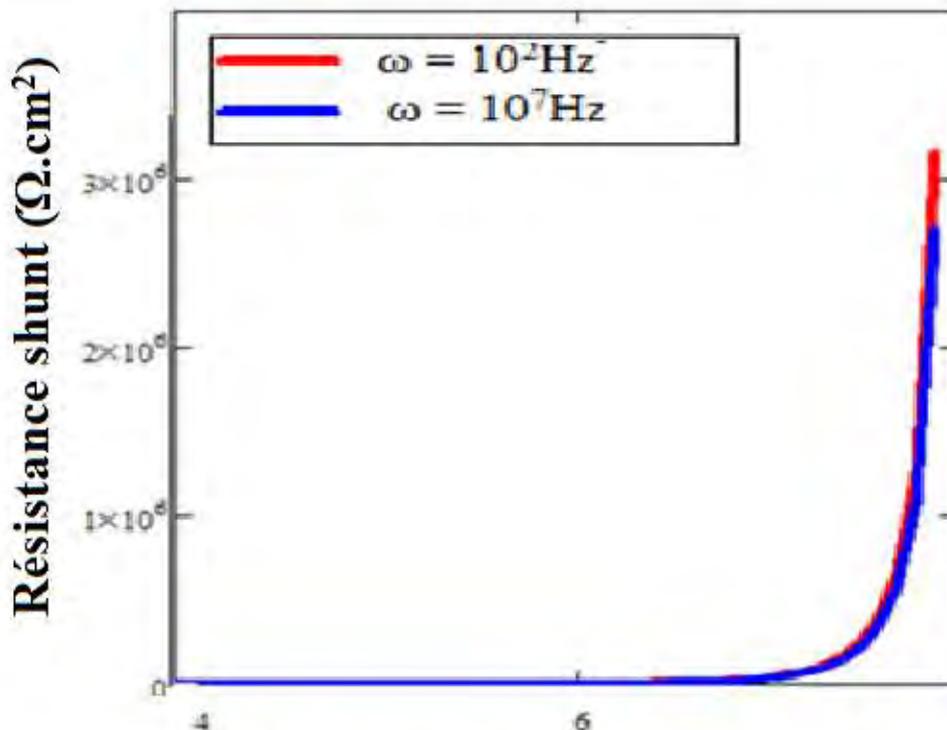
Vitesse de recombinaison à la jonction ($Sf=P.10^P$)

Figure 56: Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $\omega = 10^5 \text{rad.s}^{-1}$.

Nous constatons que pour une longueur d'onde donnée, la résistance shunt est presque nulle lorsque $4.10^4 < Sf < 7.10^7 \text{cm.s}^{-1}$ puis elle augmente de façon exponentielle si Sf est supérieur à 7.10^7cm.s^{-1} .

De plus, nous remarquons qu'une augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation de la résistance shunt si Sf est supérieure à 7.10^7cm.s^{-1} pour les longueurs d'ondes de l'infrarouge. Nous constatons aussi que pour les longueurs d'ondes du visibles une augmentation de celle-ci entraîne diminution de la résistance shunt d'où une augmentation des courants de fuites.

Nous représentons à la (Figure 57) les variations de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la fréquence.



Vitesse de recombinaison à la jonction ($Sf=P.10^P$)

Figure 57:Variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}; \lambda = 0,98 \mu\text{m}$.

Nous observons une augmentation de la résistance shunt avec la fréquence pour des vitesses de recombinaisons supérieur à 7.10^7cm.s^{-1} , tandis qu'elle est quasi nulle $4.10^4 < Sf < 7.10^7 \text{cm.s}^{-1}$, mais nous pouvons dire que pour des vitesses de recombinaison à la jonction grande, l'influence de la longueur d'onde sur la résistance shunt est plus nette que celle de la fréquence ; cela nous permet de dire que la résistance shunt reste peu sensible à la fréquence de modulation.^[40, 59]

1.4 Etude de la résistance série

Les figures 38 et 39 montrent que les caractéristiques courant-tension présentent un palier presque vertical ou la phototension varie faiblement avec le photocourant.

Cela correspond à une source de tension constante quel que soit le courant débité. Cette tension est assimilable à la phototension de circuit ouvert. Comme la photopile n'est pas idéale, elle présente des fuites qui sont caractérisées par la présence dans le circuit équivalent d'une résistance R_s , montée en série avec la source de tension.

Nous proposons à la (Figure 58) un circuit électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne en circuit ouvert.^[57, 58]

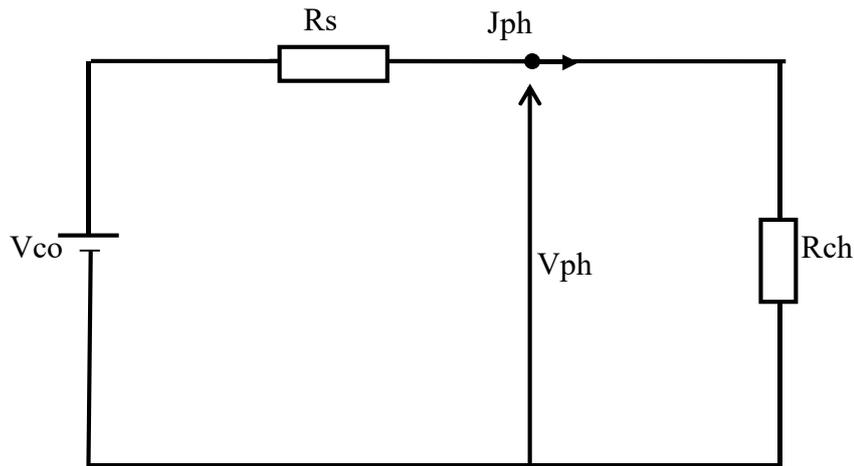


Figure 58:Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en circuit ouvert.

V_{co} : phototension assimilable à la phototension de circuit ouvert

R_s : résistance série

J_{ph} : densité de photocourant

V_{ph} : phototension

R_{ch} : résistance de charge

En appliquant la loi des mailles, on obtient la relation suivante :

$$V_{ph} = V_{co} - R_s \cdot J_{ph} \quad (4-3)$$

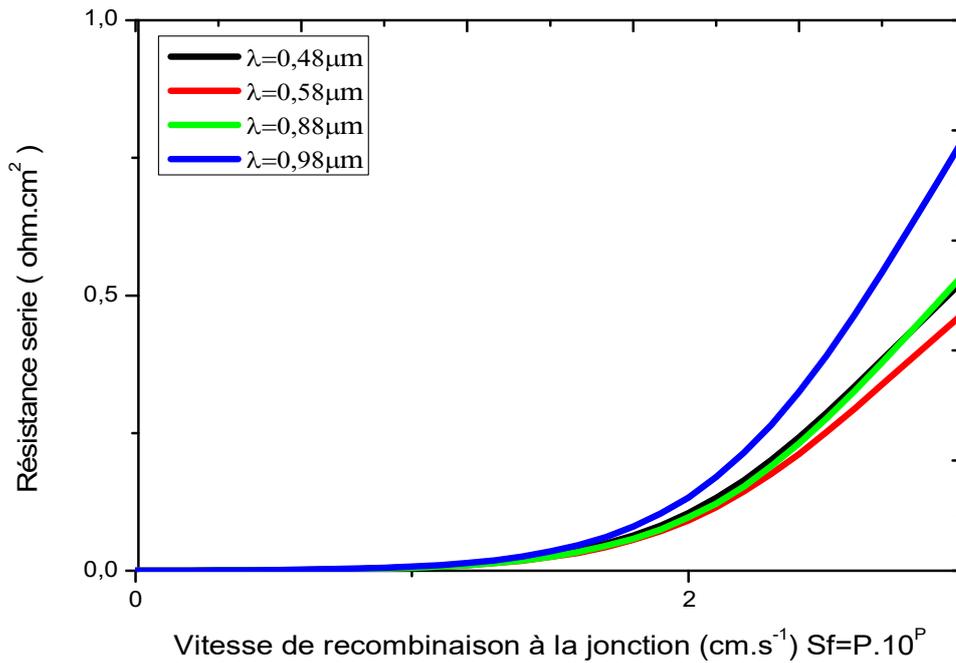
De cette expression, on tire la résistance série, qui s'écrit :

$$R_s = \frac{V_{co} - V_{ph}}{J_{ph}} \quad (4-5)$$

1.5 La variation de la résistance série

La résistance série est l'un des paramètres électriques fondamentaux de la photopile. Elle joue un rôle déterminant sur la qualité d'une photopile. Elle caractérise les effets résistifs du matériau et du dispositif de contact utilisés

Représentons à la (Figure 59) les variations de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f pour respectivement des longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge.



**Figure 59:Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $S_b = S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$;
 $\omega = 10^5 \text{rad.s}^{-1}$**

Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de longueurs d'onde. $S_b = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $\omega = 10^5 \text{rad.s}^{-1}$

La courbe présente deux paliers pour chaque longueur d'onde donnée :

Au premier palier : $S_f < 10 \text{cm/s}$; pour une longueur donnée la résistance série est constante.

Au deuxième palier : $S_f > 10 \text{cm/s}$; pour une longueur d'onde donnée la résistance série augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction.

De plus, une augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation de la résistance série pour les longueurs d'ondes de l'infrarouge. Tandis que pour les longueurs d'ondes du visible une augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de la résistance série.

