

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



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

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2018 N° d'ordre :

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : ÉNERGIE SOLAIRE, MATÉRIAUX ET SYSTÈMES

Présentée par

GEROME SAMBOU

Titre : Etude en régime dynamique fréquentiel d'une cellule solaire en couches minces à base de Di-séléniure de Cuivre D'Indium et de Gallium $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) sous éclairage monochromatique : effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium.

Soutenue publiquement le 13/ 02/ 2019 devant le jury composé de :

Président	Grégoire SISSOKO	PROFESSEUR TITULAIRE	FST /UCAD
Rapporteurs	Issa DIAGNE	MAITRE DE CONFERENCES	FST /UCAD
	Babacar DIAKHATE	PROFESSEUR ASSIMILE	FST /UCAD
Membres	Amadou DIAO	MAITRE DE CONFERENCES	FST /UCAD
	Babacar Mbow	PROFESSEUR TITULAIRE	FST /UCAD
Directeur de thèse	Moustapha DIENG	PROFESSEUR TITULAIRE	FST/UCAD

DEDICACES

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, L'amour, le respect envers ceux que je dédie ce travail.

Ainsi

Je dédie cette

Thèse

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

A maman très tôt parti et à Papa, toi qui m'as accompagné depuis des années toi mon confident, mais tu as finalement décidé de partir sans attendre l'accomplissement de ce travail, reposaient tous à la droite du père céleste.

Je ne cesserai de vous remercier pendant tout le restant de ma vie pour tout ce que vous avez fait pour moi en espérant que vos bénédictions m'accompagneront toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous le paye au centuple et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

J'aurais tant aimé que vous soyez présents.

Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde

A MES CHERS ET ADORABLE FRERES ET SOEURS

A ma grande sœur Pascaline qui a très tôt pris la place de maman, ma petite sœur Bernadette toujours à mes côtés, mon grand frère Louis Albert, jeune frère Alexandre, mes toutes petites sœurs.

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A père SANA SAMBOU une référence

Mon oncle homonyme

Au Grand Bruno Sagna conseillé spécial

Au grand Michel Sambou qui m'a suivi depuis mon enfance

A Pierre Boundaw Mendy et sa femme : grand frère tuteur

A Louis Mendy et sa femme

A la grande mère Marie Boundaw Mendy

A Ouko Mendy

A Chériphe Diédhiou

A MES AMIS DE TOUJOURS :

A Ibrahima BA ami d'enfance

A Georges Bouyano DIATTA

A Seckou Bodian

A Issa Sonko

Aux membres du Club Jeune Etudiant

Aux membres de AROS INTERNATIONAL

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

REMERCIEMENTS

A l'issue de ces années de recherches, j'ai pu à comprendre que la rédaction d'une thèse reste de loin un travail en solitaire. Ainsi je tiens très sincèrement à remercier à toutes ces personnes sans qui ce travail de thèse n'aurait probablement jamais été mené à terme.

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de thèse le Professeur titulaire, M. Moustapha DIENG, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe. De sa disponibilité à mon égard mais aussi d'avoir bien voulu nous guider à chaque étape de la réalisation de ce travail. Vous nous avez toujours réservé le meilleur accueil, malgré vos obligations professionnelles. Vos encouragements inlassables, votre amabilité, votre gentillesse méritent toute admiration. Je lui suis également reconnaissant pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Monsieur Grégoire SISSOKO, Professeur titulaire de classe exceptionnelle à la Faculté des Sciences de Dakar et membre fondateur du Groupe International de Recherche en Énergies Renouvelables (GIRER) Professeur Nous sommes Très honoré de vous avoir comme président du jury de notre thèse.

Nous vous remercions pour le professionnalisme et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu juger ce travail.

Vos compétences professionnelles incontestables ainsi que vos qualités humaines vous valent l'admiration et le respect de tous.

Vous êtes et vous serez pour nous l'exemple de rigueur et de droiture dans l'exercice de la profession.

Veillez, cher professeur, trouver dans ce modeste travail l'expression de notre haute considération, de notre sincère reconnaissance et de notre profond respect.

Au monsieur Babacar Mbow professeur titulaire à la faculté des sciences et techniques et Amadou DIAO maitre de conférences à la faculté des sciences et techniques C'est pour nous un grand honneur de vous voir siéger dans notre jury.

Nous vous sommes très reconnaissants de la spontanéité et de l'amabilité avec lesquelles vous avez accepté de juger notre travail.

A monsieur. Issa DIAGNE maitre de conférences à la faculté des sciences et techniques de sa disponibilité en mon égard et de toutes ses orientations.

Merci d'avoir accepté de lire attentivement cette thèse et d'en être le rapporteur. Vos remarques et critiques pertinentes et fructueuses ont mené à la version finale de ce mémoire. A monsieur Babacar DIAKHATE maitre de conférences à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar au département de mathématique.

Vous nous faites l'honneur d'accepter avec une très grande amabilité de siéger parmi notre jury de thèse et d'être un des rapporteurs. Vos critiques et remarques ont permis de parfaire le document.

Veillez trouver ici l'expression de notre grand respect et nos vifs remerciements.

Je remercie sans doute le directeur de l'école doctorale ED-PCSTUI pour l'honneur qui m'a été fait de me recevoir au sein de cette prestigieuse école.

*Mes remerciements s'étendent également à tous **mes amis et collègues** membres du Groupe de Recherche en énergie renouvelable de la Faculté des Sciences et Technique au Laboratoire de Semi-conducteurs et d'Énergie solaire (LASES). Surtout aux membres de l'équipe dirigé par le professeur M. Moustapha Dieng, je veux citer Alain Kassine EHEMBA, DEMBA DIALLO, I BRAHIMA WADE, MAME MOR SOCE, JEAN DOMINGO, et autres dont leurs échanges ont été déterminants dans la rédaction de cette thèse.*

Table des matières

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	iii
Introduction générale	1
Chapitre.I Généralités sur les cellules solaires à couches minces état des lieux du potentiel du rayonnement solaire et notions sur la détermination des paramètres d'une cellule solaire en régime dynamique fréquentiel	4
Introduction	4
I.1 Energie solaire	4
I.2 Position du soleil	5
I.2.1 Coordonnées équatoriales	5
a- Déclinaison du soleil	6
b- Angle horaire du soleil.....	6
I.2.2 Coordonnées horizontales	7
a- Hauteur du soleil	7
b- Azimut du soleil.....	7
I.3 Nombre d'air masse.....	8
II. Généralités sur les cellules solaires à couches minces à base de Diseleniure de Cuivre d'Indium et de Galium (CIGS)	9
II.1 Présentation d'une cellule solaire à base de CIGS	9
II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	11
II.3 Les caractéristiques de la cellule solaire :	13
II.4. Les propriétés du matériau CIGS	14
II.4.1. Propriétés structurales du matériau CIGS.....	15
II.4.2. Les propriétés électriques du CIGS	18
II.4.3. Les propriétés optiques du CIGS	22
II.5 Quelques méthodes de détermination de paramètres de cellule solaire	23
I-5.1 (Mesure des paramètres électriques d'une cellule en Arséniure de Gallium « GaAs/Ge », par spectroscopie d'impédance) [32].....	23
I-5-2 Nouvelle méthode de caractérisation de l'impédance dynamique d'une cellule solaire [33]	24
I-5-3-PV MODULE DYNAMIC IMPEDANCE AND ITS VOLTAGE AND FREQUENCY DEPENDENCIES [34]	26
I-5-4- Mesure des paramètres électriques d'une photopile par la méthode de la Spectroscopie d'impédances [35]	26
Conclusion :	29
Références	30
CHAPITRE II : Etude théorique d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) sous éclairage monochromatique effets du taux de dopage au gallium et de l'angle d'incidence	33

II-1 Présentation de la photopile monofaciale à base de CIGS	33
II-2 Densité des porteurs minoritaires générés dans la base de la photopile.	34
II-2-1 Equation de continuité en régime dynamique fréquentiel.	34
II- 2-2 Solution de l'équation de continuité et conditions aux limites.....	35
II- 2-2 -1 Solution de l'équation de continuité	35
II- 2-2 -2 Conditions aux limites	35
II.3 Profils de la densité des porteurs minoritaires	37
II.3.1 Effet de la longueur d'onde	37
II.3.2 Effet de l'angle d'incidence	38
II.3.3 Effet du dopage de Gallium	39
II.4. Profil de la densité de photocourant.....	40
II.4.1 Effet de la longueur d'onde	40
II.4.2 Effet de l'angle d'incidence	41
II.4.3 Effet du dopage de Gallium	42
II.4.4 Profils du module de la densité de photocourant suivant SB pour différentes longueurs d'ondes	42
II.5. Profil de la densité de photocourant de court-circuit.....	44
II.5.1 Effet de l'angle d'incidence	44
II.5.2 Effet du dopage au gallium.....	45
II.6 Profil de la phototosion	46
II.6.1 Effet de la longueur d'onde	46
II.6.2 Effet de l'angle d'incidence	47
II.6.3 Effet du dopage au Gallium	47
II-7 Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.....	48
II-7.1 expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sfo.....	48
II-7-2 Profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.....	49
II-7-2-1 effet de la longueur d'onde	49
II-7-2-2 effet du dopage au gallium.....	50
II-7-3 Etude de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la face avant par les diagrammes de Bode et de Nyquist.....	51
II-7-3-1) Diagramme de Bode de la vitesse de recombinaison intrinsèque à jonction	51
III-7-3-2 Profile de la phase de Sfo en fonction du logarithme de la pulsation.....	52
II-7-3-3) Diagramme de Niquist de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la face avant.....	54
Conclusion	55
Références.....	56
CHAPITRE III. Détermination des paramètres électriques d'une cellule solaire à base de CIGS.....	58
Introduction.....	58
III.1- la caractéristique photocourant -phototension (J-V)	58
III.2- Effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur la caractéristique J-V	59
III.2- 1 Effet de l'angle d'incidence sur la caractéristique J-V.....	59
III.2- 2 effet du taux de dopage au gallium sur la caractéristique J-V.....	60
III-3-détermination des résistances série et shunt	62
III-3-1 Etude de la résistance série.....	62
III.3.1.1 Effet de l'angle d'incidence sur la résistance Série	63
III.3.1.2 Effet du dopage au gallium sur la résistance Série	64

III-3-2 Etude de la résistance shunt	64
III.3.2.1 Effet de l'angle d'incidence sur la résistance shunt.....	65
III.3.2.2 Effet du taux de dopage au gallium sur la résistance shunt	66
III-4 Etude de la capacité de diffusion	67
III-4-1 Etude du profil de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes longueurs d'ondes	68
III-4-2 Etude du profile de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.....	70
III-4-3 Etude du profile de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium	71
III-5 Etude de l'impédance dynamique de la photopile	71
III-5-1 Etude du diagramme de Bode de l'impédance.....	72
III-5-1-1 Effet de l'angle d'incidence.....	72
III-5-1-2 Effet du taux de dopage au gallium	73
III-5.2 Etude du diagramme de Bode de la phase de l'impédance	74
III-5.2-1 Effet de l'angle d'incidence.....	74
III-5.2-2 Effet du taux de dopage au gallium	75
III-6 Etude du diagramme de Nyquist de l'impédance	76
III-6-1 Effet de l'angle d'incidence	76
III-6-2 Effet du taux de dopage au gallium	77
III-7 Schémas électriques équivalents de l'impédance	78
III-8 Puissance électrique de la photopile	78
III-8-1 Expression de la puissance.....	78
III-8-2 Etude de l'effet de l'angle d'incidence sur la puissance	79
III-8-3 Etude de l'effet du taux de dopage au gallium sur la puissance	80
III-9 Etude du facteur de forme et rendement de conversion photovoltaïque	81
III-9 -1 Etude du facteur de forme.....	81
III-9 -1-1 Expression du facteur de forme	81
III-9 -1-2 Etude de l'effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur le facteur de forme .	81
III-9 -2 le rendement de conversion photovoltaïque.....	82
III-9-2-1 Expression du rendement	82
III-9 -1-2 Etude de l'effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur le rendement de conversion photovoltaïque	83
Conclusion	85
Références	86
Conclusion générale et perspectives	88
ANNEXES MATHÉMATIQUE	91

Liste des figures et tableaux

Figure I. 1 : Angle Incidence θ	5
Figure I. 2 : Repère équatorial.....	6
Figure I. 3 : Repère horizontal.....	7
Figure I. 4 : Rayonnement AM0, AM1, AM1.5.....	8
Figure I. 5 : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS.....	11
Figure I. 6 : Schéma du principe et diagramme de bande d'une jonction p-n à l'équilibre.....	12
Figure I. 7 : Principe d'un dispositif photovoltaïque.....	12
Figure I. 8 : Courbes J(V) typiques d'une cellule solaire réelle et d'une diode idéale.....	13
Figure I. 9 : Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après	16
Figure I. 10 : a) Diagramme ternaire du système Cu-In-Se à température ambiante, d'après [8]. b) Diagramme pseudo-binaire des composés intermédiaires Cu ₂ Se et In ₂ Se ₃ , d'après [13]. « Ch. » signifie chalcopyrite, « Sp. » signifie sphalérite.	17
Figure I. 11 : Structures électroniques possibles aux joints de grain, entre un grain g ₁ et un grain g ₂	20
Figure I. 12 : Valeurs théoriques des énergies de transition électronique des principaux défauts cristallins dans le CIS.	21
Figure I. 13 : Principaux mécanismes de recombinaison dans un semiconducteur.....	22
Figure I. 14 : Dispositif expérimental utilisé en spectroscopie d'impédance.....	25
Figure I. 15 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	25
Figure I. 16 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	26
Figure I. 17 : Impédance d'une résistance pure (R).....	27
Figure I. 18 : Impédance d'une capacité pure (C).....	27
Figure I. 19 : Impédance d'une inductance pure (L).....	27
Figure I. 20 : Impédance d'un circuit R-C en série.....	28
Figure I. 21 : Impédance d'un circuit R-L en série.....	28
Figure I. 22 : Impédance d'un circuit R-C en parallèle.....	28
Figure I. 23 : Impédance d'un circuit R-L en parallèle.....	29
Figure II. 1 schéma simplifié d'une photopile monofaciale à base de CIGS	33
Figure II. 2 Energie du gap en fonction du taux de dopage au Gallium.....	36

Figure II. 3 Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde pour différents taux de dopage au gallium	36
Figure II. 4 module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de longueur d'onde	37
Figure II. 5 : module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de l'angle d'incidence θ	38
Figure II. 6 : module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs du taux de dopage X	39
Figure II. 7 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde	40
Figure II. 8 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence	41
Figure II. 9 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage X	42
Figure II. 10 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la longueur d'onde.....	43
Figure II. 11 : module de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de l'angle d'incidence	44
Figure II. 12 : module de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de dopage X	45
Figure II. 13 : module de la phototension en fonction de la vitesse (SF) de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde	46
Figure II. 14 : module de la phototension en fonction de la vitesse (SF) de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence	47
Figure II. 15 : module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage X	48
Figure II. 16 : module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de la longueur d'onde.....	49
Figure II. 17 : module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du taux de dopage au gallium.....	50
Figure II. 18 : logarithme du module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du logarithme de la pulsation pour un éclairage par la face avant pour différents taux de dopage au gallium.....	52
Figure II. 19 : phase de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf_0 en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium.....	53

Figure II. 20 : phase de la vitesse se recombinaison intrinsèque à la jonction Sf0 en fonction du taux de dopage au gallium	54
Figure II. 21 : partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison intrinsèque Sf0 pour un éclairage par la face avant	55
FigureIII. 1 : caractéristique photocourant-photension d'une cellule solaire.....	59
FigureIII. 2 : caractéristique photocourant-photension pour différentes valeurs de l'angle d'incidence	60
FigureIII. 3 : caractéristique photocourant-photension pour différents taux de dopage de gallium. ..	61
FigureIII. 4 : Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en circuit ouvert	62
FigureIII. 5 : module de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.	63
FigureIII. 6 : module de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage au gallium.....	64
FigureIII. 7 : Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en situation de court-circuit	65
FigureIII. 8 : module de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence	66
FigureIII. 9 : module de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage au gallium.....	67
FigureIII. 10 : module de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction SF pour différentes longueurs d'ondes	69
FigureIII. 11 : module de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction SF pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.....	70
FigureIII. 12 : module de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction SF pour différents taux de dopage au gallium	71
FigureIII. 13 : module de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de l'angle d'incidence	72
FigureIII. 14 : module de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différents du taux de dopage au gallium	73
FigureIII. 15 : phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.	74
FigureIII. 16 : phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différents taux de dopage gallium.....	75

FigureIII. 17 : partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.....	76
FigureIII. 18 : partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance pour différents taux de dopage au gallium.....	77
FigureIII. 19 : schéma électrique équivalent de la cellule solaire.....	78
FigureIII. 20 : module de la puissance de la photopile en fonction du la phototension pour différentes valeurs de l'angle d'incidence	79
FigureIII. 21 : variation du module de la puissance en fonction du la photo-tension pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium.....	80
FigureIII. 22 : module du facteur de forme en fonction de l'angle d'incidence	81
FigureIII. 23 : variation du module du facteur de forme avec le taux de dopage au gallium	82
FigureIII. 24 : rendement de conversion photovoltaïque en fonction de l'angle d'incidence.....	83
FigureIII. 25 : variation du rendement de conversion photovoltaïque avec le taux de dopage au gallium.....	84
.....	

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga, Se	19
Tableau I. 2: Valeurs de la résistance dynamique.....	25

NOMENCLATURE

$E_g(X)$	Energie du gap de CIGS dépendant du taux de dopage au gallium	(eV)
C	Capacité	(F.cm ⁻²)
CT	Capacité due à la variation de la zone de charge d'espace	(F.cm ⁻²)
CD	Capacité due au transfert de charge de la base à l'émetteur	(F.cm ⁻²)
q	Charge élémentaire de l'électron	(C)
$D(\omega)$	Coefficient de diffusion complexe des porteurs minoritaires dans la base	(cm ² .s ⁻¹)
k	Constante de Boltzmann	(J/K)
$\alpha(\lambda, X)$	Coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ pour un taux de dopage au gallium X	(cm ⁻¹)
$R(\lambda)$	Coefficient de réflexion du matériau à la longueur d'onde λ	
n_i	Concentration intrinsèque du matériau CIGS	(cm ⁻³)
$\delta(x, t)$	Densité des porteurs minoritaires photogénérées dans la base en fonction de la profondeur x et du temps t	(cm ⁻³)
J_{ph}	Densité de photocourant	(A.cm ⁻²)
J_{CC}	Densité de photocourant de court-circuit	(A.cm ⁻²)
τ	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base	(s)
H	Épaisseur totale de la base de la photopile	(cm)
ω	Fréquence angulaire	(rad.s ⁻¹)
ϕ	Flux incident de la lumière monochromatique	(W/cm ²)
Z	Impédance dynamique de la photopile	(Ω .cm ⁻²)
Leq	Inductance équivalente relative à la photopile	(H)
λ	Longueur d'onde	(μ m)
L_0	Longueur de diffusion intrinsèque des porteurs minoritaires dans la base	(cm)
$L\omega$	Longueur de diffusion complexe des porteurs minoritaires dans la base	(cm)
x	Profondeur de la base de la photopile	(cm)
Rs	Résistance série	(Ω .cm ²)
Rsh	Résistance shunt	(Ω .cm ²)
RC	Résistance de charge	(Ω)
Rd	Résistance dynamique	(Ω .cm ²)
Rp	Résistance parallèle	(Ω .cm ²)
V_{ph}	Phototension	(V)
V_{CO}	Phototension de circuit ouvert	(V)
VT	Tension thermique	(V)
T	Température absolue	(K)
NB	Taux de dopage des impuretés dans la base	(cm ⁻³)
t	Temps	(s)
$G(x, \theta, t)$	Taux de génération monochromatique en modulation de fréquence en fonction de la profondeur x de l'angle d'incidence et du temps t	(cm ⁻³ .s ⁻¹)
$g(x, \theta)$	Taux de génération en fonction de la profondeur x selon l'angle	(cm ⁻³ .s ⁻¹)

	d'incidence θ	
SF	Vitesse de recombinaison à la jonction	(cm .s ⁻¹)
SB	Vitesse de recombinaison à la face arrière	(cm .s ⁻¹)
Sf0	Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction	(cm .s ⁻¹)
γ	la déclinaison	(degrés)
θ	angle d'incidence	<i>degres</i>
X	taux de dopage au gallium	
P	puissance de la photopile	(W.cm ⁻²)
FF	facteur de forme	(%)
η	rendement de la cellule	(%)
ω	angle horaire	(rad ou °)

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par l'épuisement et le renchérissement des combustibles fossiles, l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie primaire, l'émergence de nouvelles zones de conflits d'intérêt d'exploitation des fossiles, et celle de nouvelles puissances économiques mais aussi les craintes inspirées par le réchauffement climatique, l'intérêt pour des sources d'énergie propres, non productrices de gaz à effet de serre est susceptible de s'inscrire dans le cadre d'un développement durable est naturellement ravivé. Le développement des énergies renouvelables suscite l'espoir de participer à la sécurité de notre approvisionnement énergétique.

Le potentiel de l'énergie solaire est immense et favorable à la production de diverses énergies renouvelables. L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) estime qu'une surface de 145 000 km² (soit 4 % de la surface des déserts les plus arides) serait suffisante pour couvrir la totalité des besoins en électricité de la planète terre [NREL2010].

Le rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre permettrait en théorie de couvrir plus de 10 000 fois de la consommation mondiale actuelle d'énergie primaire, toutes formes et tous usages confondus. En moyenne, chaque m² reçoit 1 700 kWh par an. Cette énergie renouvelable est amenée à jouer un rôle prépondérant dans le paysage énergétique mondial.

La conférence sur le climat, dite « COP21 » qui s'est tenue du 30 novembre au 12 décembre 2015 au Bourget, a permis d'aboutir à un accord historique engageant l'ensemble des pays à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Un accord qui a pour objet de stabiliser le réchauffement climatique dû aux activités humaines à la surface de la terre « nettement en dessous » de 2°C d'ici à 2100 par rapport à la température de l'ère préindustrielle (période de référence de 1861-1880) et de poursuivre les efforts pour limiter ce réchauffement à 1,5°C.

La production photovoltaïque est un élément capital pour atteindre ce facteur 4 : elle n'émet pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de pollution comparable à celle des modes de production conventionnels. Ainsi 1 kWh d'énergie solaire photovoltaïque se substitue directement à 1 kWh d'électricité produite par les centrales classiques, soit une économie de 100 à 200 grammes de CO₂ par kWh suivant qu'il s'agit de centrales fonctionnant à partir de gaz naturel ou de fuel.

Pour répondre à ces contraintes économiques et environnementales, l'industrie photovoltaïque connaît une croissance rapide et cela depuis les années 90. Celle-ci est dominée par la filière du silicium cristallin. Par ailleurs, les cellules solaires à base de cuivre, indium, gallium et disélénium (CIGSe) sont d'une technologie prometteuse en couches minces et présentent de

hauts rendements de conversion, avec une valeur des rendements de 20,3% obtenue par ZSW en Allemagne [1]. Ces impressionnantes performances ont permis le rapide essor de la filière industrielle dite CIGSe, et un nombre croissant de compagnies produisent aujourd'hui des modules photovoltaïques CIGSe avec des rendements de conversion supérieurs à 12% [2;3].

Le spectre des sujets de recherche nécessaires au développement du photovoltaïque, est large et ne touche pas seulement les questions technologiques ou industrielles, mais aussi à l'ensemble des aspects économiques et sociaux de sa mise en œuvre.

Face à ces enjeux, l'orientation vers les énergies renouvelables devient une nécessité. Pour cela le défi reste l'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques. Ce rendement est directement lié à beaucoup de paramètres physiques, mais aussi aux différentes méthodes de fabrications des cellules et des types de méthodes de synthèse des couches en plus du mode d'éclairement.

Par ailleurs, l'étude d'une modélisation d'une structure de cellule solaire reste un outil performant qui nous permettra par simulation, de lier les caractéristiques photovoltaïques de cette cellule avec les propriétés du matériau et la technologie de fabrication en vue d'améliorer les performances de la cellule.

L'objectif de ce travail de thèse consiste à proposer une approche d'étude de l'effet de l'angle d'incidence d'une lumière monochromatique et du taux de dopage au Gallium sur les paramètres d'un modèle de photopile monofaciale à base de CIGS en régime dynamique fréquentiel. Ce modèle est simple, général, capable de prédire l'évolution de certains paramètres, et cela en tenant compte des phénomènes physiques qui se produisent au cours de l'éclairement de la photopile.

Le déroulement de la thèse sera conçu comme suite : le premier chapitre développe le potentiel du rayonnement solaire, des généralités sur la couche mince absorbante GIGS, ainsi que des notions sur la détermination des paramètres d'une cellule solaire en régime dynamique fréquentiel.

Dans le deuxième chapitre est développée l'étude théorique de la cellule solaire à base de CIGS sous l'effet du taux de dopage au gallium et de l'angle d'incidence d'un éclairement monochromatique en régime dynamique fréquentiel. Ainsi un modèle mathématique d'une structure de photopile sera établi. Les théories développées seront développées par l'équation régissant l'évolution des porteurs minoritaires dans la base.

Le troisième chapitre nous permettra de déterminer les paramètres comme les résistances séries et shunt, la capacité, l'impédance, la puissance, la facteur de forme et le rendement de

la cellule solaire tout en explicitant les effets du taux de dopage au gallium et de l'angle d'incidence.

Pour finir, nous cherchons à souligner des perspectives pour poursuivre ce travail.

Chapitre.I Généralités sur les cellules solaires à couches minces état des lieux du potentiel du rayonnement solaire et notions sur la détermination des paramètres d'une cellule solaire en régime dynamique fréquentiel

Introduction

Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques en général et en particulier celles de la filière du CIGS. Dans un premier temps, nous décrirons ce qu'est le rayonnement solaire et les techniques utilisées pour récupérer son énergie. Nous montrerons ensuite ce qu'est un semi-conducteur à base CIGS en insistant sur ses propriétés dont leur connaissance reste importante dans la compréhension du processus de conversion photovoltaïque. Ensuite des généralités sur le régime dynamique fréquentiel et quelques méthodes de détermination des paramètres électriques seront mises en évidence.

I. Rayonnement solaire

Les atouts principaux de l'énergie solaire sont ; une réserve quasi-inépuisable à notre échelle, une accessibilité géographique, en dépit de son intermittence. Le solaire photovoltaïque (PV), dont la recherche a débuté vers les années 1950, est l'une des techniques les plus prometteuses pour récupérer cette énergie. Celle-ci a connu de nombreux développements et plusieurs technologies ont émergé à ce jour. Parmi les différentes technologies photovoltaïques, les cellules en couches minces présentent des avantages significatifs.

I.1 Energie solaire

Le rayonnement solaire constitue une ressource énergétique indispensable au développement de la vie sur terre. Cette ressource abondante bien partagée sur la terre est utilisée sous divers applications. De la quantité d'énergie libérée par le soleil, celle captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la

terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser, de la position du soleil... L'épaisseur de l'atmosphère est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m².

I.2 Position du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents.

Par ailleurs selon la position de la surface du panneau solaire on peut décrire un angle θ que fait le rayon incident avec la normale de la surface du panneau solaire.

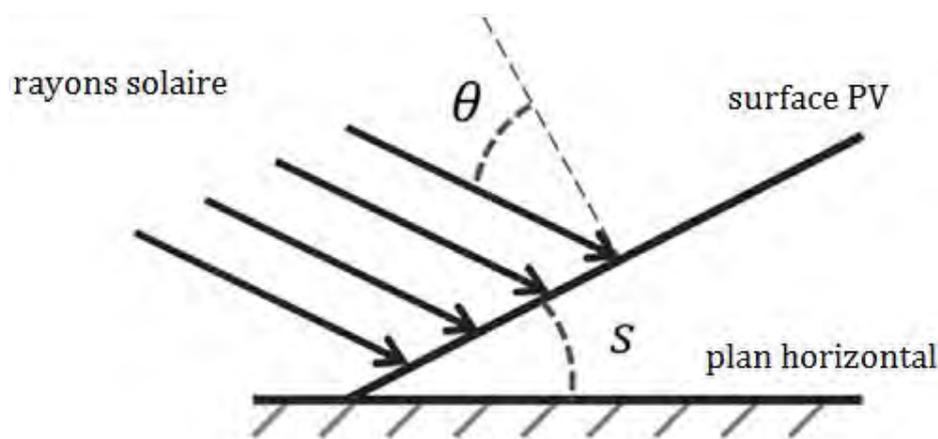


Figure I. 1 : Angle Incidence θ

Le cosinus de cet angle incident est calculé à chaque instant du jour en utilisant la formule astronomique suivante [4] :

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(Y) \times \sin(l) \times \cos(s) - \sin(Y) \times \cos(l) \times \sin(s) \times \cos(\varphi) + \\ & \cos(Y) \times \cos(l) \times \cos(s) \times \cos(\varpi) + \cos(Y) \times \sin(l) \times \sin(s) \times \cos(\varphi) \times \\ & \cos(\varpi) + \cos(Y) \times \sin(s) \times \sin(Y) \times \sin(\varpi) \end{aligned} \quad \text{I-1}$$

Où Y est la déclinaison solaire, ϖ l'angle horaire, l la latitude, s l'angle d'inclinaison du panneau solaire et φ l'angle azimutal.

I.2.1 Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles. (Y, ϖ) (Fig. I.2).

a- Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial.

$$Y = 0,38 + 23,26 \sin (2\pi J'/365,24 - 1,395) + 0,37 \sin (4\pi J'/365,24 - 1,457) \quad \text{[5]} \quad \text{I-2}$$

Y désigne la **déclinaison en degrés** et J' le numéro du jour de l'année du calendrier (à partir du premier janvier)

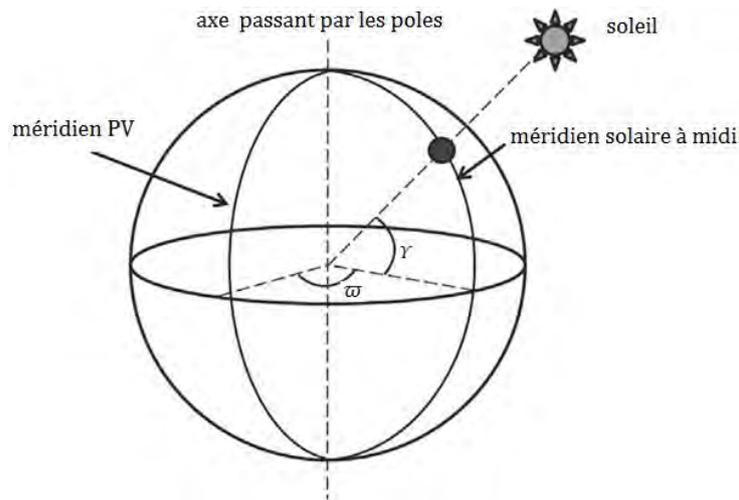


Figure I. 2 : Repère équatorial

b- Angle horaire du soleil

C'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

En outre c'est la deuxième coordonnée équatoriale du Soleil, et c'est l'angle défini comme compté positivement vers l'Est, entre la position actuelle du plan méridien local et la position de ce même méridien à midi vrai (ou entre le plan méridien local et le plan méridien qui contient le centre du Soleil à l'instant qui nous concerne).

$$\omega = \pi \times \left(1 - \frac{HT}{12}\right) \text{ en radian} \quad \text{I-3}$$

Où

$$\omega = \pi \times (HT - 12) \text{ en degrés} \quad \text{I-4}$$

Où HT est le temps solaire vraie égale au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence. Il est défini par l'expression suivante :

$$HT = H_l - \Delta H_l + \Delta H_g - E \quad \text{en heure} \quad \text{I-5}$$

Où H_l est le temps local du lieu du panneau solaire, ΔH_l le décalage de temps entre le temps donné dans la zone et le temps universel (UTC), ΔH_g est le décalage de temps dû à la

variation de la longitude temps avec le temps de la zone. E est défini comme l'avancement de la moyenne de temps au-dessus du temps solaire.

I.2.2 Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut az . (Fig. I.3).

a- Hauteur du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à :

0° au lever et au coucher astronomiques du soleil,

90° à midi temps solaire vrai

$$\sin(h) = \cos(\gamma) \times \cos(\psi) \times \cos(HT) + \sin(\psi) \times \sin(\gamma) \quad \text{I-6}$$

ψ : latitude de lieu.

b- Azimut du soleil

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

$$\sin(az) = \frac{\cos(\gamma) \times \sin(HT)}{\cos(h)} \quad \text{I-7}$$

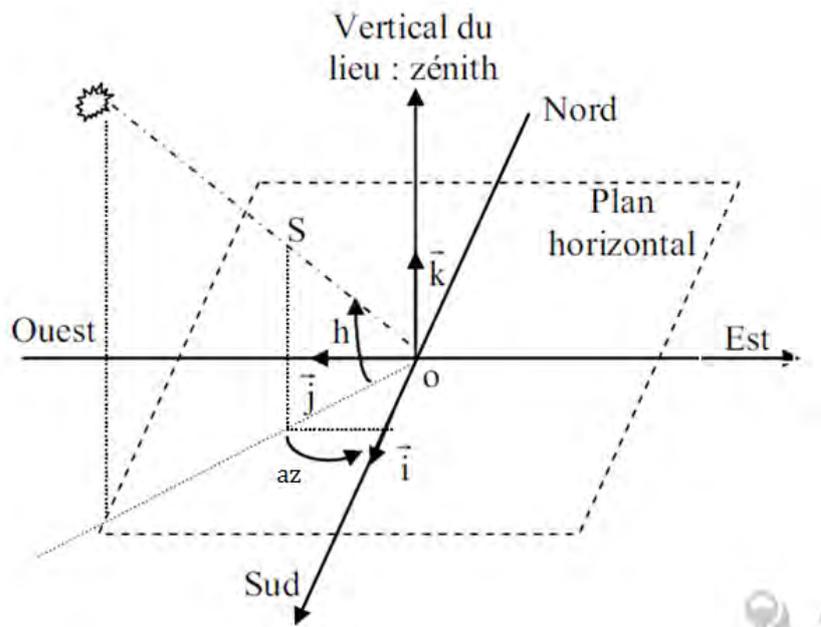


Figure I. 3 : Repère horizontal

I.3 Nombre d'air masse

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit le nombre d'air masse défini par

$$m_a = \frac{p}{1013} \times \frac{1}{\sin(B)} \times \exp\left(-\frac{Z}{7,8}\right) \quad \text{I-8}$$

Avec :

p (N.m⁻²) : pression,

B (degré) : élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith),

Z (Km) : altitude.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée :

$$m_a = (\sin(B))^{-1} \quad \text{I-9}$$

Ainsi lorsque le soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km). Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions AM0 (figure I.3)

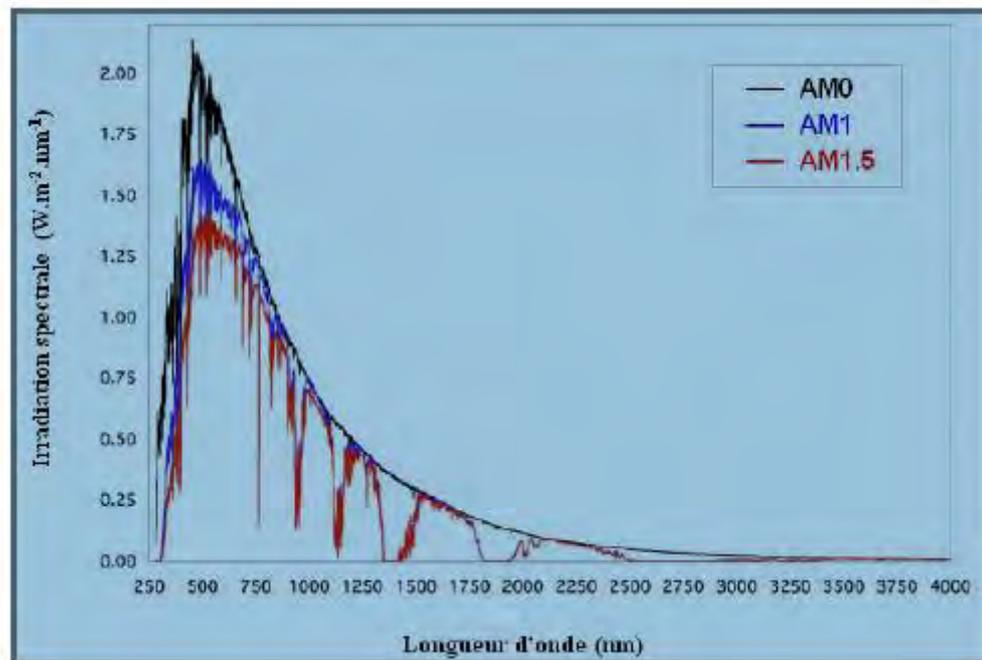


Figure I. 4 : Rayonnement AM0, AM1, AM1.5 [6]

II. Généralités sur les cellules solaires à couches minces à base de Diséleniure de Cuivre d'Indium et de Gallium (CIGS)

On assiste ces dernières années à l'apparition sur le marché de modules photovoltaïques basés sur d'autres matériaux que le silicium : le Diséleniure de Cuivre et d'Indium, CuInSe_2 , noté CIS, et ses combinaisons avec du Gallium (CIGS) ou du Soufre, ainsi que le Tellurure de Cadmium, CdTe [7] Le développement de cellules solaires à base de CIGS a débuté dans les années 1970 [8].

Depuis, les rendements de conversion des dispositifs dépassent 20% en laboratoire et atteignent 13% à l'échelle industrielle. Bien qu'une cellule CIGS soit constituée d'au moins 6 matériaux différents, c'est principalement la compréhension et l'amélioration des propriétés du matériau absorbeur qui sont au cœur des progrès réalisés.

II.1 Présentation d'une cellule solaire à base de CIGS

Dans sa configuration la plus répandue une cellule solaire en couches minces avec comme absorbeur le CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. La figure I.5 présente la structure standard d'une cellule à base de CIGS.

Le substrat : plaque de verre d'environ 3mm d'épaisseur, c'est un support permettant la tenue mécanique des différentes couches, et doit répondre à des critères comme sa rigidité, son coefficient de dilatation (qui doivent être proche de celui du CIGS), sa température maximale d'utilisation (qui doit être adaptée au procédé), il doit être inerte chimiquement et moins coûteux, son état de surface doit être parfaitement lisse. Il existe trois catégories de substrat : le verre, les métaux, et les polymères

Le contact métallique arrière : électrode de contact arrière, première couche déposée sur le substrat. 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 d'environ 300 nm à 1000 nm. Ce contact métallique doit être un bon conducteur électrique, ne pas réagir avec le CIGS ou y diffuser, résister aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication de la cellule solaire à base CIGS (de l'ordre de 550 à 600°C). La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique.

L'absorbeur : une couche située directement au-dessus du contact arrière et 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 d'environ 1,5 à 2,5 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.

La couche de CdS : c'est un semi-conducteur de type n, d'environ 50 nm de sulfure de cadmium (CdS) que l'on dépose sur le substrat. Cette couche assure la formation de l'hétérojonction p-n et doit avoir un gap supérieur à celui de l'absorbeur. Le CdS a un rôle électrique, permettant d'optimiser l'alignement des bandes entre le CIGS et la couche fenêtre et de limiter les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches, puis un rôle d'une couche protectrice de la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnO, qui peut engendrer la formation de défauts à la surface du CIGS. Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS). Aussi, 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, $\text{In}_2(\text{S,Se})_3$, etc.) La méthode la plus courante de dépôt du CdS est le bain chimique (*Chemical Bath Deposition*, CBD).