La figure (Figure 60) représente les variations de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la fréquence

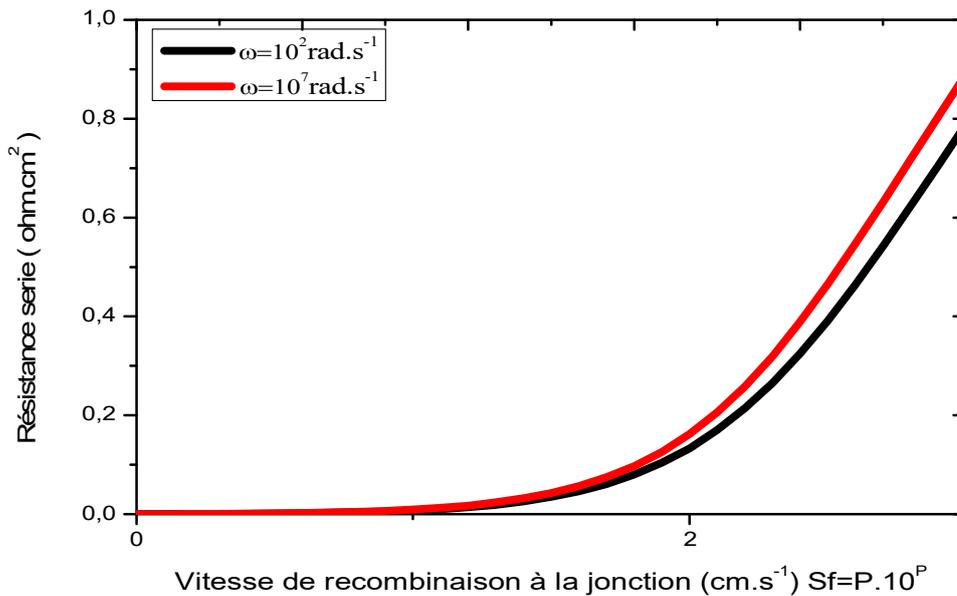


Figure 60: Variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la fréquence. $Sb = 4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$; $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$

La courbe présente deux parties pour une fréquence donnée :

$Sf < 10 \text{cm/s}$; pour une fréquence donnée, la résistance série est constante

$Sf > 10 \text{cm/s}$; pour une fréquence donnée, la résistance série augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction. L'augmentation de la fréquence entraîne une augmentation de la résistance série, ce qui va impacter négativement sur la qualité de la photopile.

De plus, nous constatons que l'influence de la longueur d'onde est plus visible que celle de la fréquence.

1.6 Impédance dynamique

L'impédance dynamique ^[60] est donnée par la relation (4-6) ci-dessous :

$$Z_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n) = \frac{V_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n)}{J_n(\lambda, \omega, Sf_n, Sb_n)} \quad (4-6)$$

Partant de la relation ci-dessus de l'impédance dynamique, nous allons dans ce qui suit nous intéresser aux méthodes de détermination des paramètres électriques, en utilisant la représentation de Nyquist et les diagrammes de Bode de l'impédance dynamique.

1.7 L'impédance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction

L'impédance de la photopile est représentée, à la (Figure 61), en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde:

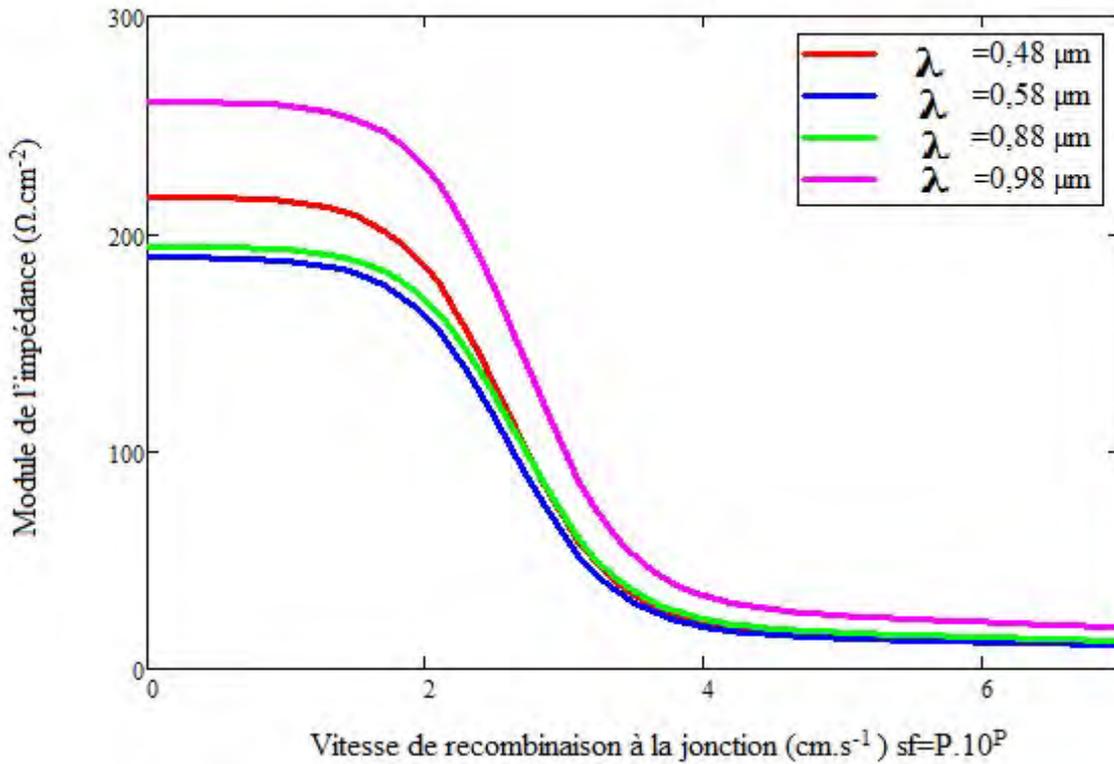


Figure 61: Module de l'impédance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour un éclairage par la face avant $\omega=10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$.

Le module de l'impédance pour une longueur d'onde donnée diminue avec la vitesse de recombinaison à la jonction. En fonctionnement de circuit ouvert de la photopile où la tension est élevée (le photocourant faible), l'impédance reste pratiquement constante tout en étant grande. Mais lorsqu'on se situe en situation de court-circuit, le photocourant devient élevé (la tension faible) d'où l'impédance qui diminue et tend vers zéro pour des grandes valeurs de la vitesse de recombinaison.

1.8 Représentation de Nyquist

Le diagramme de Nyquist ^[60] est la représentation de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la fonction complexe $Z_n(\lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n})$.

$$\text{Im}(Z_n(\lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n})) = f(\text{Re}(Z_n(\lambda, \omega, S_{f_n}, S_{b_n}))) \quad (4-7)$$

Une étude de la représentation de Nyquist nous permet de déterminer la résistance série et la résistance shunt pour un éclairage par la face avant.

1.8.1 Représentation de Nyquist pour un éclairage par la face avant de l'impédance dynamique

La (Figure 62) représente le profil de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance dynamique pour différentes valeurs de la longueur d'onde pour un éclairage par la face avant.

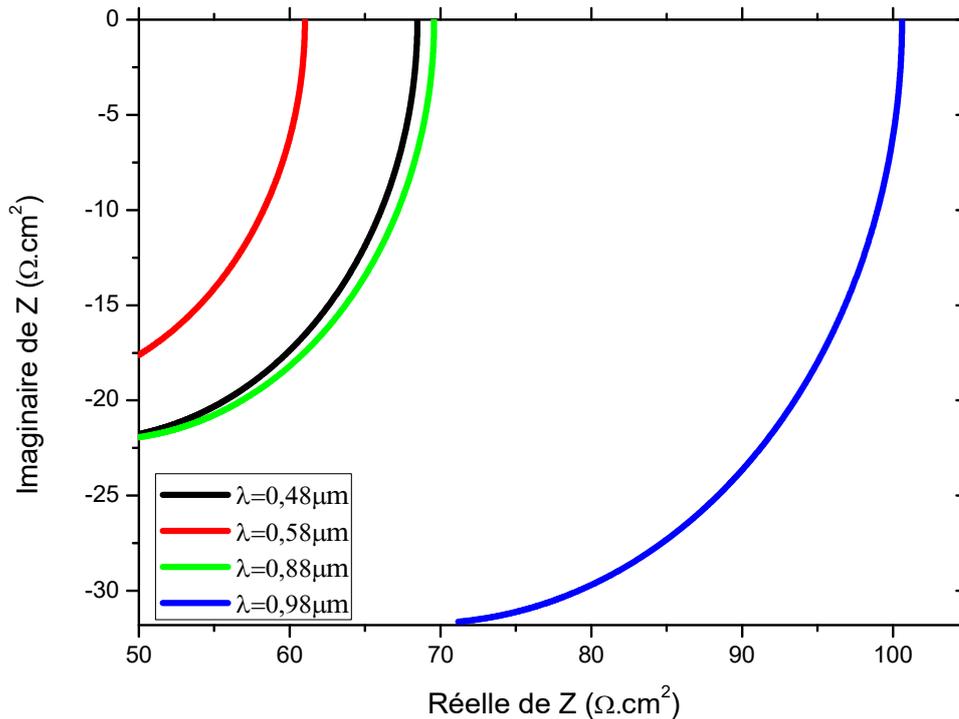


Figure 62: Partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle pour un éclairage par la face avant. $\omega=5.10^5 \text{ rad.s}^{-1}$; $S_b = 3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$

Au niveau de la figure 62, pour une longueur d'onde donnée, la partie imaginaire et la partie réelle de l'impédance ne varient pas dans le même sens. Dans ces conditions, nous notons la présence d'effets inductifs et d'effets capacitifs ; d'où pour la détermination de certains paramètres électriques, par exemple la résistance série, s'avère simple.