La couche fenêtre : 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-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [9]. 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 l'ordre 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 Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt.

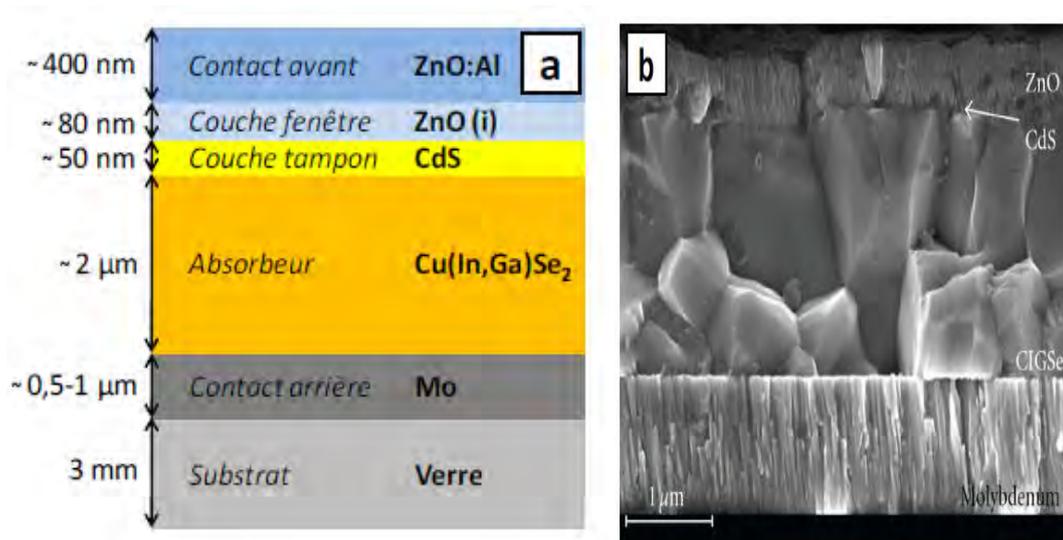


Figure 1.5 : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS

(a) Schéma de l'empilement des différentes couches ;

(b) Image MEB de la tranche de la cellule.

II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse reçue du soleil en courant électrique grâce au matériau semi-conducteur qu'elle contient. Un semi-conducteur (SC) est un matériau présentant une bande interdite (E_g) de quelques eV comprise entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi situé entre ces deux bandes dont la position est fonction de la concentration des porteurs de charges.

Le semi-conducteur est de type n lorsque les électrons sont les porteurs de charges majoritaires, et de type p lorsque ce sont les trous qui sont majoritaires. L'assemblage de deux semi-conducteurs de types différents forme la jonction p-n. Il existe deux types de jonctions : lorsque les deux semi-conducteurs sont issus de deux matériaux différents, on parle d'hétérojonction (comme les cellules à base de CIGS), lorsque la jonction p-n est formée d'un seul matériau on parle alors d'homojonction.

Lors du contact entre zones p et n, les porteurs majoritaires de chacune diffusent à travers la surface de contact, il se crée une zone chargée positivement du côté du semi-conducteur n et une zone chargée négativement du côté du semi-conducteur de type p. Cette zone de transition est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Le gradient de concentration des porteurs majoritaires induit la présence d'un champ électrique \vec{E} permanent dans cette ZCE. A l'équilibre les niveaux de Fermi des deux zones s'égalisent, ce qui provoque une courbure du diagramme de bande, introduisant une barrière de potentiel V_e à l'interface.

Le principe de la jonction p-n est présenté en figure I.6.

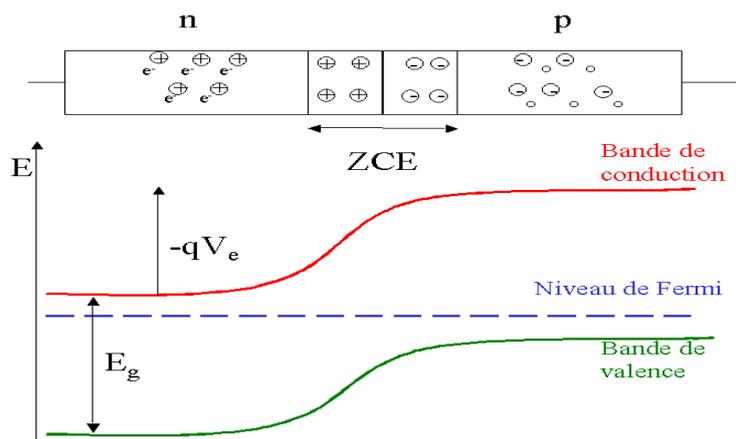


Figure I. 6 : Schéma du principe et diagramme de bande d'une jonction p-n à l'équilibre

Sous illumination, le semi-conducteur absorbe les photons incidents lorsque leur énergie est plus grande ou égale à celle de la bande interdite (E_g). Il y a formation de paires électrons-trous. La présence du champ électrique \vec{E} dans la ZCE permet aux charges de se séparer : l'excès d'électrons diffuse vers le côté n, et l'excès de trous diffuse vers le côté p. Un photocourant de porteurs minoritaires apparaît donc, opposé au courant de porteurs majoritaires déjà présent à l'obscurité (cf. Figure I.7). La ZCE est assez fine, de 100 à 300 nm. Cependant, comme l'électron peut se déplacer sur une longueur de diffusion L_n pendant sa durée de vie, les électrons collectés correspondent à ceux qui ont pu diffuser jusqu'à la ZCE. Ainsi les absorbeurs des cellules solaires ont souvent une épaisseur proche ou inférieure à la longueur de diffusion de leurs porteurs.

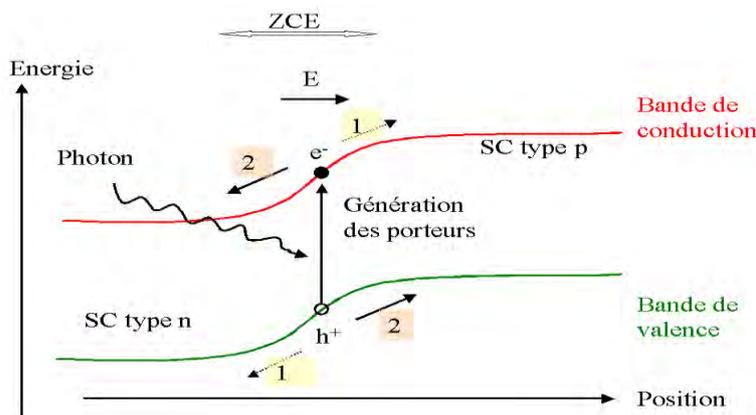


Figure I. 7 : Principe d'un dispositif photovoltaïque

- 1 :** courant d'obscurité,
- 2 :** photocourant.

II.3 Les caractéristiques de la cellule solaire :

Une cellule solaire ne peut donc être assimilée à aucun générateur classique. On peut en effet la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale de sa caractéristique et comme une source de courant constant dans la partie horizontale de sa caractéristique. Figure (I-8)

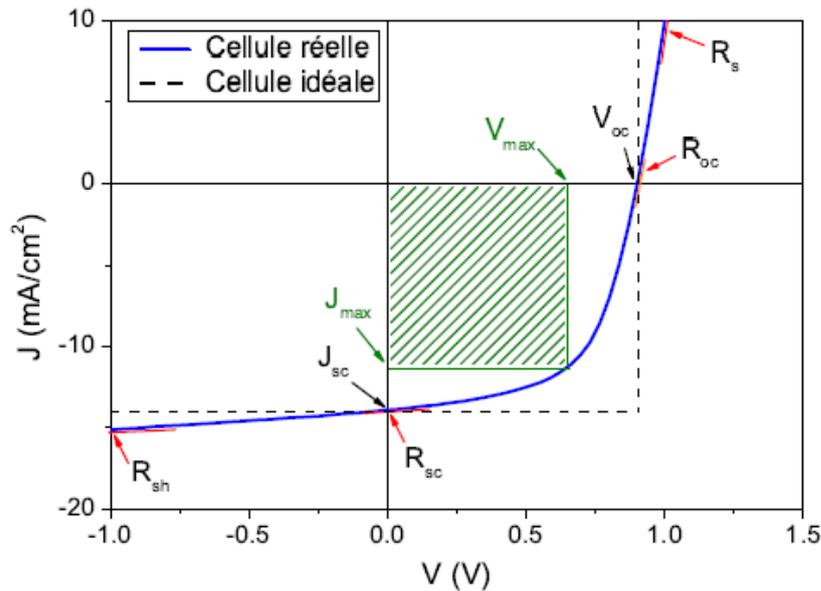


Figure I. 8 : Courbes J(V) typiques d'une cellule solaire réelle et d'une diode idéale

De cette caractéristique peuvent être extraites :

- La densité de courant de court-circuit (J_{cc} , en $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$), qui est le point d'intersection de la caractéristique J(V) avec l'axe des ordonnées. Elle correspond au photocourant lorsque dans une modélisation du fonctionnement d'une cellule solaire la diode est court-circuitée
- La tension de circuit ouvert V_{co} , (V), qui est le point d'intersection de la caractéristique J(V) avec l'axe des abscisses. Elle correspond à la tension de polarisation de la jonction pour laquelle le photocourant (allant de N vers P) compense le courant thermiquement active (allant de P vers N) ;
- Le point de fonctionnement ($V_m; J_m$) pour lequel la puissance délivrée par la cellule est maximum ;
- Le facteur de forme FF, en %, qui est le rapport entre la puissance maximale réellement délivrée par la cellule et la puissance maximale de la cellule. Il rend compte de l'écart à l'idéalité de la diode, et il est défini par :

$$FF = \frac{J_m \times V_m}{J_{cc} \times V_{co}} \quad \text{I-10}$$

- Le rendement de la cellule (η , en %), qui est le rapport entre la puissance maximale réellement délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente (P_{in}) :

$$\eta = \frac{FF \times J_m \times V_m}{P_{in}} \quad \text{I-11}$$

- Les résistances shunt et série [10]

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 :

$$J = J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{V+JR_s}{n.V_T}} - 1 \right) - \frac{V+J.R_s}{R_{sh}} \quad \text{I-12}$$

Où **R_s** , **R_{sh}** , **I_{ph}** , **I_s** , **V** , **n** 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 précédente (I-12), on donne la caractéristique courant-tension de la cellule solaire et puis on considère deux points de fonctionnement :

- Le premier point c'est lorsque la cellule solaire est en situation de circuit ouvert pour déterminer la résistance série par l'expression suivante :

$$R_s = - \left(\frac{\delta V}{\delta I} \right)_{V=V_{co}} \quad \text{I-13}$$

Le second point c'est lorsque la cellule est en situation de court-circuit pour la détermination de la résistance shunt par la relation :

$$R_{sh} = - \left(\frac{\delta V}{\delta I} \right)_{I=I_{cc}} \quad \text{I-14}$$

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

II.4. Les propriétés du matériau CIGS

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semiconducteurs, la structure cristalline du

CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CIGS.

II.4.1. Propriétés structurales du matériau CIGS

Structure cristalline

Le matériau à la base du CIGS est le CIS (CuInSe_2). C'est un semi-conducteur I-III VI_2 qui possède une structure cristalline *chalcopyrite*. Cette structure tétragonale peut être décrite comme un empilement de deux structures *zincblende* dans lequel les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe VI (Se) (anions) et les autres sites sont occupés de manière ordonnée par des atomes des groupes I (Cu) et III (In) (cations). Le ratio des paramètres de maille c/a est légèrement différent de 2 (distorsion tétraédrique), ce qui est dû à des différences d'énergies entre les liaisons Cu-Se et In-Se [8].

Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage. En d'autres termes, le CIGS est une solution solide de CuInSe_2 et de CuGaSe_2 . La figure I.9 présente les différences de structure cristalline entre 3 matériaux semiconducteurs utilisés dans le photovoltaïque : le Si, le CdTe et le CIGS.

La structure chalcopyrite correspond à la phase $\acute{\alpha}$ du système Cu-In-Se. La figure I.10 montre le diagramme de phases ternaire [8] de ce système à température ambiante ainsi que le diagramme pseudo-binaire $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}_3$ [11]. La majorité des phases obtenues lors de l'élaboration du CIS (incluant la structure chalcopyrite $\acute{\alpha}$ -CIS) sont situées autour de la ligne de jonction entre ces deux derniers composés [12] Sachant que le sélénium est

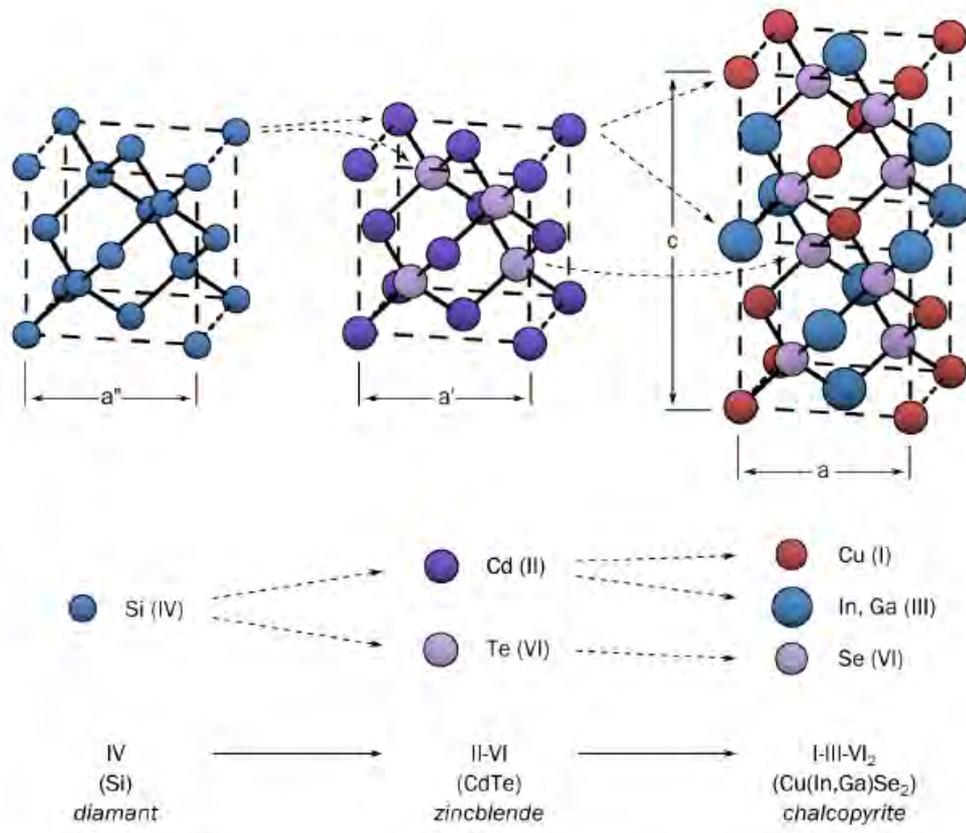


Figure I. 9 : Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après [8].

généralement apporté en excès lors des procédés d'élaboration du CIS, c'est essentiellement le taux de Cu (ratio $[Cu]/[In]$) qui détermine la position (et donc le type de phases formées) sur cet axe. A température ambiante, la phase α -CIS correspond à une concentration en Cu comprise entre 24% et 24.5% atomiques. Ce domaine s'étend lorsque la température augmente jusqu'à environ 600°C. Au-delà de 700°C, une phase désordonnée de type sphalérite (α -CIS) apparaît. Cette dernière diffère de la phase chalcopyrite du fait que les sites des cations sont aléatoirement occupés par Cu ou In. Cela signifie que dans les proportions exactes correspondant à la stœchiométrie du $CuInSe_2$ (25% de Cu), un mélange de α -CIS et de Cu_2Se est obtenu [13]. Il en est de même pour les taux de cuivre supérieurs. Cette configuration n'est pas souhaitable pour réaliser des dispositifs photovoltaïques car la présence de phases du type $Cu_{2-x}Se$ conductrices aux joints de grain du CIS peut être la source de court-circuit [14].

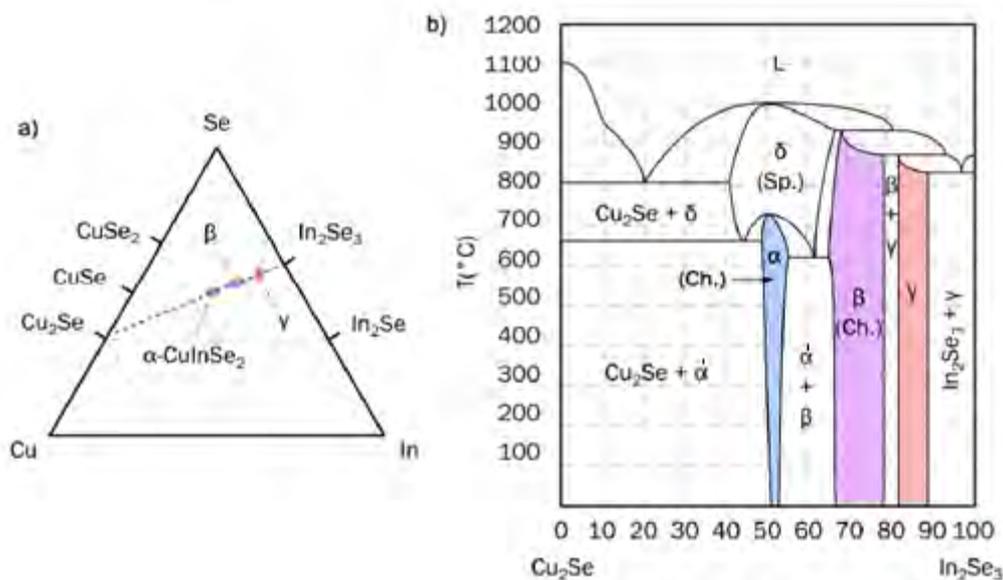


Figure I. 10 : a) Diagramme ternaire du système Cu-In-Se à température ambiante, d'après [8]. b) Diagramme pseudo-binaire des composés intermédiaires Cu_2Se et In_2Se_3 , d'après [13]. « Ch. » signifie chalcopyrite, « Sp. » signifie sphalérite.

La phase possède une structure en feuillets [15]. Le domaine de phases β est dû à la présence de défauts ordonnés dans la structure chalcopyrite α -CIS. C'est pourquoi ces phases sont communément appelées « phases ODC » (*Ordered Defect Compound*). Il a été démontré théoriquement que ces défauts ordonnés sont majoritairement des ensembles neutres du type $(2V_{\text{Cu}}^- + \text{In}_{\text{Cu}}^{2+})$, car leur formation est énergétiquement favorable.

Les phases ODC peuvent être considérées comme des répétitions périodiques d'un défaut $(2V_{\text{Cu}}^- + \text{In}_{\text{Cu}}^{2+})$, toutes les n mailles élémentaires de α -CIS.

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 sont 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 $x = ([\text{Ga}]/([\text{In}]+[\text{Ga}])) = 0.3$). En effet, dans le CIS pur la distance inter planaire des plans (220) est inférieure à celle des plans (204). Dans le cas du CGS pur, c'est l'inverse. La variation de composition du CIGS entraîne une variation des distances inter planaires entre ces deux extrêmes. Ainsi, pour des compositions proches de $x = 0.3$, $d_{220} \cong d_{204}$.

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 [16], mais aussi des propriétés du substrat [17]

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 [18] Cependant, cette hypothèse est aussi contestée [8]. D'autres études avancent plus généralement que l'orientation (220/204) permet de former une interface CdS/CIGS avec moins de défauts [19].