De plus, nous obtenons des quart-cercles de centre $\left(\frac{R_{SH}}{2} + R_s \right)$ et de rayon $\left(\frac{R_{SH}}{2} \right)$ en variant

la pulsation de ses valeurs les plus basses aux plus hautes. Pour les faibles valeurs de la pulsation ($\omega \rightarrow 0$) la composante réelle de l'impédance (résistance) est égale à la somme de la résistance série et de la résistance parallèle et la composante imaginaire de l'impédance (réactance) tend vers zéro. Lorsque la pulsation $\omega \rightarrow \omega_c$ la partie imaginaire est égale à $\frac{R_{SH}}{2}$ et la partie réelle est égale $\frac{R_{SH}}{2} + R_s$, ce point correspond à un maximum sur les courbes.

Enfin pour les grandes valeurs de la pulsation ($\omega \rightarrow \infty$) la composante réelle de l'impédance est égale à la résistance série et la composante imaginaire de l'impédance tend vers zéro [61, 62]

Nous notons que pour les grandes valeurs de la pulsation, la photopile a un comportement ohmique du fait que son impédance se résume seulement à sa partie résistive

1.9 Diagramme de Bode de l'impédance

Pour simplifier l'obtention des tracés de réponse en fréquence, le diagramme de Bode [63] est une méthode qui est mise au point.

Il s'agit, dans notre travail d'adapter le concept de Bode aux tracés de l'amplitude de l'impédance de la photopile (en décibels) et de la phase de l'impédance (en degré) en fonction du logarithme de la fréquence angulaire.

$$B_{db} = 20 \cdot \text{Log} (Z_{ph}) \quad (4-8)$$

B_{db} représente l'amplitude de l'impédance

$$\varphi = \text{arg} (Z_{ph}) \quad (4-9)$$

φ la phase de l'impédance

1.9.1 Diagramme de Bode du module de l'impédance

Au (Figure 63), (Figure 64), (Figure 65) et (Figure 66) nous représentons les variations du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde en circuit ouvert.

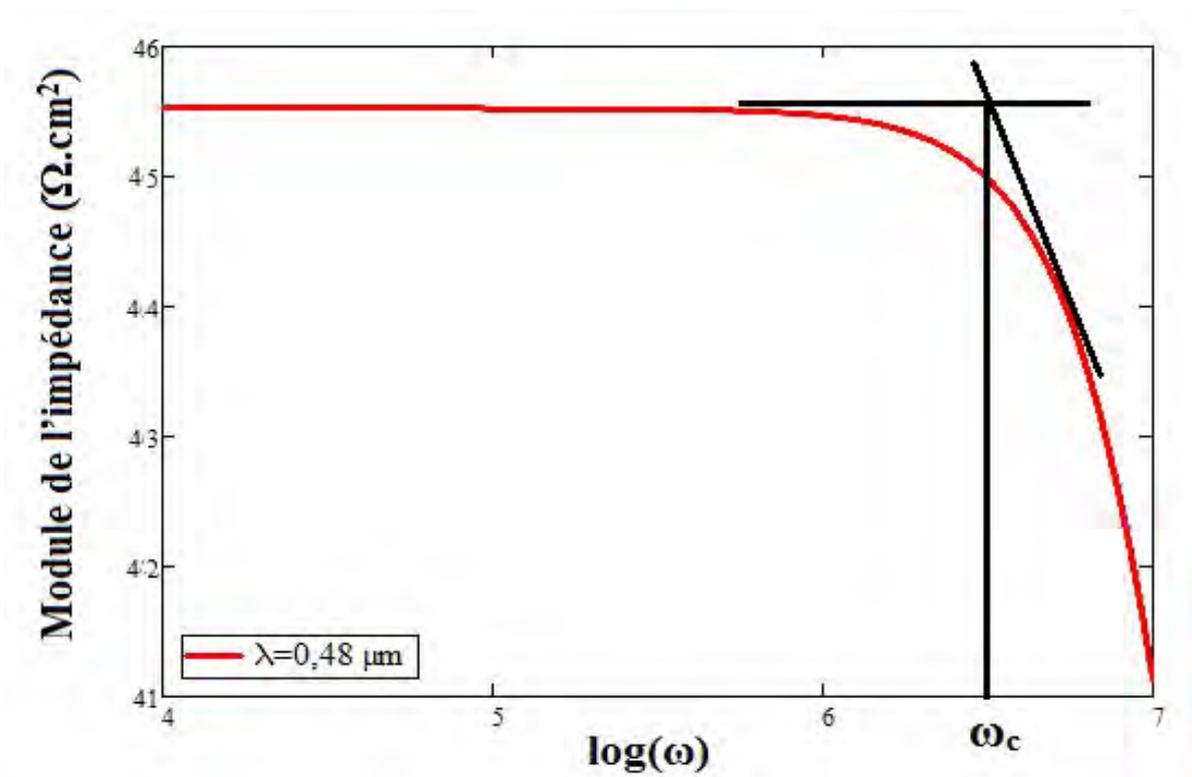


Figure 63: Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f = 3 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $S_b = 4 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

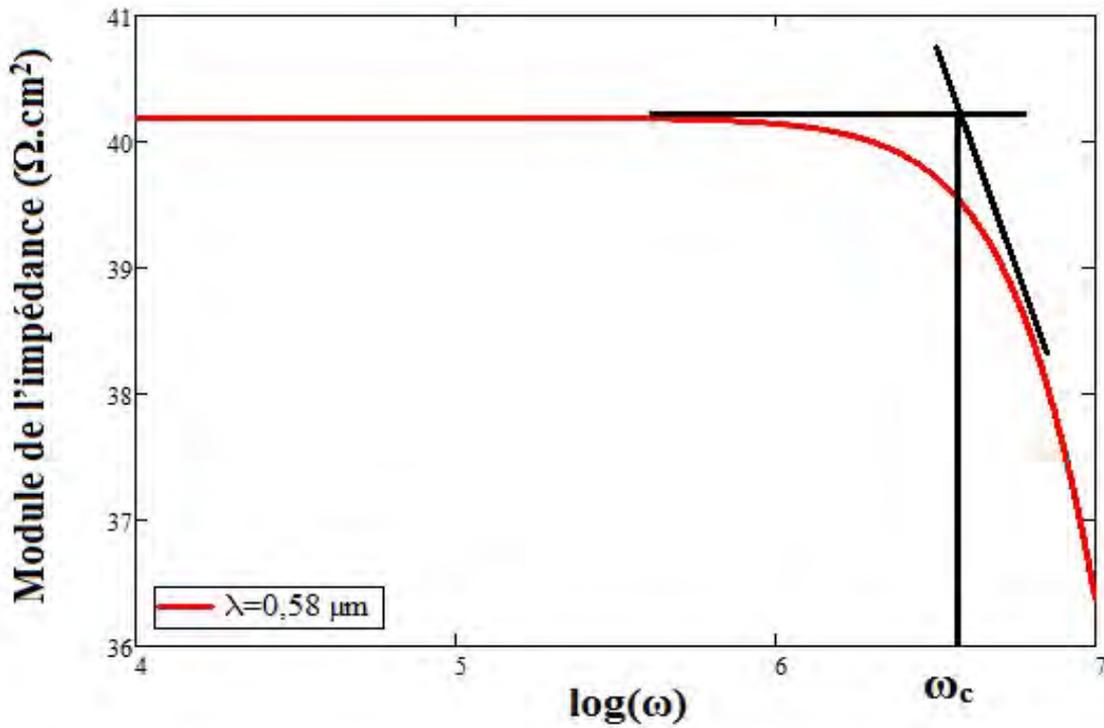


Figure 64: Module de l'impédance en fonction de la fréquence $S_f=3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$

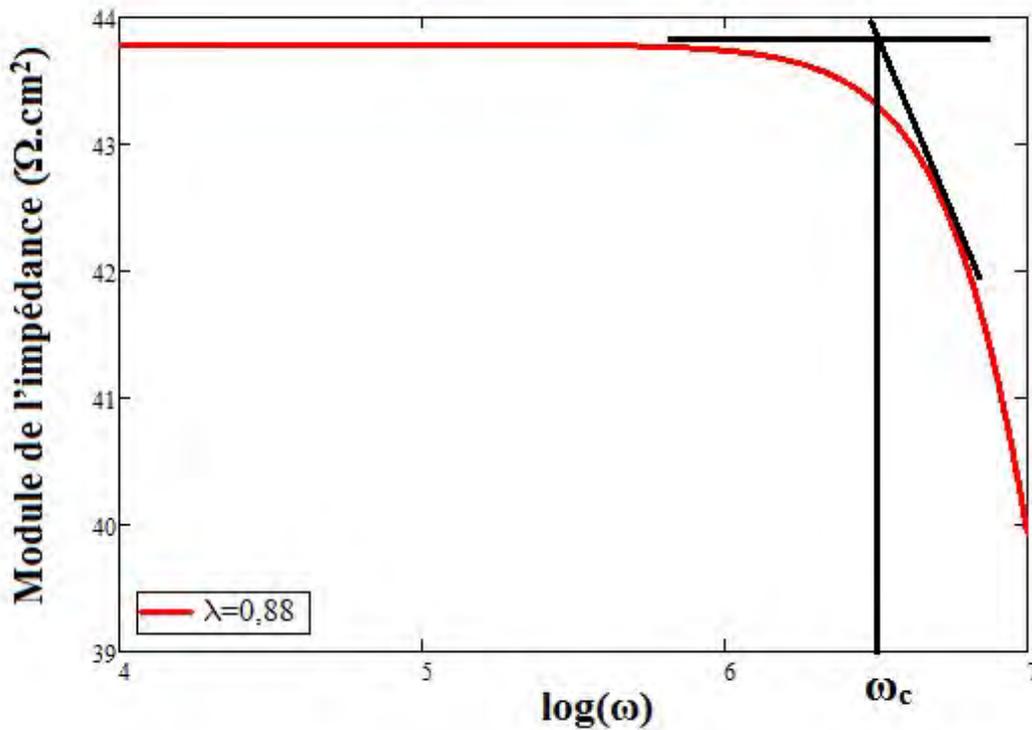


Figure 65: Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f=3.10^3 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$