II.4.2. Les propriétés électriques du CIGS

Structure de bandes

Les cellules à base de CIGS sont stables dans le temps grâce à leur qualité de résistance aux rayonnements, due essentiellement à la mobilité du cuivre et à la grande densité de défauts, qui se réarrangent et permettent d'assurer une stabilité électrique.

Le CuInSe_2 et le CuGaSe_2 sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035eV et 1.68eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande conduction (E_c) [20] Comme nous l'avons vu précédemment, le CIGS est une solution 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 CGS, suivant la loi empirique suivante [21] :

$$E_g = 1.035 + 0.65X - 0.264X(1 - X) \quad \text{I-15}$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1.035eV et 1.68eV en fonction du taux de dopage au 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 1.2eV [22], ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30%.

Quelques propriétés physiques et chimiques des éléments constituant la couche mince de CIGS sont représentées sur le tableau suivant.

Paramètres	Cu	In	Ga	Se
Masse atomique(g)	63,4566	114,818	69,720	78,960
Densité à 300K (g / cm ³)	8,96	7,61	5,91	4,79
Température de fusion (°C)	1083,40	156,61	29,78	685
Température d'ébullition (°C)	2593	2080	2403	2017,00
Conductivité électronique (10 ⁶ /cm)	0,596	0,116	0,067	10 ⁻¹²
Conductivité thermique (W/cm K)	4,010	0,816	0,406	0,020
Potentiel d'ionisation (1 ^{er}) (eV)	7,726	1,786	5,999	9,752
Electronégativité	1,90	1,78	1,81	2,4
Rayon atomique (pm°)	127,8	155-162,6	122,1	116,0

Tableau I. 1: propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, In, Ga, Se [23]

Joint de grain

Le CIGS utilisé dans les cellules solaires est polycristallin et possède donc des joints de grains. A ces interfaces, le CIGS présente divers défauts structuraux chargés positivement, principalement des lacunes de sélénium V_{Se} [24]. Ces défauts chargés entraînent localement une courbure des bandes (zone de déplétion) et peuvent devenir une source de recombinaisons. La figure I.11a illustre la structure électronique aux joints de grain dans un tel cas.

L'un des intérêts du CIGS est que sa structure électronique aux joints de grains n'est pas particulièrement néfaste pour les performances de la cellule [8]. 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 [24]. Cela a pour effet d'inhiber les effets de charge aux joints de grains. Cet effet de passivation est présenté dans la figure I.11b. 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 [25].

Cela entraîne un abaissement du maximum de la bande de valence par absence d'états électroniques liés aux orbitales d du Cu [26]. Il en résulte une barrière aux trous qui permet de limiter les recombinaisons [27]. La figure I.11c montre la configuration décrite selon ce modèle. Ainsi, il a été démontré que des cellules dont le matériau absorbeur présente de petits grains (donc davantage de joints de grains) pouvaient atteindre des rendements équivalents à des cellules basées sur du CIGS à gros grains [28].

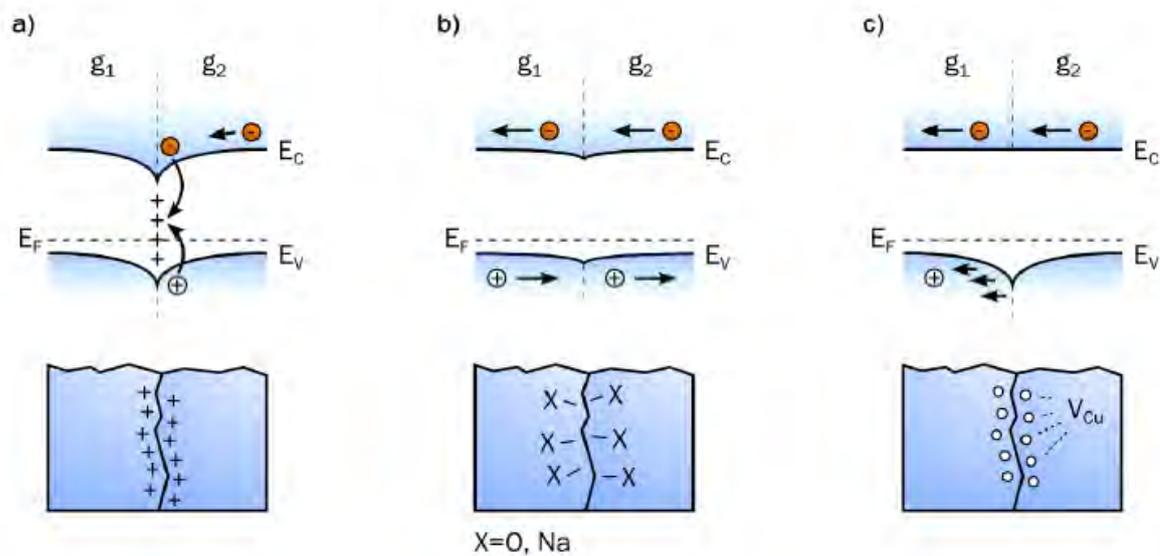


Figure I. 11 : Structures électroniques possibles aux joints de grain, entre un grain g_1 et un grain g_2

a) Présence de défauts chargés entraînant une courbure de bandes et des recombinaisons. b) Passivation des défauts par l’oxygène ou le sodium. c) Présence d’une barrière aux trous dans la bande de valence liée aux lacunes de Cu. Dopage

Le CIGS utilisé dans les cellules standard est de type p. Ce dopage est dû à la présence de défauts cristallins générant des états accepteurs (dopage intrinsèque). La figure I.12 récapitule les niveaux d’énergie théoriques correspondant aux principaux défauts cristallins présents dans le CIS. Dans le cas du CIGS, ces valeurs varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga [29] Les niveaux accepteurs sont principalement dus aux lacunes de cuivre (VCu) et d’indium (VIn), ainsi qu’aux substitutions d’indium par le cuivre ($CuIn$). Cependant le dopage p du CIGS est essentiellement lié aux VCu pour deux raisons. Premièrement, ils génèrent un niveau accepteur très proche (0.03 eV) du maximum de la bande de valence. Deuxièmement, leur énergie de formation est la plus favorable ($E_f = 0.6eV$) [30] Quant aux défauts générant des niveaux donneurs ($InCu$ et Cu_i), ils possèdent une énergie de formation beaucoup élevée que les VCu . C’est donc l’abondance de ce dernier défaut dans le CIGS qui est à l’origine de son dopage p.

Mécanismes de recombinaison

Nous avons vu que dans une cellule solaire, les paires électron-trou sont créées par absorption de la lumière. Les recombinaisons de ces paires électron-trou font partie des phénomènes fondamentalement limitants les performances des dispositifs photovoltaïques.

Un mécanisme de recombinaison donné est caractérisé par un taux de recombinaison R , représentant le nombre de recombinaisons par unité de temps et par unité de volume de matériau semiconducteur. Il existe trois principaux mécanismes : l'effet Auger, la recombinaison radiative et la recombinaison assistée par un piège dans la bande interdite.

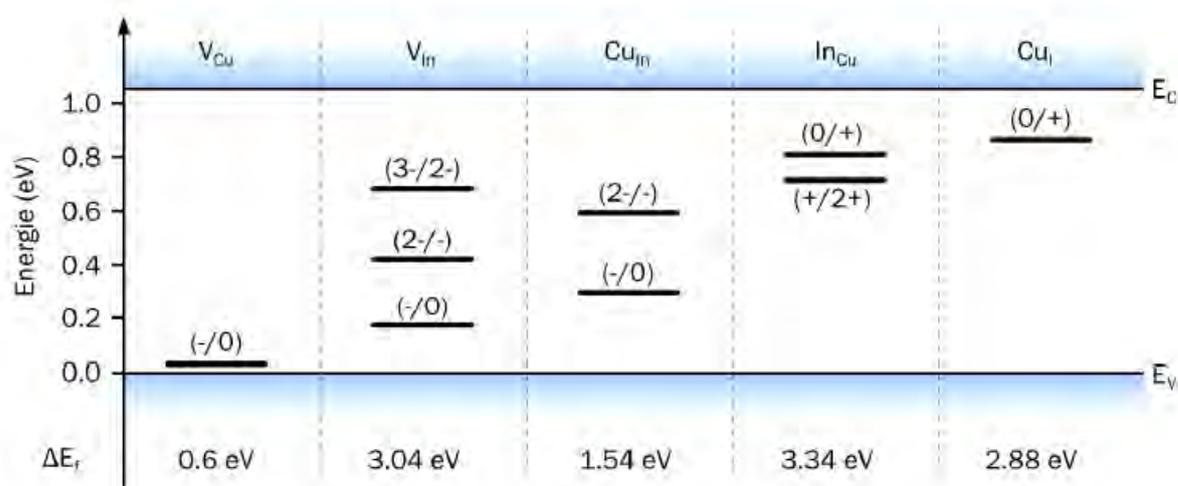


Figure I. 12 : Valeurs théoriques des énergies de transition électronique des principaux défauts cristallins dans le CIS.

Les valeurs entre parenthèses indiquent les variations d'état de charge correspondant à chaque niveau. ΔE_f est la valeur théorique de l'énergie de formation de chaque défaut dans le cristal [30].

Cette dernière est aussi appelée recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH). La figure I.13 illustre ces différents mécanismes de recombinaisons au sein d'un semiconducteur.

Les recombinaisons SRH se produisent lorsque des niveaux présents dans la bande interdite capturent des porteurs. Ces derniers se retrouvent rapprochés de la bande opposée (bande de valence pour un électron capturé, bande de conduction pour un trou capturé), ce qui facilite leur recombinaison. Les niveaux susceptibles de participer aux recombinaisons SRH peuvent provenir de défauts structuraux (voir la section précédente) ou de la présence d'impuretés dans le CIGS.

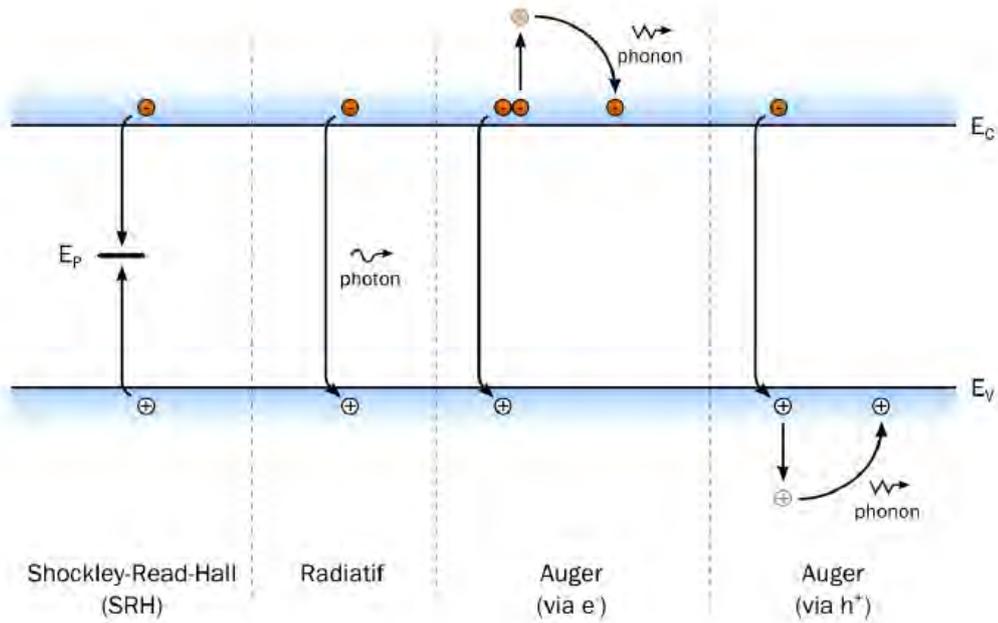


Figure I. 13 : Principaux mécanismes de recombinaison dans un semiconducteur

Shockley-Read-Hall (SRH), radiatives et Auger. D'après [31]

Les recombinaisons radiatives se font par transition directe d'un électron entre les bandes de conduction et de valence. L'énergie de la transition est libérée sous forme d'un photon. Dans le CIGS de type p,

Les recombinaisons Auger sont elles aussi des transferts directs bande à bande d'un porteur. Dans ce cas il peut s'agir d'un électron ou d'un trou. Cependant, au lieu d'être émise sous forme d'un photon, l'énergie est transférée à un autre porteur du même type. Ce dernier se thermalisera ensuite par émission de phonons (voir figure I.13).

II.4.3. Les propriétés optiques du CIGS

L'alliage CIGS possède des propriétés optiques qui font de lui un très bon matériau photovoltaïque. Le CIGS est aussi un matériau qui s'adapte pour capter de manière presque optimale la lumière du soleil.

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est 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 semiconducteur à gap indirect comme le silicium). Pour une énergie de photon $h\nu$ donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement [8] :

$$\alpha(h\nu) = \frac{A}{h\nu} \sqrt{h\nu - E_g} \quad \text{I-16}$$

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

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 [31]

$$G(x) = (1 - s) \int_{\lambda} (1 - r(\lambda)) (1 - a(\lambda)) f(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda \quad \text{I-17}$$

avec s le facteur d'ombrage des grilles de contact avant de la cellule, r la réflexion en face avant, a l'absorption en face avant, f le flux de photons incident, α le coefficient d'absorption optique vu précédemment et λ la longueur d'onde des photons. Le courant photogénéré dans le CIGS dépendra directement de G selon la relation suivante :

$$J_{ph} = q \int_0^H G(x) P_{col}(x) dx \quad \text{I-18}$$

Avec H l'épaisseur du CIGS et $P_{col}(x)$ la probabilité de collecte des porteurs photogénérés à la distance x . Cette probabilité de collecte est maximale ($P_{col} \approx 1$) dans la zone de déplétion grâce à la force de séparation du champ électrique. Elle diminue à mesure que l'on s'éloigne de cette zone.

La capacité d'une cellule à générer et collecter des porteurs à partir d'un rayonnement incident est caractérisée par le rendement quantique externe (*External Quantum Efficiency*, EQE). Ce dernier représente le nombre de porteurs effectivement collectés pour un photon incident et pour une longueur d'onde donnée.

II.5 Quelques méthodes de détermination de paramètres de cellule solaire

I-5.1 (Mesure des paramètres électriques d'une cellule en Arséniure de Gallium « GaAs/Ge », par spectroscopie d'impédance) [32]

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 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, on a $R_{sh} \gg R_D$.

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 :

$$R_D = \frac{V_T \times n}{J} \quad \text{I-19}$$

V_T la tension thermique, n facteur d'idéalité, et J le photocourant de la cellule solaire

I-5-2 Nouvelle méthode de caractérisation de l'impédance dynamique d'une cellule solaire [33]

Cet article fait 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 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 :

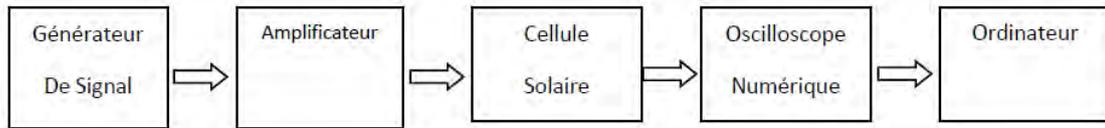


Figure I. 14 : Dispositif expérimental utilisé en spectroscopie d'impédance

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire en régime dynamique est représenté à la figure I.15 :

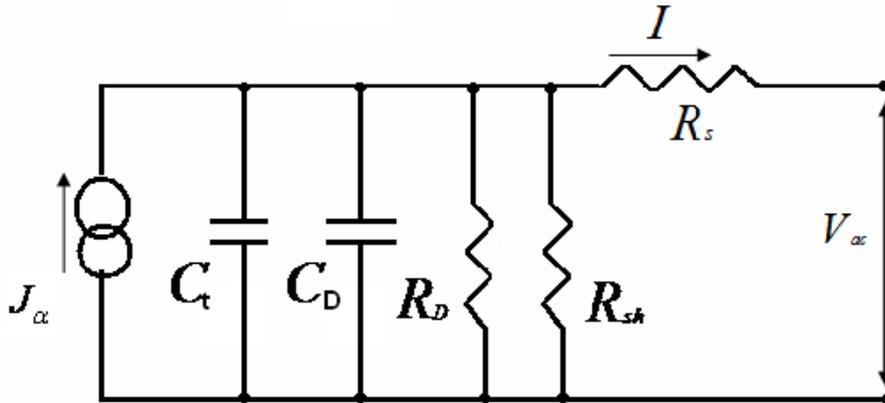


Figure I. 15 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

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

$$R_{pv} + i. X_{PV} = R_S + \frac{R_D \cdot R_{sh} \cdot (R_{sh} + R_D)}{(R_{sh} + R_D)^2 + (\omega \cdot R_D \cdot R_{sh} \cdot C)^2} - \frac{i \cdot \omega \cdot (R_D \cdot R_{sh})^2 \cdot C}{(R_{sh} + R_D)^2 + (\omega \cdot R_D \cdot R_{sh} \cdot C)^2} \quad \text{I-20}$$

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 ci-dessous :

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

Tableau I. 2: Valeurs de la résistance dynamique

R_{d1} est obtenue à partir de la méthode de détermination qui utilise un courant continu modulé par un petit signal carré et 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 entré carré, plutôt qu'une mesure absolue qui dépend de l'exactitude et de la qualité de l'équipement d'essai.

I-5-3-PV MODULE DYNAMIC IMPEDANCE AND ITS VOLTAGE AND FREQUENCY DEPENDENCIES [34]

Cet article présente une méthode de détermination de l'impédance dynamique à partir du modèle électrique équivalent suivant :

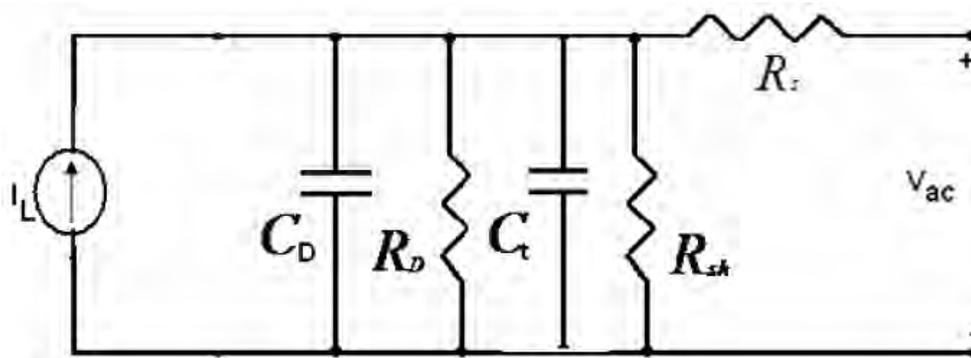


Figure I. 16 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

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.

I-5-4- Mesure des paramètres électriques d'une photopile par la méthode de la Spectroscopie d'impédances [35]

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 I.17

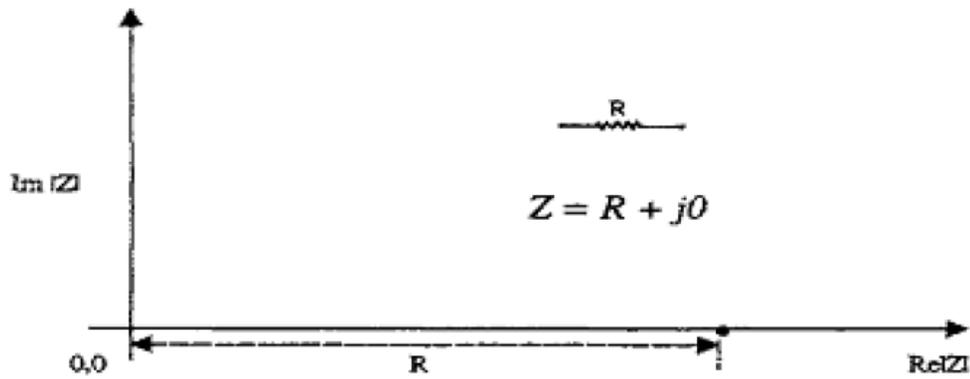


Figure I. 17 : Impédance d'une résistance pure (R)

Le Spectre d'impédance d'une capacité pure (C) que nous présentons à la figure I.18

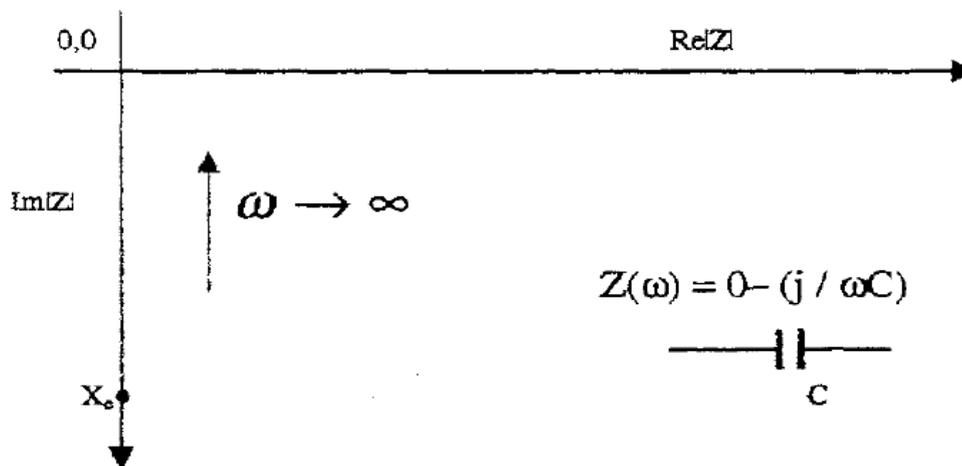


Figure I. 18 : Impédance d'une capacité pure (C)

Le Spectre de l'impédance spectroscopique d'une inductance pure (L) que nous présentons à la figure I.19

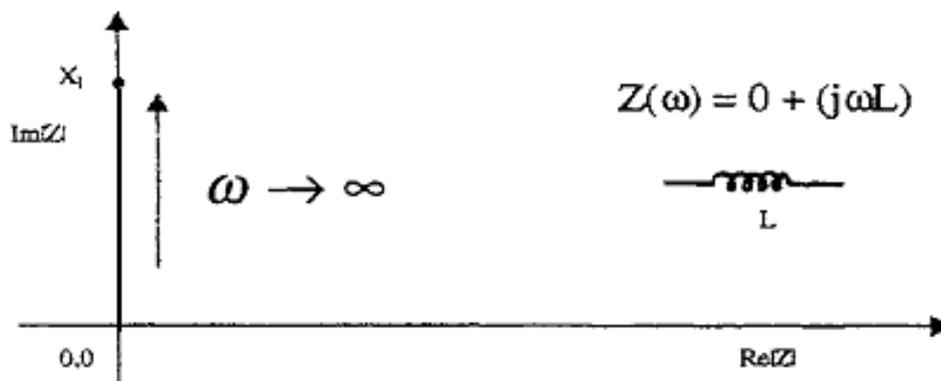


Figure I. 19 : Impédance d'une inductance pure (L)

Le Spectre de l'impédance spectroscopique d'un circuit R-C en série que nous présentons à la figure I.20

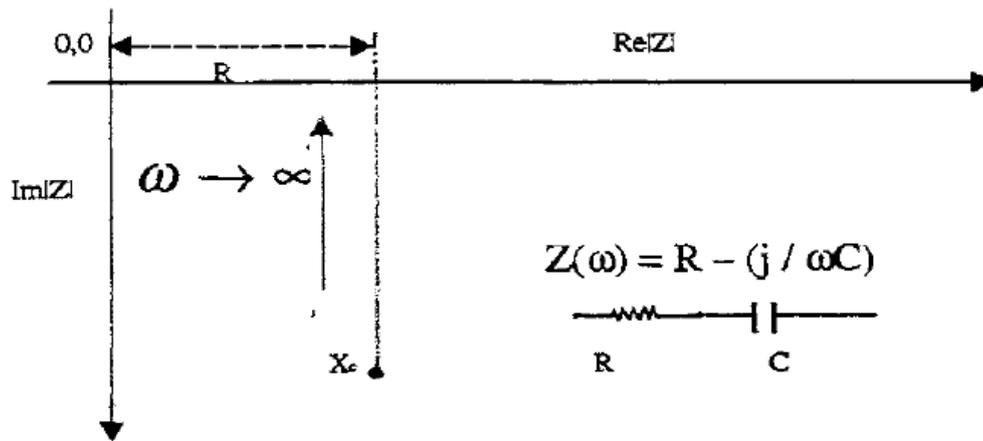


Figure I. 20 : Impédance d'un circuit R-C en série

Le Spectre d'impédance d'un circuit R-L en série que nous exposons à la figure I.21

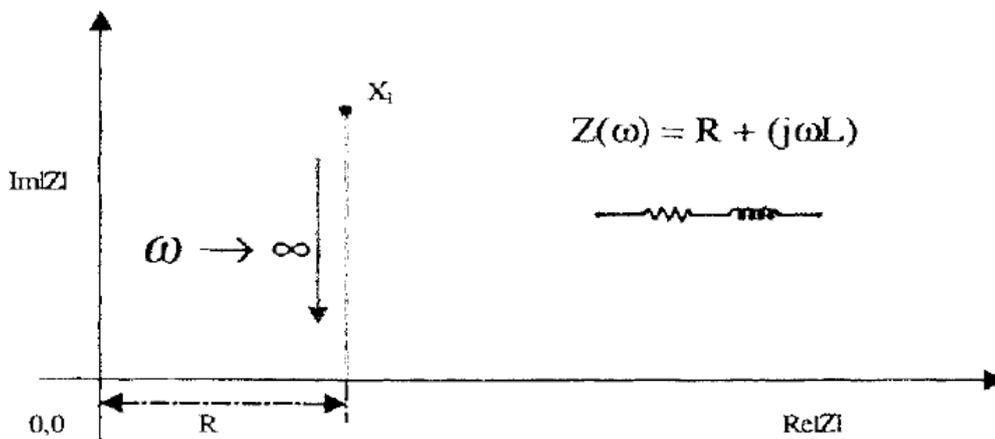


Figure I. 21 : Impédance d'un circuit R-L en série

Le Spectre d'impédance d'un circuit R-C en parallèle que nous montrons à la figure I.22

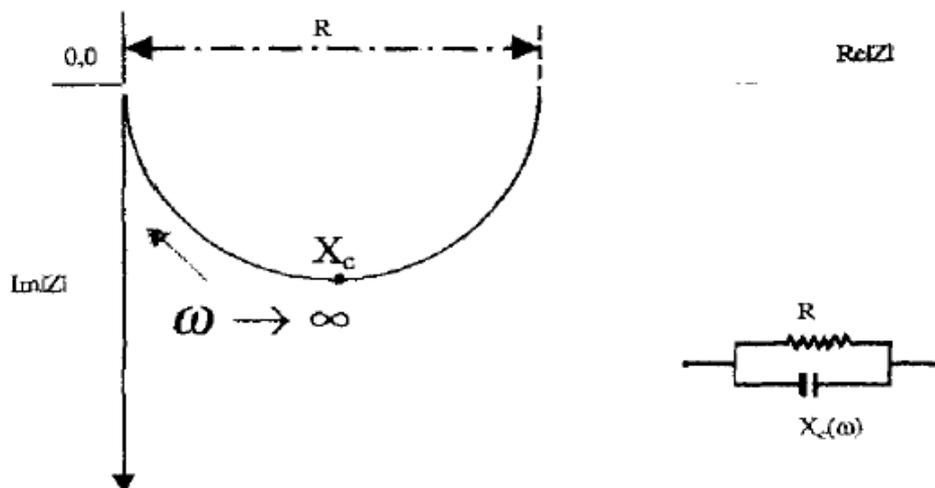


Figure I. 22 : Impédance d'un circuit R-C en parallèle

Le Spectre d'impédance d'un circuit R-L en parallèle que nous reproduisons à la figure I.23

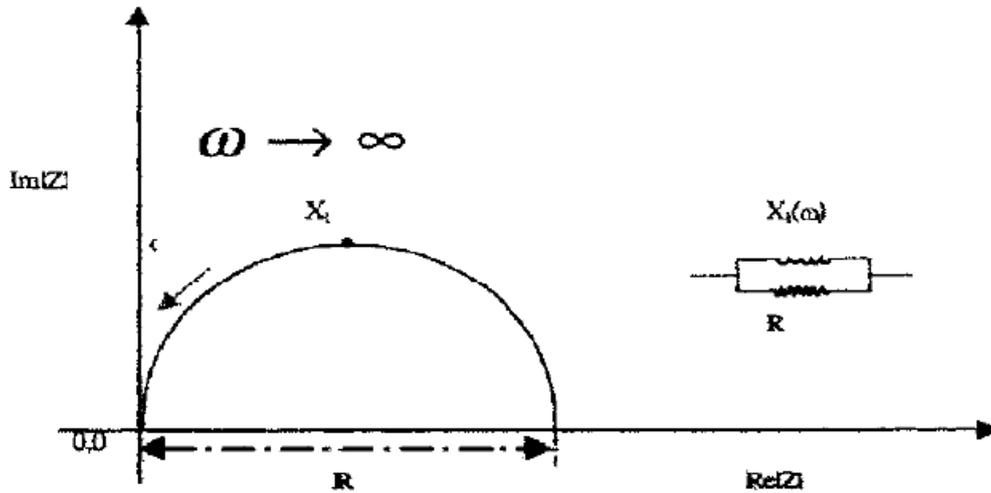


Figure 1. 23 : Impédance d'un circuit R-L en parallèle

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

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions fondamentales et principales qui concernent le gisement solaire ainsi qu'une description physique et électrique de l'élément indispensable et essentiel dans notre étude en l'occurrence la cellule solaire et surtout sa base absorbante le CIGS ; enfin quelques méthodes de caractérisation de cellules solaire par la spectroscopie à impédance dynamique.

Références

- [1]. Jackson, P. et al. « New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20% ». *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19, (2011) 894–897
- [2]. Powalla, M. et al. « Large-area CIGS modules : Pilot line production and new developments ». *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90, (2006) 3158–3164
- [3]. Dhere, N. G. Toward GW/ « year of CIGS production within the next decade ». *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91, (2007) 1376–1382.
- [4] J.A. Duffie, W.A. Beckman, « *Solar Energy Thermal Processes* », John Wiley & Sons, 1974.
- [5] [1] Q. LIU, V. BOURDIN, P. HOANG, G. CARUSO, V. ARCHAMBAULT, « Coupling optical and thermal models to accurately predict PV panel electricity production », Photovoltaic Technical Conference - Thin Film & Advanced Silicon Solutions 22th to 24th of May 2013 Aix-en-Provence
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM), G173-03, ISO 9845-1, 1992
- [7] A. Romeo *et al.*, “Development of thin-film Cu(In,Ga)Se₂ and CdTe solar cells”, *Progress in Photovoltaics* : Res. Appl. 12, (2004) 93–111
- [8] William N. Shafarman, Susanne Siebentritt, and Lars Stolt. « Cu(InGa)Se₂ Solar Cells ». In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, page 546. 2011
- [9] U. Rau, P. O. Grabitz, and J. H. Werner. « Resistive limitations to spatially inhomogeneous electronic losses in solar cells ». *Applied Physics Letters*, vol.85, issue.24, p.6010, 2004
- [10] R. Kishore “Accurate analytical expressions for the parameters of the single exponential model of the solar cells” *Solid-State Electronics* Vol. 32, No.6 (1989) pp 493-495
- [11] J. S. Park, Z. Dong, Sungtae Kim, and J. H. Perepezko. « CuInSe₂ phase formation during Cu₂Se/In₂Se₃ interdiffusion reaction ». *Journal of Applied Physics*, 87(8) (2000) ,3683.
- [12] Klaus J. Bachmann, Hans Goslowky, and Sebastian Fiechter. « The phase relations in the system Cu,In,Se ». *Journal of Crystal Growth*, 89(2-3) (June 1988)160–164.
- [13] Dominik Rudmann. « *Effects of sodium on growth and properties of Cu(In, Ga)Se₂ thin films and solar cells* », *PhD Thesis*. 2004.
- [14] Tung-Po Hsieh, Chia-Chih Chuang, Chung-Shin Wu, Jen-Chuan Chang, Jhe-Wei Guo, and Wei-Chien Chen. « Effects of residual copper selenide on CuInGaSe₂ solar cells ». *Solid-State Electronics*, 56(1) (February 2011) 175–178.

- [15] U. C. Boehnke and G. Kühn. « Phase relations in the ternary system Cu-In-Se. *Journal of Materials Science* », 22(5) (May 1987)1635–1641.
- [16] Shogo Ishizuka, Akimasa Yamada, Paul Fons, and Shigeru Niki. « Texture and morphology variations in (In,Ga)₂Se₃ and Cu(In,Ga)Se₂ thin films grown with various Se source conditions ». *Wiley Online Library, June 2013 Pages 544-553*
- [17] Dong Hyeop Shin, Young Min Shin, Ji Hye Kim, Byung Tae Ahn, and Kyung Hoon Yoon. « Control of the Preferred Orientation of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film by the Surface Modification of Mo Film ». *Journal of The Electrochemical Society*, 159 (1) B1-B5 (2012).
- [18] Sutichai Chaisitsak, Akira Yamada, and Makoto Konagai. « Preferred Orientation Control of Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ (x=0.28) Thin Films and Its Influence on Solar Cell Characteristics ». *Japanese Journal of Applied Physics*, 41(2A) (2002) 507–513.
- [19] M A Contreras, K M Jones, L Gedvilas, and R Matson. « Preferred Orientation in Polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ and Its Effect on Absorber Thin-Films and Devices ». In *Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Glasgow, Scotland, U.K., NREL/CP-520-28379, May, 2000.*
- [20] M. Turcu, I. M. Kotschau, and U. Rau. « Composition dependence of defect energies and band alignments in the Cu(In,Ga)(Se,S)₂ alloy system ». *Journal of Applied Physics*, **91**, 1391 (2002); <https://doi.org/10.1063/1.1432126>
- [21] P. D. Paulson, R. W. Birkmire, and W. N. Shafarman. « Optical characterization of Cu(In,Ga)Se₂ alloy thin films by spectroscopic ellipsometry ». *Journal of Applied Physics*, **94**, 879 (2003); <https://doi.org/10.1063/1.1581345>
- [22] Sunghun Jung, SeJin Ahn, Jae Ho Yun, Jihye Gwak, Donghwan Kim, and Kyunghoon Yoon. « Effects of Ga contents on properties of CIGS thin films and solar cells fabricated by co-evaporation technique ». *Current Applied Physics*, 10(4) (July 2010) 990–996.
- [23] Mostefa Kara SELMA, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de CIS et CIGS », Université Abou-bakrBlekaidTlemcen, mémoire, soutenu en juin 2012, 61-62
- [24] U. Rau and H.W. Schock. « Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells-recent achievements, current understanding, and future challenges ». *Applied Physics A : Materials Science & Processing*, 69(2) (August 1999) 131–147.
- [25] Pyuck-Pa Choi, Oana Cojocaru-Miredin, RolandWuerz, and Dierk Raabe. « Comparative atom probe study of Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells deposited on soda-lime glass and mild steel substrates ». *Journal of Applied Physics*, 110(12) (2011) 124513.

- [26] Clas Persson and Alex Zunger. « Anomalous Grain Boundary Physics in Polycrystalline CuInSe₂ : The Existence of a Hole Barrier ». *Physical Review Letters*, 91(26) (December 2003) 266-401.
- [27] Markus Gloeckler, James R. Sites, and Wyatt K. Metzger. « Grain-boundary recombination in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells ». *Journal of Applied Physics*, **98**, 113704 (2005); <https://doi.org/10.1063/1.2133906>
- [28] Philip Jackson, Roland Würz, Uwe Rau, Julian Mattheis, Matthias Kurth, Thomas Schlötzer, Gerhard Bilger, and Jürgen H. Werner. « High quality baseline for high efficiency, Cu(In,Ga)Se₂ solar cells ». *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 15(6) (September 2007) 507–519.
- [29] Su-HuaiWei, S. B. Zhang, and Alex Zunger. « Effects of Ga addition to CuInSe₂ on its electronic, structural, and defect properties ». *Applied Physics Letters*, 72, 3199 (1998); doi: 10.1063/1.121548.
- [30] S. Zhang, Su-Huai Wei, Alex Zunger, and H. Katayama-Yoshida. « Defect physics of the CuInSe₂ chalcopyrite semiconductor ». *Physical Review B*, 57(16) (April 1998) 9642–9656.
- [31] Jeffery L. Gray. « The Physics of the Solar Cell ». In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2011. 82–129
- [32] R. Anil Kumar, M. S. Suresh And J. Nagaraju “Measurement of AC Parameters of Gallium Arsenide (GaAs/Ge) Solar Cell by Impedance Spectroscopy” IEEE Transactions on Electron Devices Vol. 48, No.9, September 2001, 2177-2179
- [33] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, c. Jivacate “A new characterization method for solar cell dynamic impedance”, Solar Energy Materials and Solar Cells 80 (2003) 459-464.
- [34] D. Chenvidhya, Kirtikara, C. Jivacate “nonstationary effects at photovoltaic module characterization using pulsed solar simulator” Solar Energy Materials and Solar Cells 86 (2005) 243-251
- [35] R. Anil Kumar “Measurement of solar Cell AC parameters using Impedance Spectroscopy” A Thesis Submitted of the Degree of Master of Science in Faculty of Engineering. Department of Instrumentation Indian Institute of Science INDIAN January 2000

CHAPITRE II : Etude théorique d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) sous éclairage monochromatique effets du taux de dopage au gallium et de l'angle d'incidence

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer une étude d'une photopile à base de CIGS, en régime dynamique fréquentiel, sous un éclairage monochromatique. Nous établirons l'équation de continuité régissant la diffusion de porteurs minoritaires de charge en excès générés pour un éclairage de la face avant de la photopile.

Nous présenterons une étude de la densité de porteurs minoritaires, de la densité de photocourant puis la phototension.

L'influence de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur la densité de porteurs minoritaires, la densité de photocourant et de la phototension sera mise en évidence. Nous procéderons ensuite à la détermination du photocourant de court-circuit, de la phototension de circuit-ouvert ensuite nous étudierons la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sfo au moyen des diagrammes de Bode et de Nyquist.

II-1 Présentation de la photopile monofaciale à base de CIGS

Dans le cadre de cette étude nous proposons à la figure II.1 suivante le schéma simplifié d'une photopile à base de CIGS.

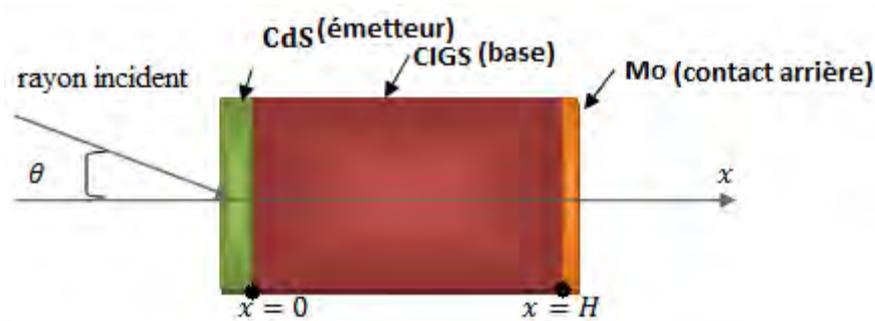


Figure II. 1 schéma simplifié d'une photopile monofaciale à base de CIGS

Où θ est l'angle d'incidence du rayonnement et H l'épaisseur de la base

Dans cette étude, la contribution de l'émetteur est négligée.

Le modèle mathématique unidimensionnel de la photopile est considéré suivant l'axe (ox) où l'origine ($x=0$) coïncide à la jonction.