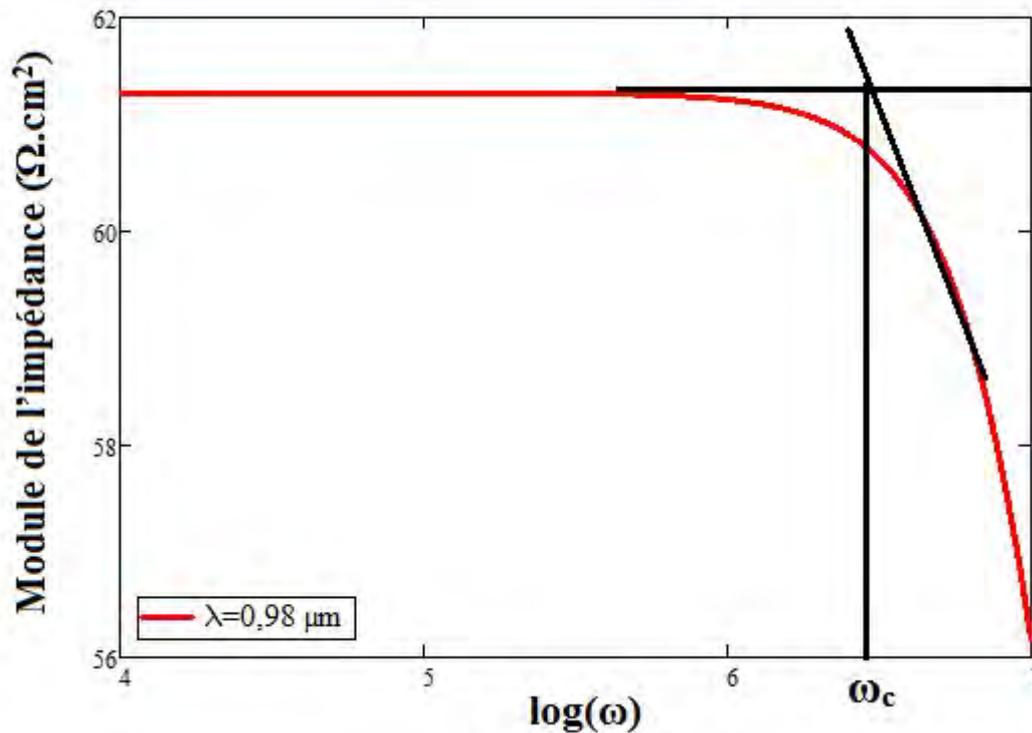


Figure 66: Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f=3.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_b=4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$

Ces deux courbes nous permettent de distinguer deux paliers :

Pour des petites valeurs de longueur d'onde figures 63 et 64

Pour les fréquences angulaires comprises dans l'intervalle $0 < \omega < \omega_c$, le module de l'impédance est indépendant de la pulsation. Et pour les valeurs de la pulsation telle que $\omega > \omega_c$ le module de l'impédance décroît avec la pulsation. Ainsi l'intersection des prolongements de chacune des deux parties linéaires de la courbe permet d'obtenir la fréquence angulaire de coupure ω_c .

Le Tableau 3 ci-dessous donne les valeurs de la pulsation de coupure en fonction des longueurs d'ondes du visible.

TABLEAU 3: Fréquence de coupure en fonction de la longueur d'onde

λ (μm)	Pulsation de coupure (rad/s)
0,48	$6,50.10^4$
0,58	$6,42.10^4$

Le comportement du module de l'impédance en fonction du logarithme de fréquence est comme identique à celui qu'on observe dans des filtres électroniques.

Lorsqu'on augmente la longueur d'onde, la photopile se comporte comme un filtre passe-bas. L'impédance au niveau du filtre passe bas est élevée pour des faibles valeurs de la fréquence.

Dans ce cas la tension de sortie est maximale. Une plus grande partie de l'énergie est dirigée vers la masse si la fréquence augmente et la tension de sortie diminue.

Le filtre passe-bas laisse passer les tensions de basse fréquence et atténue les tensions de haute fréquence. [35]

Un filtre passe-bas, nous permet en général de nous débarrasser des phénomènes parasites. Dans le cadre de notre travail, les phénomènes parasites intrinsèques à la photopile sont les recombinaisons à la jonction et à la face arrière.

Pour des valeurs de la fréquence angulaires comprise entre $0 < \omega < \omega_c$, le module de l'impédance est indépendant de la fréquence. Pour les valeurs de la pulsation telles que $\omega > \omega_c$ le module de l'impédance décroît avec la pulsation.

Dans le

Tableau 4 nous présentons les valeurs de la pulsation de coupure en fonction de la longueur d'onde.

TABLEAU 4:Fréquence de coupure en fonction de la longueur

λ (μm)	Pulsation de coupure (rad/s)
0,88	$6,53 \cdot 10^4$
0,98	$6,40 \cdot 10^4$

Nous remarquons qu'une augmentation de la longueur d'onde, entraîne une diminution de la fréquence angulaire de coupure.

Aux (Figure 67) et (Figure 68) ; nous représentons les variations du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde en court-circuit.

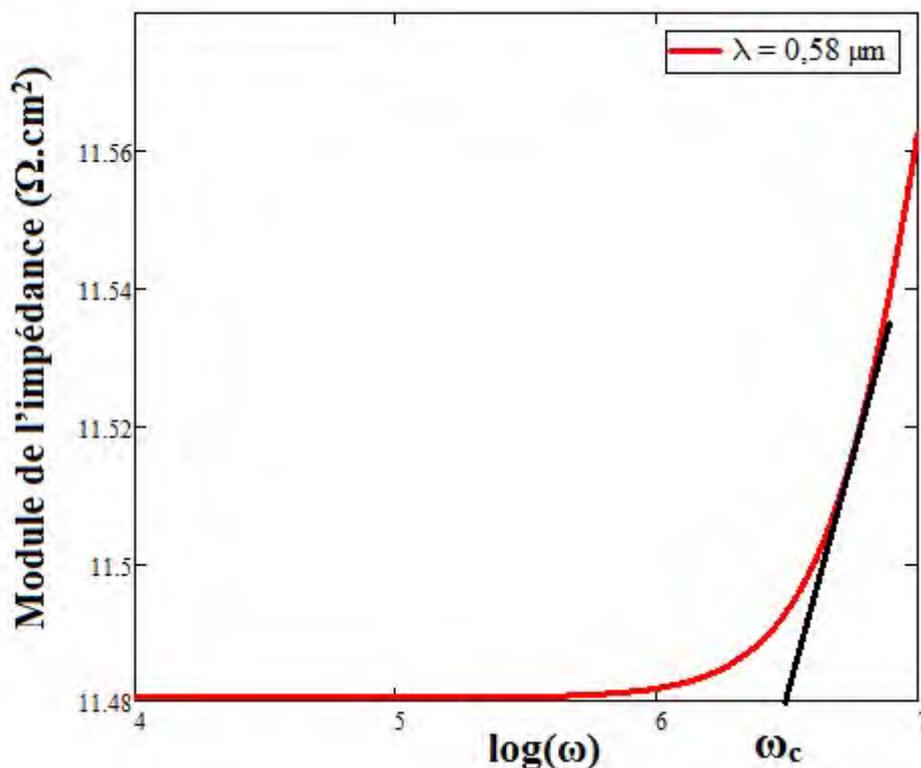


Figure 67:Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f=6 \cdot 10^6 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $S_b=4 \cdot 10^4 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

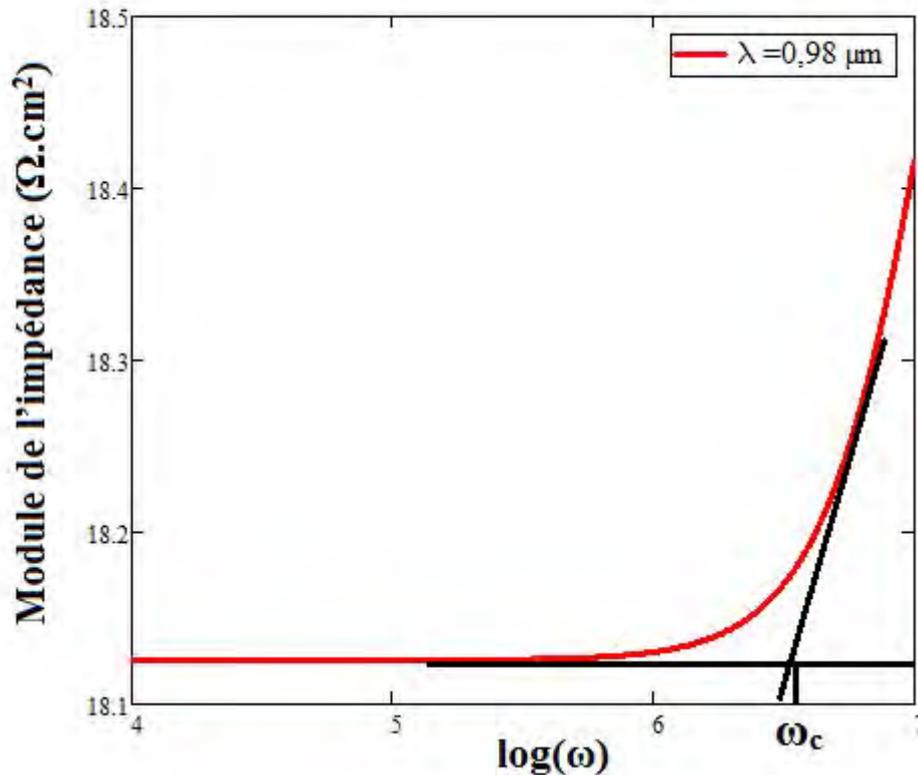


Figure 68: Module de l'impédance en fonction de la fréquence. $S_f=6.10^6 \text{cm.s}^{-1}$, $S_b=4.10^4 \text{cm.s}^{-1}$

Aux figures 67 et 68, pour les fréquences angulaires comprises dans l'intervalle $0 < \omega < \omega_c$, le module de l'impédance est indépendant de la pulsation. Et pour les valeurs de la pulsation telle que $\omega > \omega_c$ le module de l'impédance croît avec la pulsation. Ainsi l'intersection des prolongements de chacune des deux parties linéaires de la courbe permet d'obtenir la fréquence angulaire de coupure ω_c .