II-2 Densité des porteurs minoritaires générés dans la base de la photopile.

II-2-1 Equation de continuité en régime dynamique fréquentiel.

Sous l'effet d'une excitation (optique ou électrique) incidente, des porteurs minoritaires de charge sont générés dans la base de la photopile. Ces porteurs de charge peuvent diffuser à travers la zone de charge d'espace pour participer au courant externe. Certains subissent au sein de la photopile des recombinaisons dues aux défauts présents dans la photopile après sa fabrication.

Compte tenu des phénomènes de génération, de recombinaison et de diffusion des porteurs minoritaires au sein de la photopile, l'équation de continuité de ces porteurs minoritaires dans la base est donnée par : [1-2]

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

Avec $D(\omega)$ le coefficient de diffusion complexe des porteurs minoritaires ; $\delta(x, \theta, t)$ la densité des porteurs minoritaires ; $G(x, \theta, t)$ le taux de génération global des porteurs minoritaires dans la base et τ la durée de vie moyenne des porteurs minoritaires.

La densité des porteurs minoritaires et le taux de génération des porteurs minoritaires dans la base peuvent se mettre respectivement sous la forme [3-4]:

$$\delta(x, \theta, t) = \delta(x, \theta) e^{(i\omega t)} \quad (\text{II-2})$$

$$G(x, \theta, t) = g(x, \theta) e^{(i\omega t)} \quad (\text{II-3})$$

Où $\delta(x, \theta)$ et $g(x, \theta)$ sont les composantes spatiales et $e^{(i\omega t)}$ est la composante temporelle.

Le taux de génération $g(x, \theta)$, pour un éclairage par la face avant de la photopile est de la forme :

$$g(x, \theta) = \alpha(\lambda) \Phi(\lambda) (1 - R(\lambda)) \cos(\theta) e^{(-\alpha(\lambda)x)} \quad (\text{II-4})$$

Où $\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption à la longueur d'onde λ ; $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion ; $\Phi(\lambda)$ est le flux de photons incident et θ est l'angle d'incidence.

En remplaçant les équations (II-2), (II-3) et (II-4) dans l'équation (II-1), nous obtenons l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 \delta(x, \theta)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \theta)}{L_\omega^2} + \frac{g(x, \theta)}{D(\omega)} = 0 \quad (\text{II-5})$$

Où L_ω est la longueur de diffusion complexe dont l'expression est :

$$L_\omega = L_0 \sqrt{\frac{(1 - i\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (\text{II-6})$$

Où L_0 est la longueur de diffusion en régime stationnaire. Le coefficient de diffusion, la durée de vie moyenne et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires sont liés par la relation :

$$L_{\omega}^2 = \tau D(\omega) \quad (\text{II-7})$$

II- 2-2 Solution de l'équation de continuité et conditions aux limites

II- 2-2 -1 Solution de l'équation de continuité

La solution générale de l'équation (5) s'écrit sous la forme :

$$\delta(x, \lambda, \omega, \theta) = \left[A \cosh\left(\frac{x}{L_{\omega}}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_{\omega}}\right) - \frac{\alpha(\lambda)\phi(\lambda)(1-R(\lambda))\cos\theta}{D(\omega).(\alpha^2(\lambda)L_{\omega}^2-1)} e^{(-\alpha(\lambda)x)} \right] \quad (\text{II-8})$$

II- 2-2 -2 Conditions aux limites

Les coefficients A et B sont déterminées par les conditions aux limites suivantes [5-6]:

➤ à la jonction (en $x=0$):

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, \omega, \theta)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{SF}{D(\omega)} \delta(0, \lambda, \omega, \theta) \quad (\text{II-9})$$

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

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, \omega, \theta)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{SB}{D(\omega)} \delta(H, \lambda, \omega, \theta) \quad (\text{II-10})$$

Où SF et SB désignent respectivement les vitesses de recombinaisons des porteurs minoritaires à la jonction et à la face arrière de la base.

Par ailleurs le coefficient d'absorption du CIGS donné dans l'expression de la densité de porteurs minoritaires est de la forme [7]:

$$\alpha(\lambda, X) = A \sqrt{\left(\frac{hc}{\lambda} - E_g(X)\right)} \quad (\text{II-11})$$

où A ($\text{cm}^{-1}\text{eV}^{-1/2}$) une constante et $E_g(X)$ le gap du matériau CIGS donné par l'expression [8]:

$$E_g(X) = 1,035 + 0,65X - 0,264X(1 - X) \quad (\text{II-12})$$

Delà les expressions de la densité de porteurs minoritaires, de la densité de photocourant et de la phototension sont déterminées en fonction de l'angle d'incidence du taux de dopage au gallium, de la fréquence, de la pulsation et de la longueur d'onde.

Par ailleurs il faut noter que l'importance de la bande interdite de la couche absorbante reste capitale pour améliorer les performances des cellules solaires en raison de son impact sur l'absorption et par conséquent, sur la génération des porteurs électron-trou. Ainsi nous représentons à la figure II-2 l'énergie du gap de CIGS en fonction du taux de dopage au gallium.

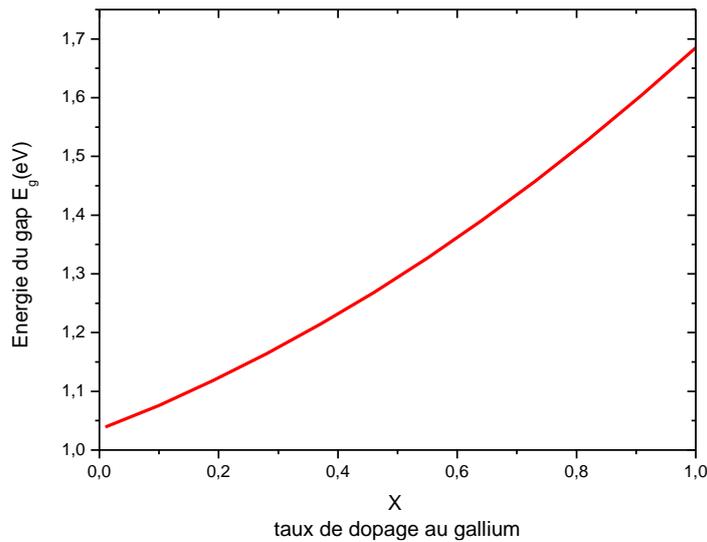


Figure II. 2 Energie du gap en fonction du taux de dopage au Gallium

La figure II-2 montre la variation de l'énergie du gap en fonction du taux de dopage au gallium. On observe une augmentation de l'énergie du gap E_g de la couche absorbante CIGS avec le taux de dopage au gallium. Cette évolution est aussi prévue par d'autres auteurs [9-10]. A la figure II-3 le coefficient d'absorption est représenté en fonction de la longueur d'onde pour différents taux de dopage au gallium.

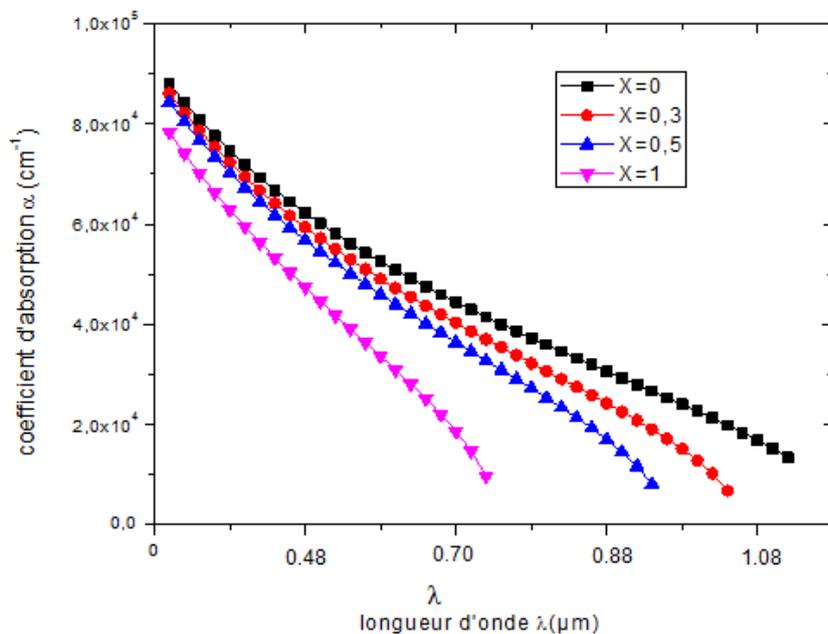


Figure II. 3 Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde pour différents taux de dopage au gallium

La figure II-3 illustre la variation du coefficient d'absorption du CIGS en fonction de la longueur d'onde pour différents taux de dopage au gallium. On note une diminution

progressive du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde. En effet pour un taux de dopage au gallium donné les faibles longueurs d'ondes (grandes énergies) correspondront à une absorption élevée ; d'où l'allure de la courbe.

Par ailleurs, les quatre courbes montrent que pour une longueur d'onde donnée, l'augmentation du taux de dopage au gallium entraîne une diminution du coefficient d'absorption. En effet de la figure II-2 nous avons constaté une augmentation de l'énergie du gap de CIGS en fonction du taux de dopage au gallium. Ainsi l'augmentation du gap diminue le rapport énergie incidente énergie du gap, d'où une diminution du coefficient d'absorption.

II.3 Profils de la densité des porteurs minoritaires

Ce paragraphe met en évidence les profils du module de la densité de porteurs minoritaires suivant la profondeur x de la base CIGS. Ces profils sont étudiés pour les effets de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence du rayonnement incident, et du taux de dopage au gallium.

II.3.1 Effet de la longueur d'onde

Pour différentes valeurs de la longueur d'onde du rayonnement incident, nous présentons à la figure II-4 le profil du module de la densité des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur de la base :

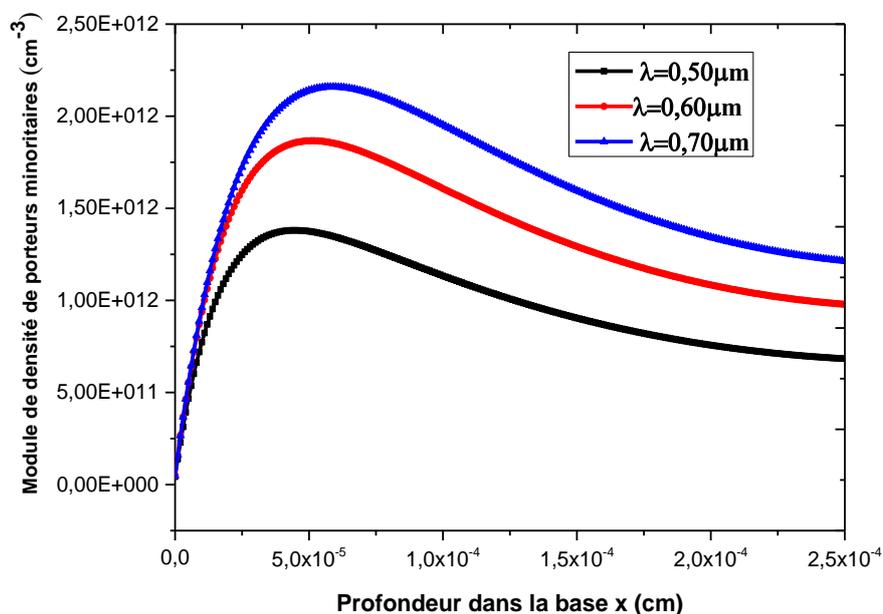


Figure II. 4 module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de longueur d'onde

$$SF = 6. 10^6 \text{ cm/s}; SB = 3. 10^3 \text{ cm/s}; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1}; X = 0,3 \theta = 0^\circ$$

A la figure II-4 le module de la densité des porteurs minoritaires augmente jusqu'à atteindre un maximum correspondant à une profondeur x_0 de la base. Puis pour une valeur de la profondeur x de la base supérieure à la valeur x_0 , le module de la densité des porteurs minoritaires diminue. Ainsi on distingue dans la base de la photopile deux zones délimitées par x_0 :

➤ **la zone où $x < x_0$**

Dans cette zone, le gradient de la densité des porteurs minoritaires dans la base de la photopile est positif : les porteurs de charge situés dans cette zone peuvent traverser la jonction et participer au photocourant. Cette zone est assimilée à une extension de la zone de charge d'espace ;

➤ **la zone où $x > x_0$**

Dans cette zone, le module de la densité des porteurs minoritaires diminue, ce qui implique ainsi un gradient négatif.

Les porteurs minoritaires de charge restent bloqués dans cette zone et subissent des recombinaisons en volume et en surface. Ces recombinaisons sont parfois dues à la présence de lacunes, de défauts structuraux chargés positivement, et principalement des lacunes de sélénium (VSe) [11]. Notons qu'à la profondeur x_0 , le gradient de la densité des porteurs minoritaires est nul : il n'y a pas de passage d'électrons car étant bloqués.

II.3.2 Effet de l'angle d'incidence

La figure II-5, présente, l'effet de l'angle d'incidence sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base :

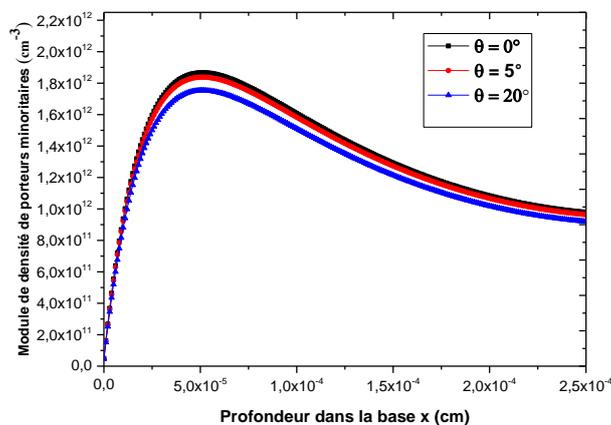


Figure II. 5 : module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de l'angle d'incidence θ [12]

$SF = 6. 10^6 \text{ cm/s}$; $SB = 3. 10^3 \text{ cm/s}$; $\omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1}$; $\lambda = 0,60 \mu\text{m}$; $X = 0,3$

La figure II-5 montre une augmentation de la densité de porteurs minoritaires jusqu'à la profondeur x_0 puis diminue progressivement. Par ailleurs on observe une diminution du module de la densité de porteurs avec l'augmentation de l'angle d'incidence. En effet lorsque l'angle d'incidence augmente, une grande épaisseur de l'atmosphère est traversée par le rayonnement incident qui perd une partie de son énergie ; ce qui entraîne une diminution de la densité des porteurs minoritaires.

II.3.3 Effet du dopage de Gallium

La figure II-6 présente l'effet du taux de dopage au gallium sur la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base :

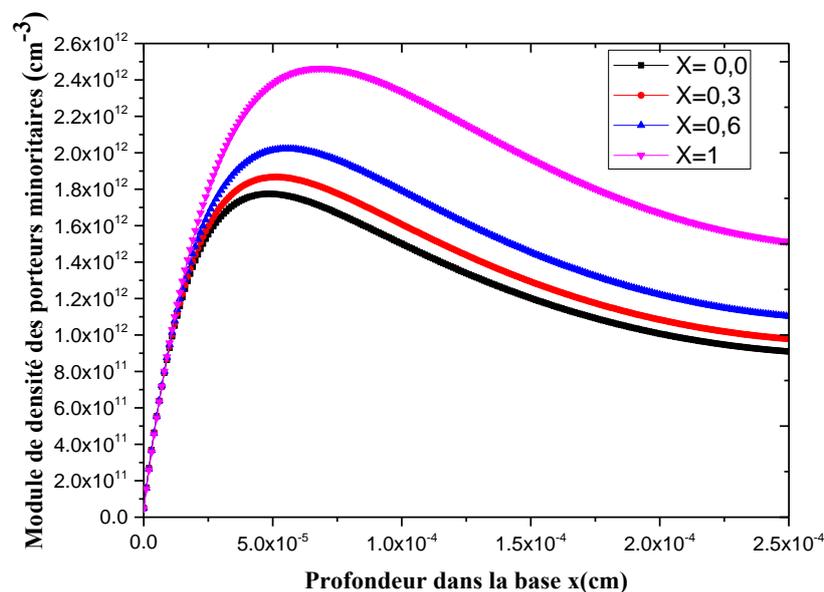


Figure II. 6 : module de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs du taux de dopage X [12]

$$SF = 6.10^6 \text{ cm/s} ; SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \lambda = 0,60\mu\text{m} ; \theta = 0^\circ$$

A la Figure II-6 les quatre courbes présentent les mêmes allures. On observe les deux zones (zone où $x > x_0$ et celle où $x < x_0$) expliquées dans les figures II-4 et II-5 précédentes. L'augmentation du taux de dopage au gallium entraîne celle de l'énergie du gap de CIGS donc la zone de charge d'espace x_0 On constate une augmentation du module de la densité des porteurs minoritaires quand le dopage au gallium augmente. Ainsi les faibles dopages favorisent des recombinaisons des porteurs minoritaires en profondeur de la base.

De l'expression de la densité des porteurs minoritaires, nous pouvons déduire respectivement la densité de photocourant et la phototension.

II.4. Profil de la densité de photocourant

En appliquant la loi de FICK, à la jonction de la photopile, nous obtenons la densité de photocourant donnée par :

$$J_{ph}(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) = q \cdot D(\omega) \cdot \left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (\text{II-13})$$

Où q est la charge élémentaire de l'électron.

II.4.1 Effet de la longueur d'onde

Nous représentons à la figure II-7, le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de longueurs d'ondes.

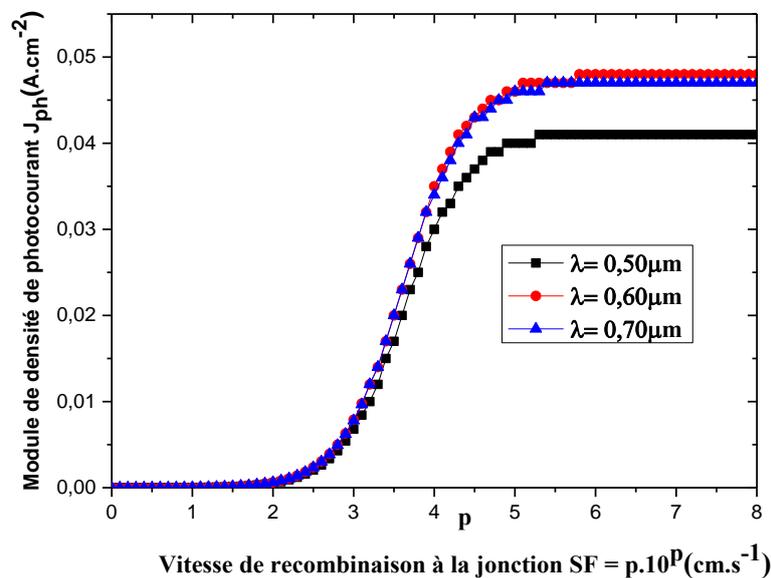


Figure II. 7 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde

$$SB = 3 \cdot 10^3 \text{ cm/s}; \omega = 10^6 \text{ rad.s}^{-1}; X = 0,3 \theta = 0^\circ$$

Cette figure II-7, montrent que pour les grandes valeurs de la vitesse (SF) de recombinaison à la jonction [$5 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$ à $8 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$], le module de la densité de photocourant tend vers une limite qui est la densité de courant de court-circuit J_{cc} .

En outre, pour les faibles valeurs (SF) de la vitesse de recombinaison à la jonction [0 à $2 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$], il n'y a pratiquement pas de passage des électrons à travers la jonction, alors on est au point de fonctionnement de circuit ouvert.

On note que les recombinaisons des paires électron-trou dans la zone de charge d'espace font partie des phénomènes fondamentalement limitant pour la performance des dispositifs photovoltaïques.

Dans cette figure II-7 nous constatons des fluctuations du courant de court-circuit avec l'augmentation de la longueur d'onde dans le visible.

II.4.2 Effet de l'angle d'incidence

Le profil du module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence, est représenté à la figureII-8 :

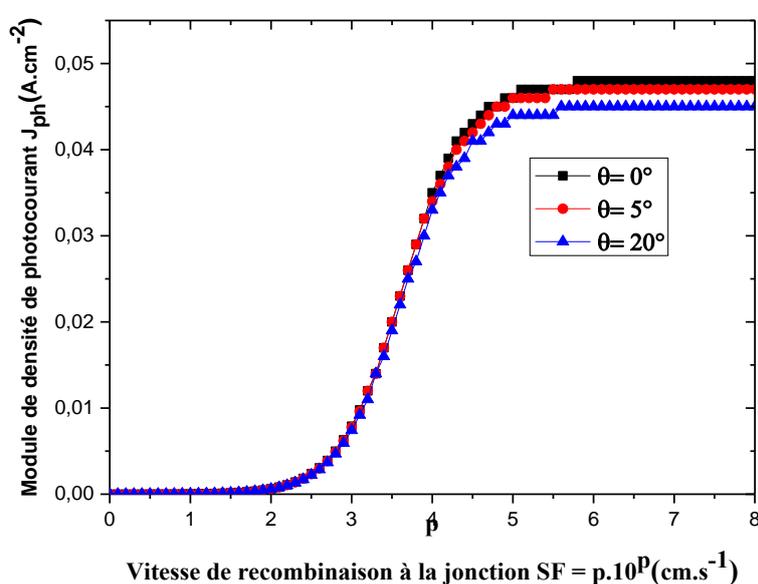


Figure II. 8 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence [12]

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad.s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; X = 0,3$$

Pour les faibles valeurs (SF) de la vitesse de recombinaison à la jonction [0 à 2.10^2 cm/s], la figure II-8 montre qu'il n'y a pratiquement pas de passage des électrons à travers la jonction, on est au point de fonctionnement de circuit-ouvert. Pour les grandes valeurs de la vitesse (SF) de recombinaison à la jonction [5.10^5 cm/s à 8.10^8 cm/s], le module de la densité de photocourant tend vers une limite élevée qui est la densité de courant de court-circuit J_{cc}

Nous constatons que le module de la densité de photocourant diminue quand on augmente l'angle d'incidence θ . En effet avec l'inclinaison du soleil (le soleil n'est plus au Zenith), le niveau d'éclairement diminue. Cela entraîne une baisse de génération de porteurs minoritaires dans la base, donc le photocourant.

II.4.3 Effet du dopage de Gallium

La figure II-9 suivante, explicite le profil du module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage au gallium :

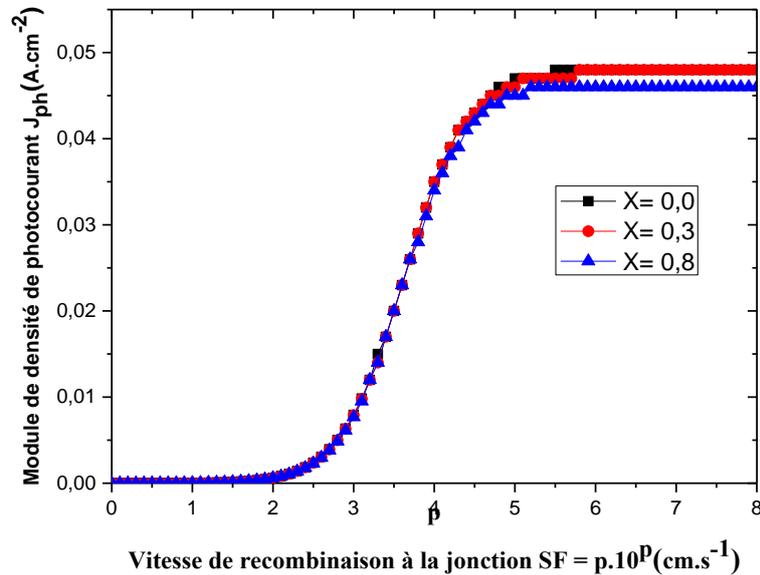


Figure II. 9 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage X [12]

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \quad \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \quad \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; \quad \theta = 0^\circ$$

On observe dans cette figure II-9, que pour des valeurs faibles de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction, le module de la densité de photocourant reste très faible, puis augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale constante correspondante au photocourant de court-circuit vers les grandes vitesses de recombinaisons à la jonction. Ainsi, nous constatons que plus qu'on augmente le taux de dopage X; plus la densité de photocourant diminue. En effet Zunger et al. ont suggéré que le changement des énergies de défauts des paires générées reste une possible explication des effets du gallium sur le module de la densité de photocourant [13]

De ces deux figures précédentes nous constatons que la densité de photocourant de court-circuit J_{cc} est plus affectée par l'angle d'incidence θ .

II.4.4 Profils du module de la densité de photocourant suivant SB pour différentes longueurs d'ondes

Nous représentons à la figure II-10 le profil de la densité du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière (SB) pour différentes longueurs d'onde λ :

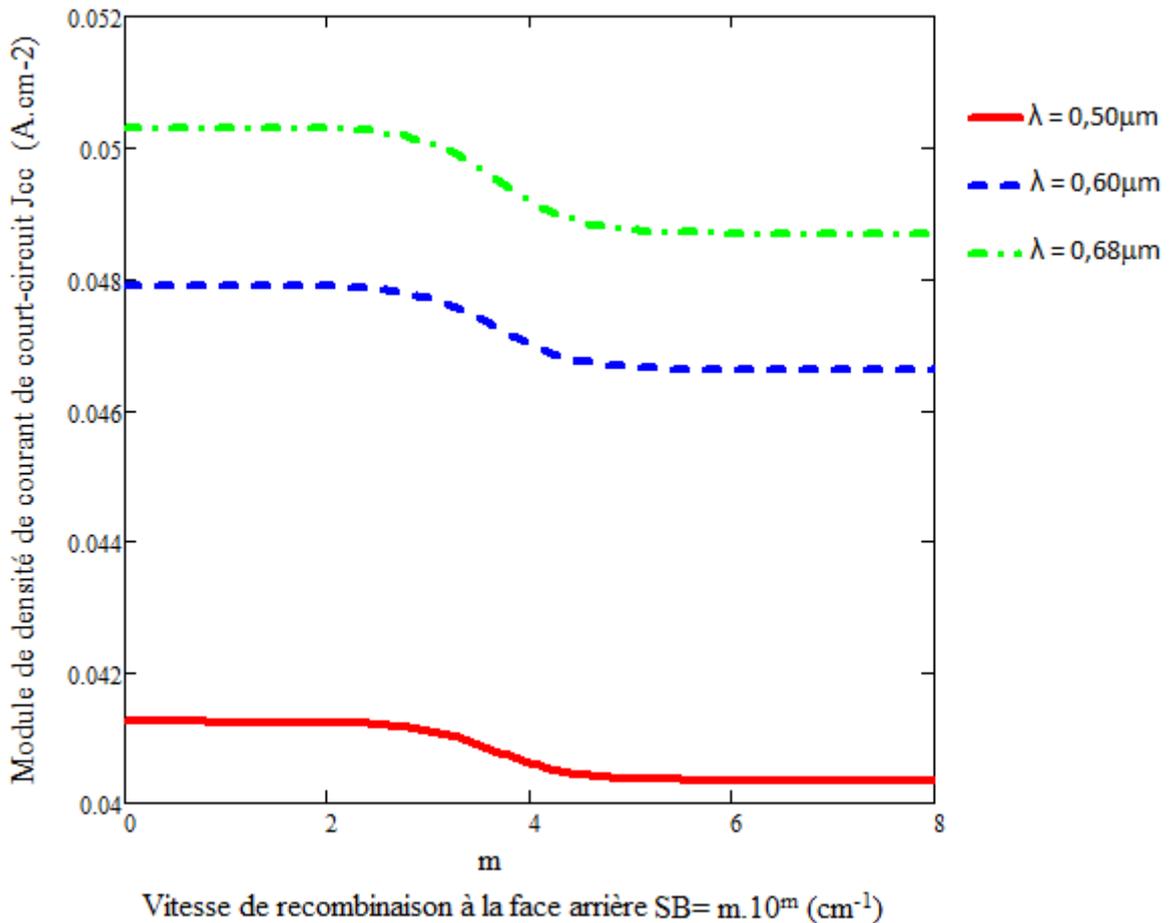


Figure II. 10 : module de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de la longueur d'onde

$$SF = 6.10^6 \text{ cm/s}; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1}; \theta = 0^\circ; X = 0,3$$

Cette figure II-10 montre que pour des valeurs faibles des vitesses de recombinaisons de la face arrière ($SB < 10^2 \text{ cm/s}$), le module de la densité de photocourant reste élevé et constante. Au-delà de cette valeur ce module chute brusquement pour atteindre une valeur limite inférieure vers $SB = 10^5 \text{ cm/s}$; et pour des valeurs de SB supérieur à 10^5 cm/s le module reste une constante. La figureII-10 montre aussi que plus qu'on tend vers des valeurs élevées des longueurs d'ondes plus le maximum du module du photocourant diminue.

Nous pouvons par ailleurs noter que la vitesse de recombinaison à la face arrière pour les cellules solaires en couches minces à base de CIGS reste influencée par la formation du MoSe_2 . Cependant avec un gap de MoSe_2 d'environ (1,41eV) aussi large que celui du CIGS, l'existence d'un tel champ de surface arrière nous permet de comprendre que la couche de MoSe_2 peut influencer les recombinaisons des électrons et des trous [14-15]; donc affecter la vitesse de recombinaison de la face arrière.

II.5. Profil de la densité de photocourant de court-circuit

La densité de photocourant de court-circuit est obtenue à partir de l'expression de la densité de photocourant (II-13) en faisant tendre la vitesse de recombinaison à la jonction SF vers une limite très grande.

$$J(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)|_{SF \rightarrow 5.10^5} \rightarrow J_{cc}(\lambda, \omega, SB, \theta, X) \quad (\text{II-14})$$

II.5.1 Effet de l'angle d'incidence

A la figure II-11, le profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière, pour différents angles d'incidence est représenté :

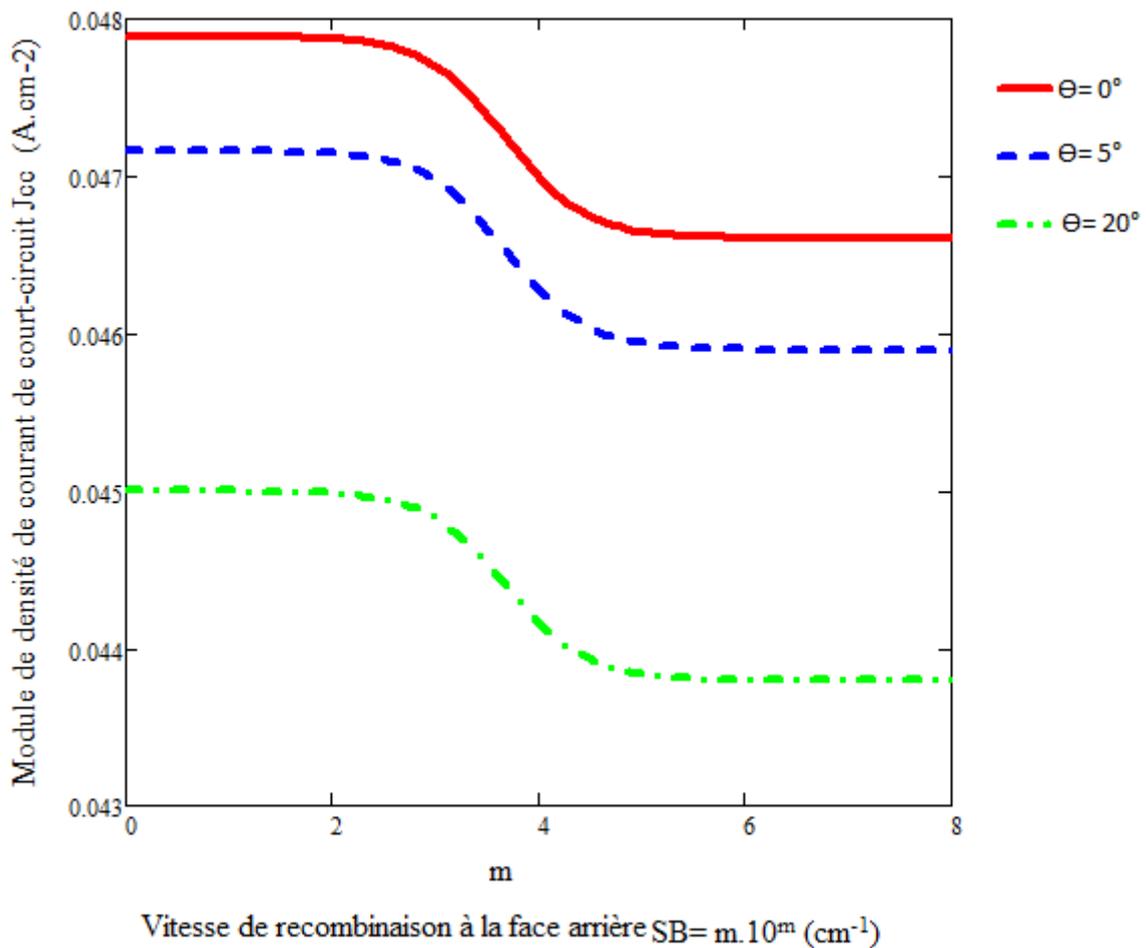


Figure II. 11 : module de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de l'angle d'incidence

$$\omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; X = 0,3$$

Pour des valeurs faibles de SB la densité de photocourant de court-circuit reste élevée et constante ; elle diminue pour les grandes valeurs de SB. Lorsqu'on augmente l'angle d'incidence, on observe une diminution de la densité de photocourant de court-circuit.

II.5.2 Effet du dopage au gallium

La figure II-12 présente le profil du module de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différents taux de dopage au gallium.

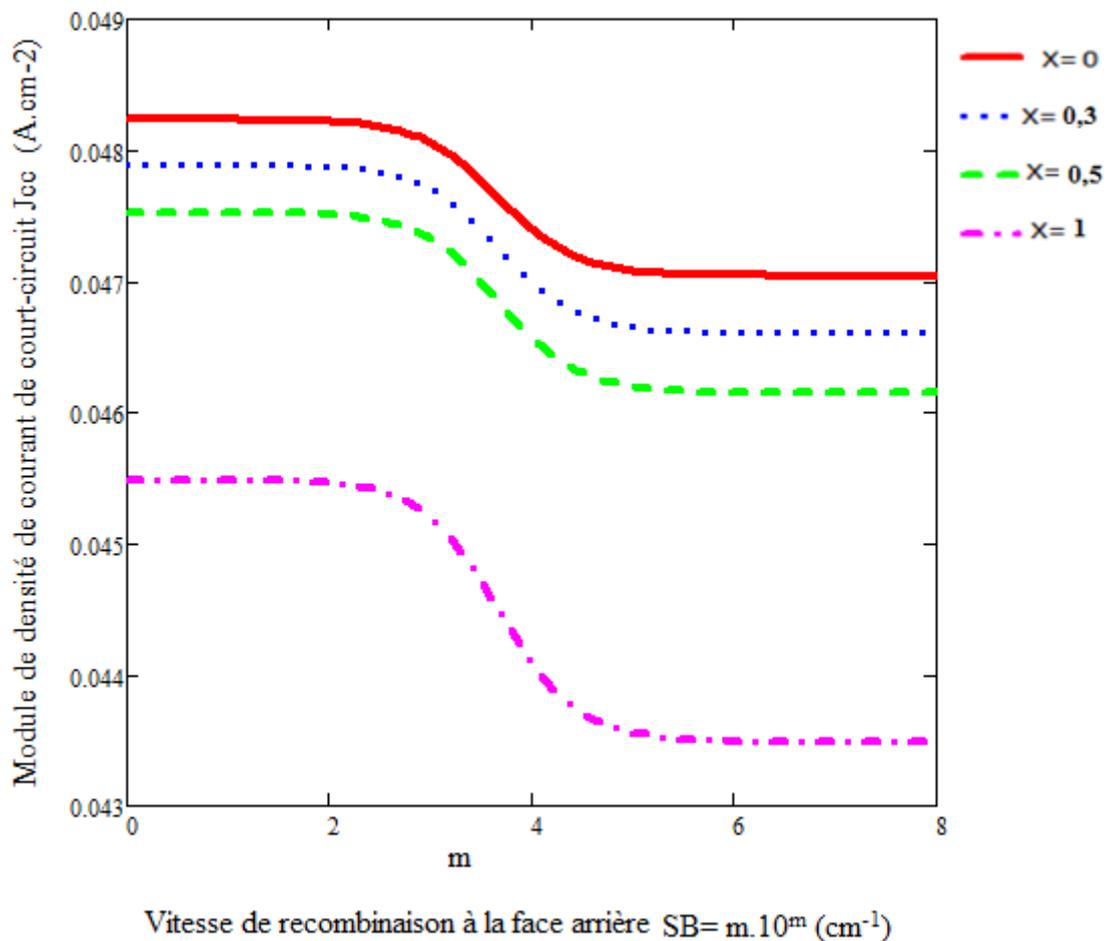


Figure II. 12 : module de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de dopage X

$$\omega = 10^6 \text{rad.s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; \theta = 0^\circ$$

Cette figure II-12 montre que la densité de photocourant de court-circuit est élevée et constante pour des valeurs faibles de SB; celle-ci diminue pour les grandes valeurs de SB. On constate que l'augmentation du taux de dopage du gallium diminue la densité de photocourant de court-circuit.

II.6 Profil de la phototension

La phototension est déduite de la densité de porteurs minoritaires en utilisant la relation de BOLTZMANN :

$$V(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) = V_T \ln \left[\frac{Nb}{n_0^2} \delta(0, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) + 1 \right] \quad (\text{II-15})$$

Avec $V_T = \frac{k.T}{q}$; V_T est la tension thermique, T est la température absolue à l'équilibre thermique ; k est la constante de Boltzmann ; n_0 est la densité des porteurs intrinsèques dans la base et Nb le taux de dopage des impuretés d'atomes accepteurs dans la base.

II.6.1 Effet de la longueur d'onde

Nous représentons à la figure II-13 le profil du module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (SF) des porteurs minoritaires de charge pour différentes valeurs de la longueur d'onde :

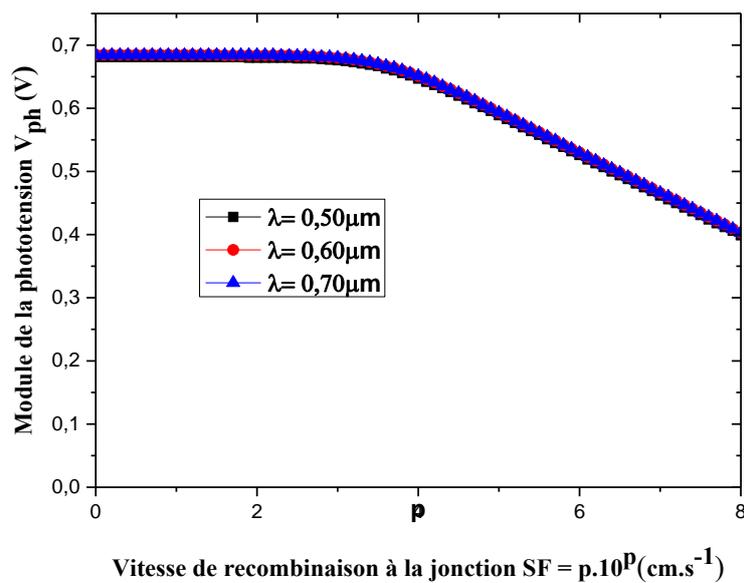


Figure II. 13 : module de la phototension en fonction de la vitesse (SF) de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \quad \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \quad \theta = 0^\circ ; \quad X = 0,3$$

Cette figure II-13 montre que pour des grandes valeurs de la vitesse de recombinaison ($SF > 3.10^3 \text{ cm/s}$) à la jonction, la phototension tend vers des valeurs très faibles et pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison ($SF < 3.10^3 \text{ cm/s}$), elle reste élevée et constante. Cette valeur correspond à la phototension de circuit-ouvert V_{co} . La phototension varie légèrement avec les longueurs d'ondes dans le visible.