Dans le Tableau 5 nous présentons les valeurs de la pulsation de coupure en fonction de la longueur d'onde (court-circuit).

TABLEAU 5: FREQUENCE DE COUPURE EN FONCTION DE LA LONGUEUR

λ (μm)	Pulsation de coupure (rad/s)
0,58	$6,60.10^4$
0,98	$6,40.10^4$

Nous remarquons qu'une augmentation de la longueur d'onde, entraîne une diminution de la fréquence angulaire de coupure.

1.9.2 Diagramme de Bode de l'impédance

Le diagramme de Bode de l'impédance pour un éclairage par la face avant de la photopile est donné aux (Figure 69) et (Figure 70)

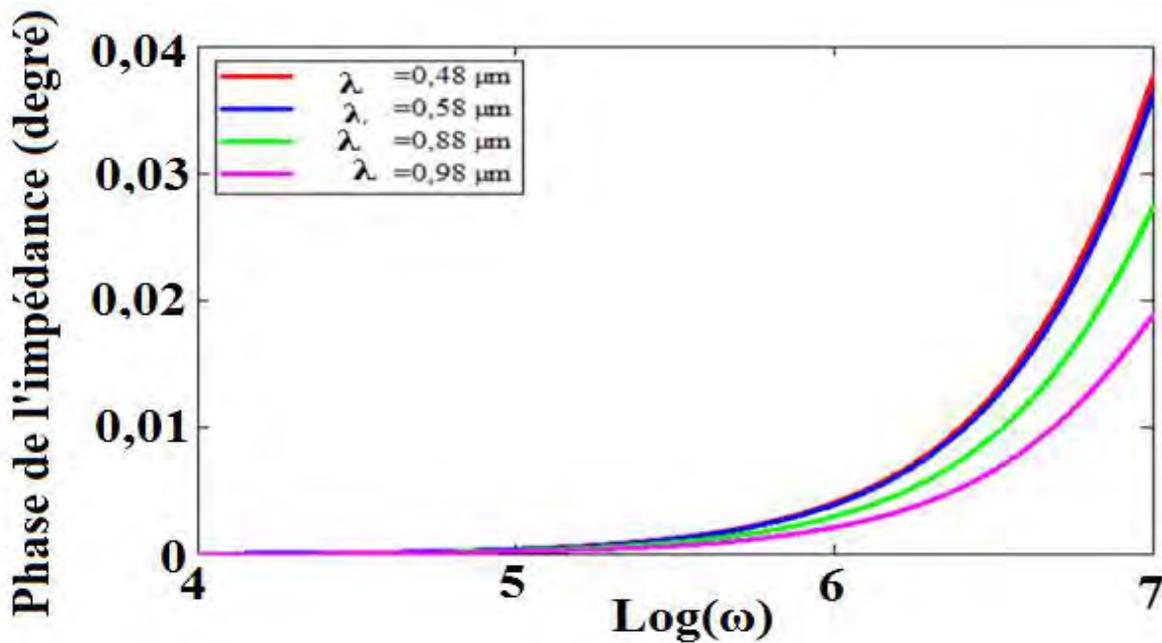


Figure 69: Variation de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence.
 $S_b = 4 \cdot 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_f = 10 \text{ cm.s}^{-1}$ (circuit ouvert).

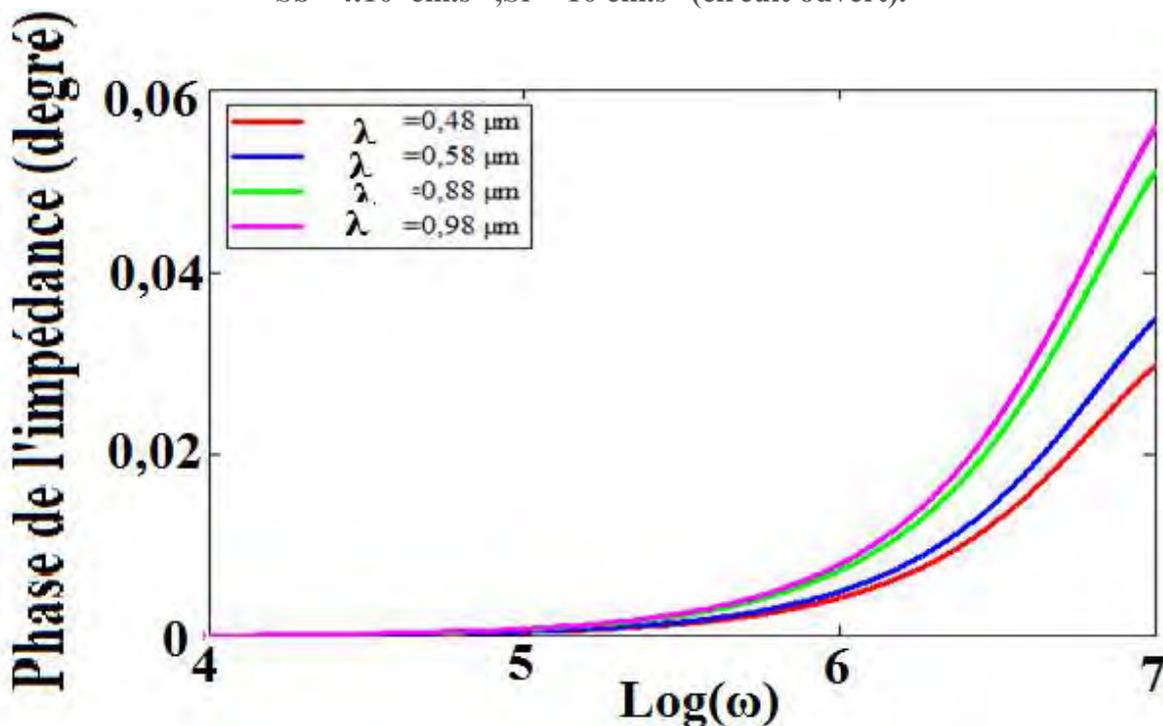


Figure 70: Variation de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence.
 $S_b = 4 \cdot 10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $S_f = 6 \cdot 10^6$ (court-circuit)

Cette représentation de Bode de l'impédance en fonction du logarithme de la fréquence, montre qu'il existe une fréquence en dessous de laquelle la phase est nulle quel que soit la longueur d'onde, c'est le domaine du régime statique. Dans cette zone les phénomènes inductifs et capacitifs se compensent. Au-delà de cette fréquence, pour une longueur d'onde donnée la phase croît avec l'augmentation de la fréquence. L'un de ces phénomènes est prédominant. Cette phase reste positive car dans ces conditions d'étude, les effets inductifs l'emportent sur les effets capacitifs

1.10 Modèle électrique équivalent de la photopile

Dans le but de contrôler la qualité de la photopile, les paramètres électriques (résistance série, résistance shunt, inductance et la capacité) sont déterminés.

Différents types de circuits électriques équivalent de la photopile ont été proposés :

D'abord nous allons présenter le modèle à exponentielle simple ou à une diode et ensuite un modèle à double exponentielle ou à deux diodes.

Pour le modèle à une diode, nous avons une forme de représentation schématique d'une photopile en circuit électrique où l'on considère que la photopile est un générateur de courant avec ses différents éléments électriques placés dans un circuit caractérisant ainsi les phénomènes de résistivité, de fuite, de conductance, et de capacité [36, 64].

Dans ce modèle à une diode, les effets capacitifs de la zone de charge d'espace peuvent être mis en exergue en remplaçant la diode par une capacité de diffusion, une capacité de transition et une résistance en parallèle.

Le modèle électrique à une diode en régime dynamique est représenté à la (Figure 71):

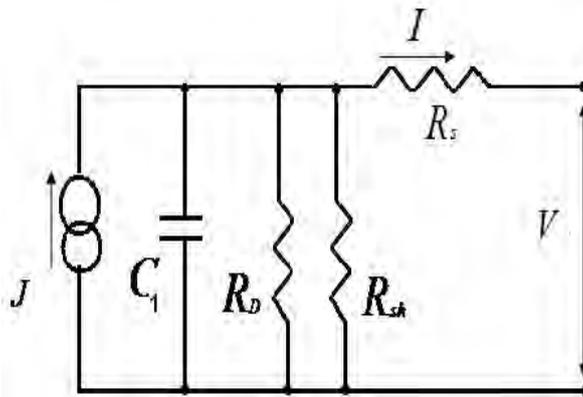


Figure 71: Circuit équivalent avec le modèle à une diode.

Ensuite, dans le modèle à deux diodes, la diode modélisant les phénomènes de diffusion est remplacée par une capacité de diffusion, une capacité de transition et une résistance en parallèle et la diode modélisant les centres de recombinaison est remplacée par une autre résistance dynamique et une capacité de diffusion issues des centres de recombinaison.

Le module électrique à deux diodes en régime dynamique fréquentiel est représenté par la (Figure 72)

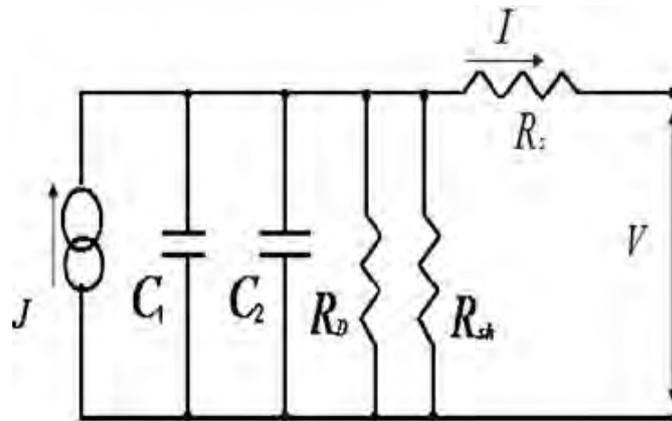


Figure 72: Circuit équivalent avec le modèle à deux diodes.

C_1 est la somme de C_D et C_T

C_D est la capacité de diffusion de la zone de charge d'espace.

C_T est la capacité de transition.

C_2 est la capacité due aux centres recombinaisons dans la zone de charge d'espace

R_{sh} et R_D sont des résistances qui modélisent les courants de fuite existant au bord de la structure et l'ensemble des défauts au voisinage de la zone de charge d'espace (dislocation, joints de grain).

R_S modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc des métallisations.

Dans cette étude nous avons utilisé la méthode de détermination des paramètres électriques proposée par les articles cités dans le chapitre II. Nous avons apporté notre contribution, car les modèles électriques existants ne pouvaient pas expliquer tous les résultats que nous avons obtenus. En effet nous avons constaté que :

La phase de l'impédance prend des valeurs positives lorsque la longueur d'onde λ est égale $0,48\mu\text{m}$, $0,58\mu\text{m}$, $0,88\mu\text{m}$, $0,98\mu\text{m}$, ce qui signifie que la photopile a un comportement inductif (présence d'une bobine).

Cette remarque ci-dessus nous permet de proposer un modèle électrique équivalent d'une cellule solaire en régime dynamique fréquentiel (Figure 73)

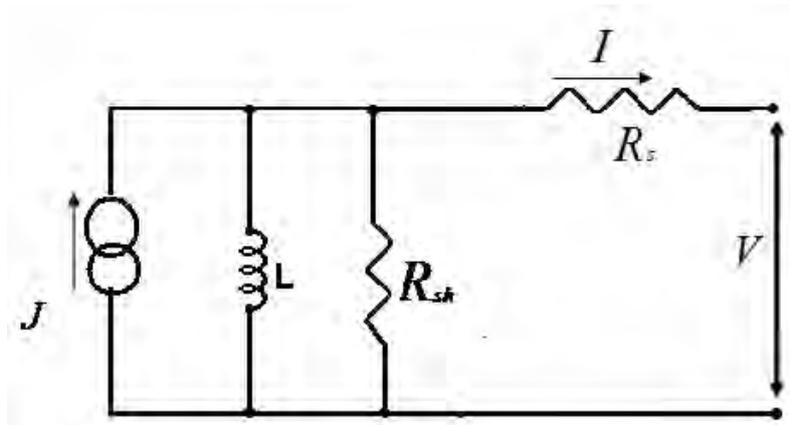


Figure 73: Circuit équivalent

R_{sh} est la résistance shunt qui modélise les courants de fuite existant au bord de la structure et l'ensemble des défauts au voisinage de la zone de charge d'espace (dislocation, joints de grains).

R_S modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc des métallisations.

- L modélise les effets inductifs.

1.11 Puissance électrique de la photopile

1.11.1 Expression de la puissance

Pour un éclairage monochromatique de la photopile de longueur d'onde (λ_i), la puissance électrique de celle-ci est donnée par la relation suivante :

$$P = I \cdot V_{ph} \quad (4-5)$$

1.11.2 Etude de la puissance en fonction de la tension et de la vitesse de recombinaison a la jonction

Représentons à la (Figure 74) les variations de la puissance en fonction de la tension pour différentes longueurs d'onde

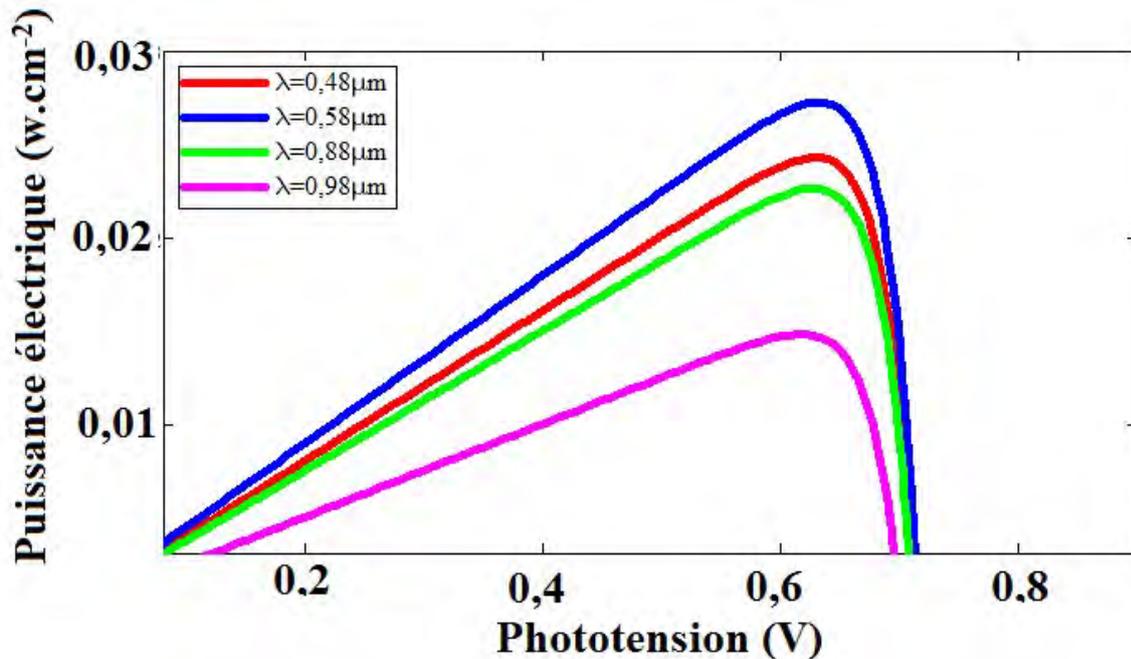


Figure 74: Variation de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de la longueur d'onde. $S_b = 4.10^4 \text{ cm.s}^{-1}$, $\omega = 10^5 \text{ rad.s}^{-1}$

Nous constatons qu'au niveau des quatre courbes, la puissance en fonction de la phototension présente les mêmes allures. La puissance varie linéairement avec la phototension jusqu'au voisinage de la valeur limite qui correspond au maximum de puissance. Lorsque la phototension tend vers sa valeur du circuit ouvert, la puissance diminue pour s'annuler. L'augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de la puissance maximale pour les grandes valeurs de longueur d'onde, tandis que pour les petites valeurs de longueurs d'onde l'augmentation de la longueur d'onde entraîne une augmentation de la puissance maximale.

On s'attend donc à une diminution de la qualité de photopile ^[65] en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour un éclairage par la face avant de la photopile.

La valeur de la puissance permet de définir le facteur de forme et le rendement de conversion de la photopile.

1.11.3 Facteur de forme

Le facteur de forme FF ^[36, 66] est le rapport entre la puissance maximale fournie par la photopile P_{max} et le produit du courant de court-circuit J_{cc} par la tension en circuit ouvert V_{co} son expression est donnée par la relation (4-6):

$$FF(\lambda, \omega, S_f, S_b) = \frac{P_{max}(\lambda, \omega, S_f, S_b)}{V_{co}(\lambda, \omega, S_f, S_b) \cdot J_{cc}(\lambda, \omega, S_f, S_b)} \quad (4-10)$$

Le terme V_{co} représente la tension en circuit ouvert et est calculé à partir de l'expression (3-20) de V_{ph} pour les valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f) très faibles.

Quant à J_{cc} , il représente la densité courant de court-circuit et est donné par la relation (3-19) pour des valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f) très élevée.

Le facteur de forme sert à évaluer la qualité de la photopile.

1.12 Conclusion

La détermination des paramètres électriques (résistance série, résistance shunt, inductance et la capacité) que nous venons de faire, nous a permis à partir de la représentation de Bode et de Nyquist de représenter un modèle électrique à une diode en régime dynamique. Cela nous a aussi autorisés de déterminer les phénomènes prédominants entre les effets inductifs et les effets capacitifs. Grace à cette étude nous avons aussi pu déterminer la puissance et le facteur de forme de la photopile.

CONCLUSION GENERALE

La production mondiale d'énergie photovoltaïque augmente de manière très importante depuis plus d'un demi-siècle, mais son développement reste lié au coût élevé par rapport aux énergies fossiles et nucléaires. Cependant, l'utilisation des substrats minces afin de diminuer le prix du watt d'électricité, produite par le photovoltaïque conduit au développement de nouveaux matériaux semi-conducteurs, considéré actuellement comme matériaux promoteurs pour les applications photovoltaïques. Parmi ces matériaux nous pouvons citer la filière photovoltaïque à base de couches minces de diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe_2 noté CIS) et de ses alliages avec du gallium pour donner le diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CuInGaSe_2 noté CIGS). Par rapport au silicium, les cellules solaires à base de CIGS présentent une efficacité élevée, une bonne stabilité, une bonne résistance aux irradiations et une durée de vie élevée.

Dans ce travail, nous avons présenté une étude en modélisation, à une dimension, d'une photopile monofaciale à base de CIGS en régime dynamique fréquentiel sous éclairage monochromatique. Nous avons présenté les généralités sur les différentes sources d'énergies et de la cellule solaire à base de CIGS. Dans l'étude bibliographique, nous avons présenté un certain nombre d'articles relatifs aux méthodes de détermination des paramètres de recombinaison des porteurs minoritaires de charge dans la base pour différentes photopiles à base du CIGS en régime dynamique fréquentiel. Des modèles électriques, quelques paramètres tels que la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}) et l'impédance (Z), ont été déterminés. En outre, de l'expression de la densité des porteurs chargés minoritaires en excès de la photopile en régime dynamique fréquentiel, les expressions du photocourant, de la phototension, de la capacité de diffusion et des vitesses de recombinaisons, ont été obtenues en fonction de la fréquence de modulation et de la longueur d'onde. Leurs profils ont présenté des résultats indiquant une meilleure qualité de la photopile pour les longueurs d'ondes du visible.

De plus, la détermination des paramètres électriques tels la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}), la fréquence de coupure (ω_c), la capacité (C), l'impédance (Z), la puissance et le facteur de forme de la photopile monofaciale au CIGS, a été faite.

L'utilisation des diagrammes de Nyquist et de Bode, nous a permis à proposer des modèles électriques équivalents de la photopile. Enfin, nous avons déterminé la puissance électrique et le facteur de forme de la photopile.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de montrer que pour une meilleure optimisation des paramètres électriques des photopiles, il faut tenir compte à chaque fois de l'influence des paramètres microscopiques.

Ce travail sur les techniques de détermination des paramètres électriques d'une photopile monofaciale à base de CIGS en régime dynamique fréquentiel, pourrait se poursuivre sur :

- la même photopile avec un éclairage multi spectral,
- la même photopile à jonction verticale,
- la même photopile avec un éclairage simultané des deux faces,
- la même photopile en régime dynamique transitoire pour différents types d'éclairage.

Bibliographie et Webographie

- [1] wikipedia.org. Oxyde d'indium-étain . Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Oxyde_d'indium-%C3%A9tain (Consulté le 15 mai 2016)
- [2] Ricaud, A., 1997. Photopiles solaires : de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés. Livre imprimé : Français., Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suisse, 331.
- [3] Abdelhak, A., 2006. Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques. Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2006. Français., Toulouse III, Français; 181.
- [4] Guillemole, J. F., 1999. Conférence européenne de recherche sur les matériaux à Strasbourg: Un semi-conducteur plus doué que le silicium : Advanced Materials (Eds.) Nouvelles du solaire photovoltaïque Strasbourg, France, 632.
- [5] Bard, A. J., 1979. Photoelectrochemistry and heterogeneous photo-catalysis at semiconductors. Photochemistry. 10: 59-75.
- [6] Labbé, J., 2006. L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, France; 220.
- [7] iter.org/fr/proj/inafewlines. <https://www.iter.org/fr/proj/inafewlines>: (consulté en janvier 2017)
- [8] wikipedia.org. https://fr.wikipedia.org/wiki/Fission_nucléaire: (Consulté en décembre 2017)
- [9] statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-ene. <https://www.bp.com/.../bp/.../statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-ene..>
combination of primary official sources and third-party data. Find more online. For 64 years, the BP Statistical Review of World Energy has provided high-quality (Consulté en mars 2017)
- [10] planetoscope. <http://www.planetoscope.com/Source-d-energie/1467-production-mondiale-de-charbon.html>: (Consulté en janvier 2016)
- [11] Charbon. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Charbon>: (Consulté 20 mars 2015)
- [12] naturel, G. https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_naturel: (Consulté en décembre 2016)
- [13] Cleangasworld. <http://www.cleangasworld.com/automotive/cng-cars-can-reduce-pollution>: (Consulté le 15 Avril 2016)
- [14] énergies, C. d. <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/formation-du-petrole>: (Consulté le 2 mai 2017)
- [15] éolienne, E. https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne: (Consulté le 10 mars 2016)
- [16] wikipedia.org. https://fr.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems: (Consulté le 29 mai 2016)
- [17] Doctissimo, E. http://environnement.doctissimo.fr/economiser-l-energie/energies_renouvelables/solaire_solution-d-avenir-.html (Consulté le 15 Mai 2015)
- [18] Nantes, S. U. D., Consulté le 10 Mai 2015.
<http://www.sciences.uninantes.fr/physique/recherche/lamp/fr/photop/part3.pdf>
- [19] Naghavi, N., Abou-Ras, D., Allsop, N., Barreau, N., Bücheler, S., Ennaoui, A., Fischer, C. H., Guillen, C., Hariskos, D., J. Herrero, J., Klenk, R., Kushiya, K., Lincot, D., Menner, R., Nakada, T., Björkman, C. P., Spiering, S., Tiwari, A. N. Törndahl, T., 2010. Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)₂ based thin film photovoltaics: present status and current developments. Progressing Photovoltaics: Research and Applications. 18: 411–433.
- [20] Rau, U., Grabitz, P. O. Werner, J. H., 2004. Resistive limitations to spatially electronic losses in solar cells. Applied Physics Letters. 24: 6010–6012.

- [21] Seyrling, S., A. Chirila, A., Güttler, D., Blösch, P., Pianezzi, F., Verma, R., Bücheler, S., Nishiwaki, S., Romanyuk, Y. E. Rossbach, P., 2011. Cu(In,Ga)Se₂ growth process modifications : Influences on microstructure, Na distribution, and device properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95: 1477–1481.
- [22] Turcu, M., Kötschau, I. M. Rau, U., 2002. Composition dependence of defect energies and alignments in the Cu(In,Ga)(Se,S)₂ alloy system. *Applied Physics*. 91: 1391-1399.
- [23] Paulson, P. D., Birkmire, R. W. Shafarman, W. N., 2003. Optical characterization of Cu(In,Ga)Se₂ alloy thin films by spectroscopic ellipsometry. *Appl. Phys. Lett.* 94: 879-888.
- [24] Jung, S., Ahn, S. J., Yun, J. H., Gwak, J., Kim, D. Yoon, K., 2010. Effects of Ga contents on properties of CIGS thin films and solar cells fabricated by co-evaporation. *Current Applied Physics*. 10: 990–996.
- [25] Gray, J. L., 2011. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd Edition. Academic, scientific, and professional books since 1807, Ergode books (Rich,ond, TX, U.S.A.), 1164
- [26] Shin, D. H., Shin, Y. M., Kim, J., Ahn, B. T. Yoon, K. H., 2012. Control of the Preferred Orientation of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film by the Surface Modification of Mo Film. *The Electrochemical Society*. 159: B1-B5.
- [27] Chaisitsak, S., Yamada, A. Konagai, M., 2002. Preferred Orientation Control of Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂(x=0.28)Thin Films and Its Influence on Solar Cell Characteristics. *Applied Physics*. 41: 507–513.
- [28] Yoon, J. H., Kim, W. M., Park, J. K., Baik, Y. J., Seong, T. Y. Jeong, J. H., 2012. Control of the preferred orientations of Cu(In,Ga)Se₂ films and the photovoltaic conversion efficiency using a surface-functionalized molybdenum back contact. *Progress in Photovoltaics: Research and Application*. 22: 69–76.
- [29] Contreras, M. A., Jones, K. M., Gedvilas, L. Matson, R., 2000. Preferred Orientation in Polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ and Its Effect on Absorber Thin-Films and Devices. *National Renewable Energy Laboratory, Glasgow, Scotland, U.K, May.7: 1-5*
- [30] Gray, J. L., 2011. *The Physics of the Solar Cell*. In: Luque, A. Hegedus, S. (Eds.) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd Edition. academic, scientific, and professional books since 1807., Washington,USA, 82–129.
- [31] HuaiWei, S., Zhang, S. B. Zunger, A., 1998. Effects of Ga addition to CuInSe₂ on its electronic, structural, and defects properties. *Applied Physics Letters*. 72: 3199 -3201.
- [32] Jackson, P., Würz, R., Rau, U., Mattheis, J., Kurth, M., Schlötzer, T., Bilger, G. Werner, J. H., 2007. High quality base line for high efficiency,Cu(In,Ga)Se₂ solar cells. *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*. 15: 507-519.
- [33] Anil Kumar, R., Suresh and, M. S. Nagaraju, J., 2001. Measurement of solar Cell AC parameters of Gallium Arsenide. (GaAs/Ge) solar cell by impedance spectroscopy”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.48,. No.9, pp 2177-2179, using Impedance Spectroscopy. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 48:
- [34] Chenvidhya, D., Kirtikara, K. Jivacate, C., 2003. A new characterization method for solar cell dynamic impedance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 80: 459-464.
- [35] Charles, J. P., Mekkaoui-Alaoui, I., Bordure, G. Mialhe, P., 1984. Etude comparative des modèles à une et deux exponentielles en vue d’une simulation précise des photopiles. *Physique appliquée*. 19: 851 – 857.
- [36] Kumar, R. A., 2000. Measurement of solar Cell ac parameters using Impedance Spectroscopy. *Departement of Instrumentation Indian Institue of Science, India; Institute of Science, Bangalore*

Bibliographie et Webographie

- [37] Charles, J. P., Mekkaoui, A. I., Bordure, G. Mialhe, P., 1984. Etude comparative des modes a une et deux exponentielles en vue d'une simulation precise des photopiles. *Physique Appliquee*. 19: 851-860.
- [38] Bouda, M., Barro, I. F., Zerbo, I., Lemrabott, O. H., Zougmore, F. Sissoko, G., 2001. A modelling for ac photo conductance response of a n⁺-p-p⁺ crystalline silicon monochromatic light. *Journal des Sciences*. 1: 29-40
- [39] Bocande, y. L. B., Correa, A., Gaye, I., Sow, M. L. Sissoko, G., 1994. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibiti'on, Poster 1 H, 12-16 Oct. . World Renewable Energy Congress. 11: 1698-1700.
- [40] Zerbo, I., Barro, F. I., Mbow, B., Diao, A., Zougmor, F. Sissoko, G., 2004. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, Paris, 7-11 June 2004. In: (Eds.) *Theoretical Study of Bifacial Silicon Solar Cell Under Frequency Modulated White Light: Determination of Recombination Parameters* Dakar,Sénégal, 258-261.
- [41] Mandelis, J. A., science. Appl. Phys. Effect of junction recombination velocity of electrical parameters of a vertical parallel silicon solar cell under frequency modulation. 66: 5572 – 5583.
- [42] Ahmed, F. Garg, S., 1986. International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Simultaneous determination of diffusion length, lifetime and diffusion constant of minority carriers using a modulated beam. *International Centre for Theoretical Physics, Trieste (Italy)* 18: 1-8
- [43] Fraga, D., Lyubenova, T. S., Martí, R., Calvet, I., Barrachina, E. Carda, J. B., 2016. Ecologic ceramic substrates for CIGS solar cells. *ceramint*. 10: 1-25
- [44] Koschier, L. M., Wenham, S. R., Mark Gross, M., Tom Puzzer, T. Alistair, A. B., 1898. Sproul.2nd Word Conference and exhibition on photovoltaic. *Solar Energy Conversion*. 1539-1542.
- [45] Zerbo, I., 2005. Etude en modélisation d'une photopile bifaciale au silicium sous éclairément multispectral en régime dynamique fréquentiel : méthodes de détermination des paramètres de recombinaison . Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou Burkina Fasso, Burkina Fasso;
- [46] Dugas, J., 1994. 3D modelling of a reverse cell made with improved multicrystalline silicon wafers. . *Solar Energy materials and Solar Cells*. 32: 71-88
- [47] Matur, U. C., Akyol, S., Baydoğan, N. Cimenoglu, H., *The Optical Properties of CIGS Thin Films Derived by Sol-gel Dip Coating Process at Different Withdrawal Speed*. doi:10.1016/j.sbspro.2015.06.328. 328.
- [48] Barro, I. F., Mbodji, S., Ndiaye, A. L., Madougou, S., Zerbo, I., Zougmore, F. Sissoko, G., 2006. Equivallent electric circuit of a bifacial solar cell in transient state under magnetic field. *Proceeding of the 21st European photovoltaic Solar Energy Conference*. In: (Eds.) *Solar Energy Conference*. Dresden, Germany,447-450
- [49] Faraj, M. G., Ibrahim, K. Salhin, A., 2012. Effects of Ga concentration on structural and electrical properties of screen printed-CIGS absorber layers on polyethylene terephthalate. *Materials Science in Semiconductor*. In: (Eds.) 206–213.
- [50] U. Canci Matur, S. A., N. Baydogan, H. Cimenoglu, 2015. *The Optical Properties of CIGS Thin Films.Derived by Sol-gel Dip Coating Process at Different Withdrawal Speed*. . *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 195:
- [51] Faraj, M. G., Ibrahim, K. Salhin, A., 2012. Effects of Ga concentration on structural and electrical properties of screen printed-CIGS absorber layers on polyethylene terephthalate. *Materials Science in Semiconductor*. 15: 206–215
- [52] Barro, I. F., Mbodji, S., Ndiaye, A. L., Madougou, S., Zerbo, I., Zougmore, F. Sissoko, G., 2006. 3D modeling of a bifacial polycrystalline silicon solar cell in order to exhibite the effect of Grain size and grain boundary on the recombination parameters under a constant white

Illumination

Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition -Dresden, Germany (2006) pp. 451-454

- [53] B. Terheiden, G. H., P. Fath, E. Bucher, 2000. Proceeding of the 16th European photovoltaic Solar Energy Conference. In: (Eds.) Glasgow, UK,
- [54] Furue, S., Ishizuka, S., Yamada, A., Iioka, M., Higuchi, H., Shibata, H. S. Niki, S., Cu(In,Ga)Se₂ solar cells and mini-modules fabricated on thin soda-lime glass substrates. *Energy Mater. Sol. Cells.* 119: 163–168.
- [55] Kessler, F. Rudmann, D., 2004. Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules. *Sol. Energ.* 77: 685–695.
- [56] Faraj, M. G., Ibrahim, K. Salhin, A., 2012. Effects of Ga concentration on structural and electrical properties of screen printed-CIGS absorber layers on polyethylene terephthalate. *Materials Science in Semiconducto.* In: (Eds.) 206–215.
- [57] Mobdj, S., Ly, I., Dioum, A., Diallo, H. L., Barro, I. F. Sissoko, G., 2006. Equivalent electric circuit of a bifacial solar cell in transient state under magnetic field
Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - Dresden, Germany (2006) pp.447-450
- [58] Diallo, H. L., Maiga, A. S., Wereme, A. Sissoko, G., 2008. New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell. *Eur Phys J App Phys.* 42: 203-211.
- [59] Madougou, S., Made, F., Boukary, M. S. Sissoko, G., 2007. Characteristics for Bifacial Silicon Solar Cell studied under a Magnetic field. . *Advanced Materials Research* vols. 18: 303-312.
- [60] Lathi, Bhagwandas Pannalal, 2012. Signals, systems and controls. In: (Eds.) The Bode diagram provides information about the frequency behavior of a system. New York, 1973-1974.
- [61] Ndiaye, M., Nouhou Bako, Z., Zerbo, I., Dieng, A., Barro, F. I. Sissoko, G., Determination Des Parametres Electriques D'une Photopile Sous Eclairage Monochromatique En Modulation De Frequence, A Partir Des Diagrammes De Bode Et De Nyquist. *Journal des sciences.* 8: 59-68.
- [62] Dieng, A., Thiam, N., Samb, M. L., Maiga, A. S., Barro, F. I. Sissoko, G., 2009. Etude à 3D d'une photopile polycrystalline au silicium: influence de la taille des grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grain sur les paramètres électriques *Journal des Sciences.* 9: 51-63.
- [63] Misiakos, K., Wang, C., Neugroschel, A. Lindholm, F. A., 1990. Misiakos, K., Wang, C., Neugroschel, A. Lindholm, F. A., 1990. *Appl. Phys.* 67: 321-333.
- [64] Chenvidhya, D., Kirtikara, K. Jivacate, C., 2003. PV module dynamic impedance and its voltage and frequency dependencies. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 86: 243-251
- [65] Furlan, J. Amon, S., 1985. Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon. *Solid State Electronics.* 28: 1241-1243.
- [66] Chenvidhya, D., Kirtikara, K. Jivacate, C., 2003. A new characterization method for solar cell dynamic impedance. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 80: 459-464.

Nom et prénoms : Domingo Jean Jude

Titre de la thèse : Etude en régime dynamique fréquentiel d'une photopile monofaciale à base de diséléniure de cuivre d'indium et de gallium CuInGaSe_2 (CIGS) sous éclairage monochromatique : détermination des paramètres électriques

Résumé :

Dans ce travail, une étude bibliographique sur les techniques et les méthodes de détermination des paramètres électriques en régime dynamique fréquentiel, a été présentée.

Une étude théorique est faite, en régime dynamique fréquentiel, sur la photopile sous éclairage monochromatique par la face avant. Au moyen de l'équation de continuité, les expressions de la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile, du photocourant et de la phototension, ont été établies en fonction de la fréquence, de la longueur d'onde et des vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière. Des caractéristiques photocourant-phototension, les courbes de calibration des résistances shunt et série, les expressions du photocourant de court-circuit, de la phototension de circuit ouvert et de la vitesse de recombinaison intrinsèque en face arrière, ont été obtenues.

Des diagrammes de Nyquist et de Bode des vitesses de recombinaison puis de l'impédance (Z) de la photopile, des modèles électriques équivalents aux phénomènes observés, ont été proposés. De cette étude, nous avons déterminé des paramètres électriques de la photopile tels que la résistance shunt (R_{sh}), la résistance série (R_s), l'impédance (Z), la fréquence de coupure (ω_c) et la capacité (C).

Enfin, de l'étude de la puissance et du facteur de forme pour les longueurs d'onde du visible, les résultats obtenus ont permis d'optimiser la photopile pour des points de fonctionnement bien donnés.

Mots clés : Fréquence de modulation-Impédance-Longueur d'onde-CIGS-Photocourant-Phototension-Vitesse de recombinaison-Résistance shunt-Résistance série.

Surname and first name: Domingo Jean Jude

Thesis title: The study in dynamic frequency regime of a monofacial photo-cell based on copper-indium diselenide and on gallium CuInGaSe_2 (CIGS) under monochromatic illumination: the determination of the electric parameters.

Summary: In this work, we have presented a bibliographical study about the techniques and methods of determining electric parameters in dynamic frequency regime.

Besides, theories are elaborated on dynamic frequency regime, on the photo-cell under monochromatic illumination by the front face. By means of the equation of continuity, the density expressions of the minority carriers in the basis of the photo-cell, the photocurrent and the photo-voltage are established in accordance with the frequency, the wavelengths and the recombination velocities at junction and on the rear face. We obtained photocurrent-photo voltage characteristics, the calibration curves of the shunt and series resistances, not to mention the expressions of the short-cut photocurrent, as well as that of the open circuit photo-voltage and of the recombination velocity which is intrinsic to the rear face.

We have proposed Nyquist and Bode diagrams related to recombination velocities, to the photo-cell impedance (Z) and to some electric models which are equivalent to the phenomena we have observed. From such a study we have determined some electric parameters of the photo-cell such as the shunt resistance (R_{sh}), the series resistance (R_s), the impedance (Z), the cut-off frequency (ω_c) and the capacity (C).

Finally, the findings of the power and the form factor study concerning the visible wavelengths, have allowed optimizing the photo-cell for some specific functioning points.

Key words: Frequency of modulation – impedance – wavelength- bifacial photo-cell based on CIGS– photocurrent – photo-voltage –recombination velocity – shunt Resistance – series Resistance.