II.6.2 Effet de l'angle d'incidence

A la figure II-14 est représenté le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

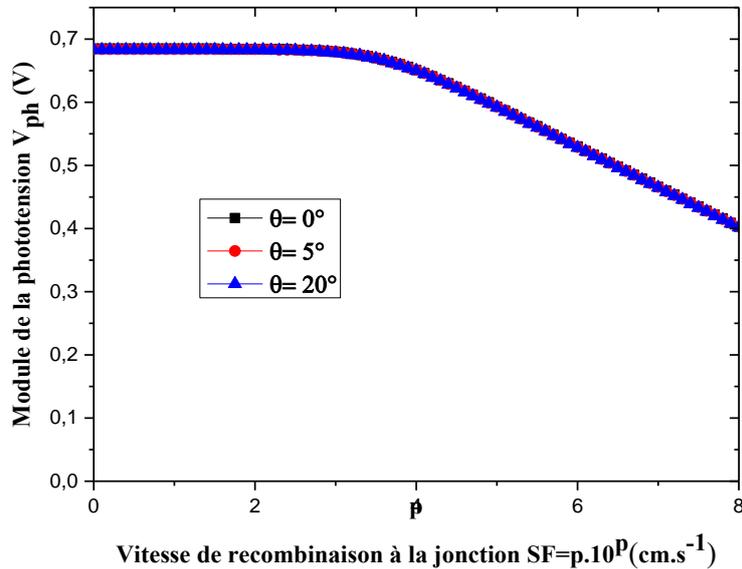


Figure II. 14 : module de la phototension en fonction de la vitesse (SF) de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence [12]

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad.s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; X = 0,3$$

Dans cette figure II-14 on observe l'existence de deux domaines. Un premier domaine correspondant aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction ($SF < 3.10^3 \text{ cm/s}$), où la phototension reste élevée et constante. Un deuxième domaine des grandes valeurs de SF ($SF > 3.10^3 \text{ cm/s}$) où la phototension diminue progressivement. Une observation plus proche de cette figure II-14 montre une légère décroissance de la phototension avec l'augmentation de l'angle d'incidence.

Ces figures II-13 et II-14 montrent que les effets de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium restent faibles sur la phototension.

II.6.3 Effet du dopage au Gallium

A la figure II-15 le profil du module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage au gallium est représenté :

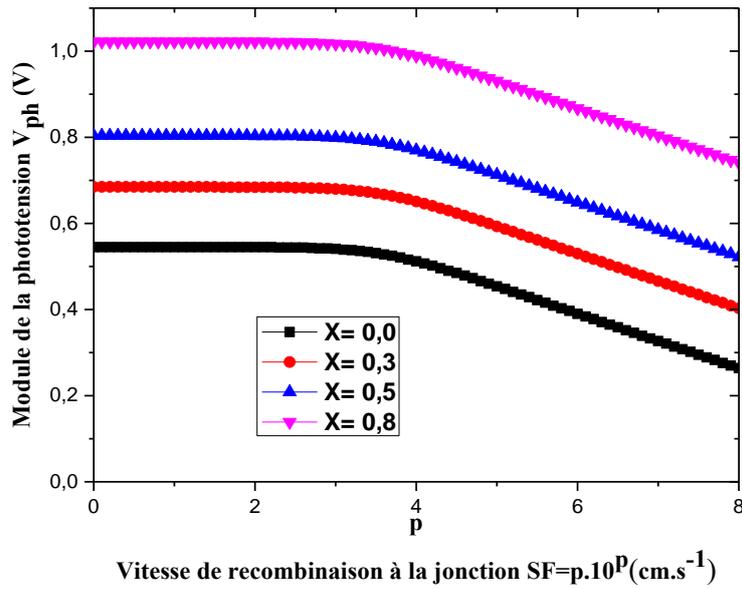


Figure II. 15 : module de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage X [12]

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s}; \quad \omega = 10^3 \text{ rad. s}^{-1}; \quad \lambda = 0,60 \mu\text{m}; \quad \theta = 0^\circ$$

Dans cette figure II-15, on observe que la phototension est maximale pour les faibles vitesses de recombinaisons à la jonction ($SF < 3.10^3 \text{ cm/s}$) puis décroît pour les grandes vitesses de SF ($SF > 3.10^3 \text{ cm/s}$). On constate que la phototension diminue lorsqu'on augmente le taux de dopage au gallium. Nous constatons aussi que les effets du dopage au gallium sur la phototension sont plus importants que ceux observés par l'angle d'incidence.

Par ailleurs il faut noter que pour des faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, nous sommes au fonctionnement de circuit ouvert de la photopile.

Ainsi, la phototension de circuit ouvert qui ne fait pas l'objet d'étude dans ce travail est obtenue à partir de l'expression (15) de la phototension en faisant tendre la vitesse de recombinaison à la jonction SF vers zéro.

$$V(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)|_{SF \rightarrow 0} \rightarrow V_{co}(\lambda, \omega, SB, \theta, X) \quad (16)$$

II-7 Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

II-7.1 expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

Sfo

La vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction caractérise les pertes de porteurs de charges à la jonction dues aux imperfections du matériau constituant la photopile lors de sa

fabrication. La vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction peut être obtenue par la dérivée de la densité du photocourant (J_{ph}) par rapport à la vitesse de recombinaison à la face arrière de la base SB , pour une valeur de SB tendant vers l'infini ($SB > 5.10^5$).

$$\left. \frac{\partial j(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{\partial SB} \right|_{SB > 5.10^5} = 0 \quad (II-17)$$

La résolution de l'équation (II-17) nous permet d'obtenir l'expression de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction pour un éclaircissement à la face avant de la photopile :

$$Sf_0(\lambda, \omega, X) = \frac{D(\omega) \left[e^{-\alpha(X, \lambda)H} \left(\sinh \frac{H}{L(\omega)} + L(\omega) \alpha(X, \lambda) \cosh \frac{H}{L(\omega)} \right) - L(\omega) \alpha(X, \lambda) \right]}{L(\omega) \left[e^{-\alpha(X, \lambda)H} \left(-\cosh \frac{H}{L(\omega)} - L(\omega) \alpha(X, \lambda) \sinh \frac{H}{L(\omega)} \right) + 1 \right]} \quad (II-18)$$

II-7-2 Profil de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction

La vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction est étudiée en fonction de la longueur d'onde, du taux de dopage au gallium puis de la pulsation respectivement.

II-7-2-1 effet de la longueur d'onde

A la figure II-16 le profil du module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de la longueur d'onde est représenté :

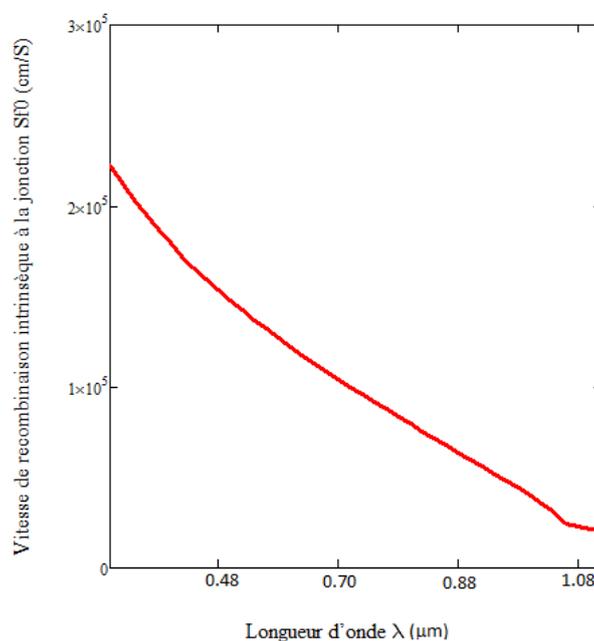


Figure II. 16 : module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction de la longueur d'onde.

$$\omega = 10^6 \text{ rad/s} ; X = 0.3$$

La figure II-16 ainsi représenté montre une diminution de la vitesse de recombinaison à la jonction avec l'augmentation de la longueur d'onde. En rappelant que la vitesse de recombinaison à la jonction est liée à l'existence de différents niveaux d'énergies présents dans le CIGS, correspondant aux principaux défauts cristallins ; la courbe montre bien que l'augmentation de la longueur d'onde (diminution de l'énergie) stimule de moins en moins les niveaux d'énergies présents dans la zone de charge d'espace d'où une diminution de la vitesse de recombinaison à la jonction.

II-7-2-2 effet du dopage au gallium

La figure II-17 présente le profil du module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du taux de dopage au gallium :

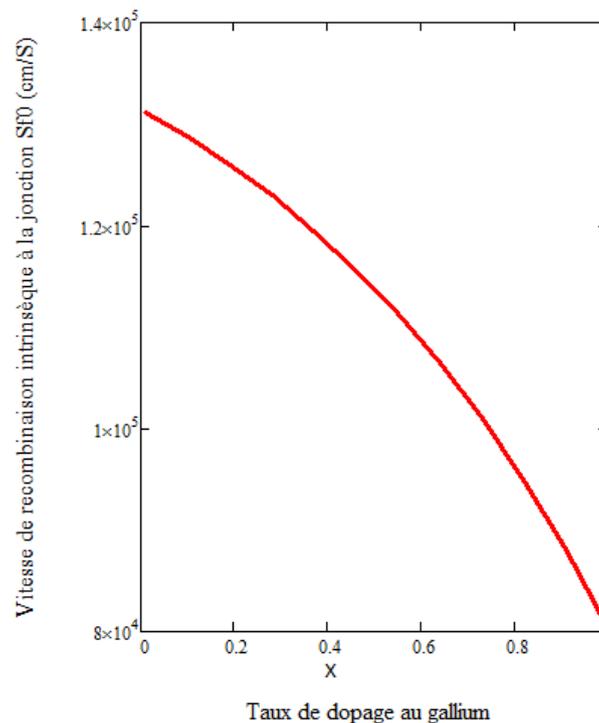


Figure II. 17 : module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du taux de dopage au gallium

$$\omega = 10^6 \text{ rad/s} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m}$$

Dans cette figure II-17 on observe une diminution de la vitesse de recombinaison intrinsèque en fonction du taux de dopage au gallium. En effet la couche absorbante CIGS présente des défauts cristallins générant des états accepteurs. Les niveaux d'énergies théoriques correspondants aux principaux défauts cristallins présents dans le CIGS varient en fonction du taux de Ga.

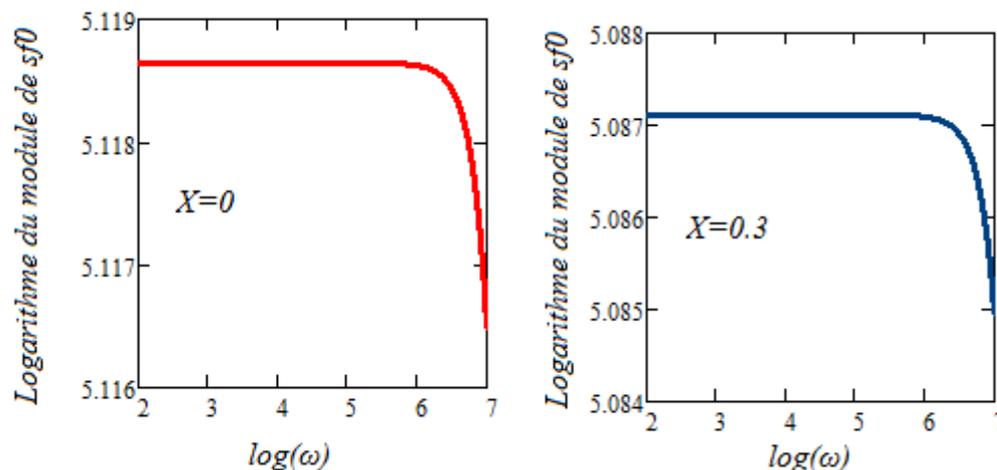
II-7-3 Etude de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la face avant par les diagrammes de Bode et de Nyquist

La vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, pour un éclairage de la face avant, est complexe et peut être écrite sous la forme $(a+ib)$ où a est la partie réelle et b la partie imaginaire. Cette vitesse de recombinaison intrinsèque sera étudiée au moyen des diagrammes de Bode et de Nyquist.

Le digramme de Bode consiste en la représentation du logarithme du module d'une grandeur physique d'une part et de sa phase d'autre part en fonction du logarithme de la pulsation. Quant au diagramme de Nyquist, il s'agit d'une représentation de la partie imaginaire d'une grandeur physique en fonction de sa partie réelle [16]

II-7-3-1) Diagramme de Bode de la vitesse de recombinaison intrinsèque à jonction

Le logarithme du module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sf_0 , est représenté en fonction du logarithme de la pulsation à la figure II-18 :



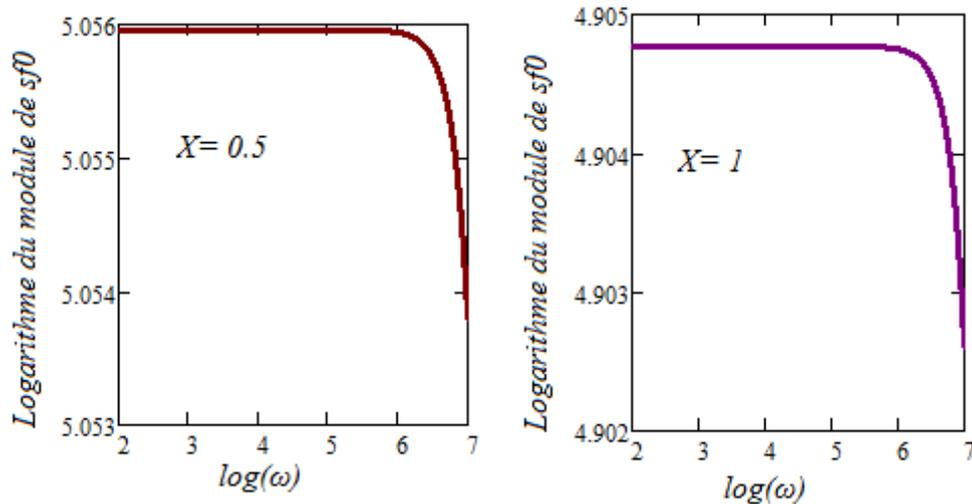


Figure II. 18 : logarithme du module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction en fonction du logarithme de la pulsation pour un éclairement par la face avant pour différents taux de dopage au gallium.

$$\lambda = 0,60\mu\text{m}$$

Cette figure II.18 présente deux domaines. Un domaine de pulsation $[0\text{rad/s} ; 10^6 \text{ rad/s}]$ où le logarithme du module de la vitesse de recombinaison reste constant et un domaine d'intervalle $]10^6 \text{ rad/s} ; 10^7 \text{ rad/s}]$ où le logarithme du module de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction diminue rapidement. En effet le domaine $[0\text{rad/s} ; 10^6 \text{ rad/s}]$ correspondant au régime quasi-statique et celui $]10^6 \text{ rad/s} ; 10^7 \text{ rad/s}]$ au régime dynamique fréquentiel. Par ailleurs le dopage au gallium diminue légèrement le module de la vitesse de recombinaison intrinsèque mais n'affecte pas la fréquence limitant le régime statique du régime dynamique.

III-7-3-2 Profile de la phase de Sf_0 en fonction du logarithme de la pulsation

La phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque en fonction du logarithme de la pulsation est représentée à la figure II.19.

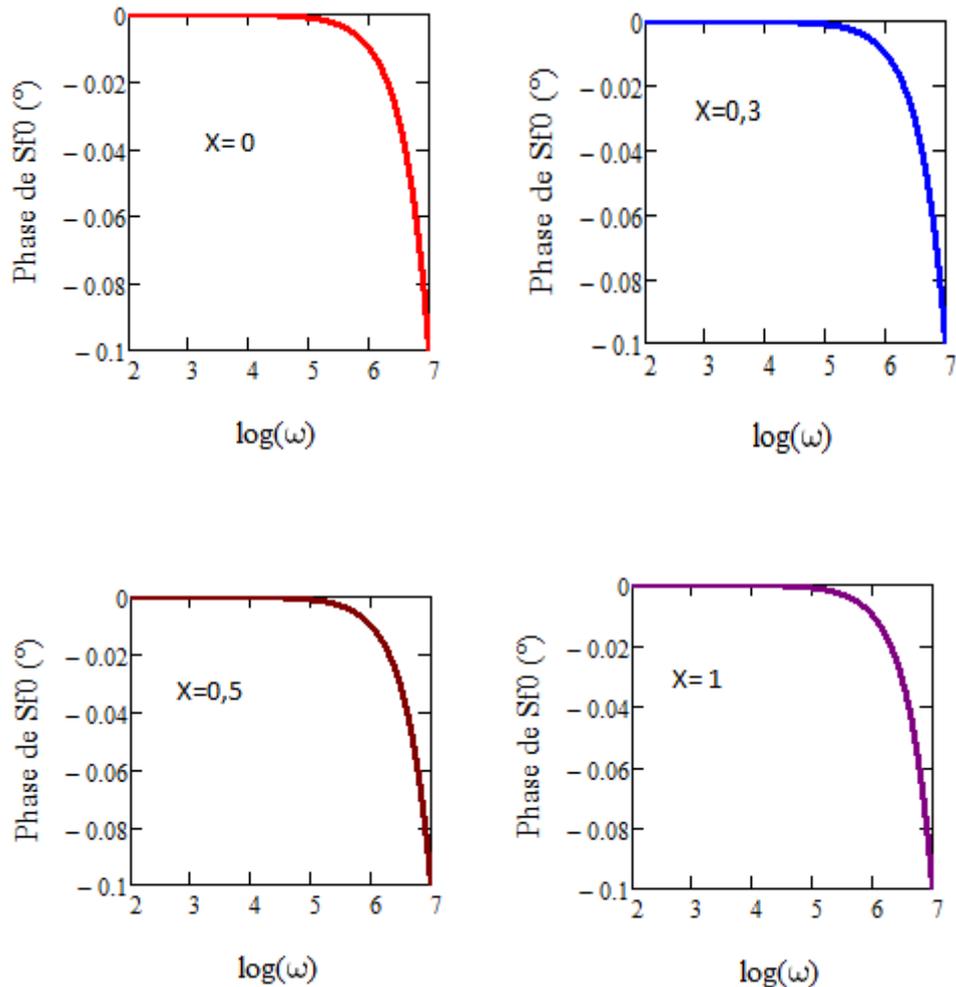


Figure II. 19 : phase de la vitesse se recombinaison à la jonction Sf0 en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium

$$\lambda = 0,60\mu\text{m}$$

Dans cette figure II.19 on peut observer deux intervalles de pulsations. Un intervalle de $[0 \text{ rad/s} ; 10^6 \text{ rad/s}]$ où la phase de la vitesse de recombinaison intrinsèque reste nulle et un autre intervalle $]10^6 \text{ rad/s} ; 10^7 \text{ rad/s}]$ où la phase chute tout en restant négative avec l'augmentation de la pulsation. En effet dans l'intervalle $[0 \text{ rad/s} ; 10^6 \text{ rad/s}]$, il n'y a pas de déphasage entre l'excitation optique et les recombinaisons des porteurs minoritaires à la jonction.

Dans l'intervalle de pulsation $]10^6 \text{ rad/s} ; 10^7 \text{ rad/s}]$ la phase diminue tout en restant négative : nous sommes en présence de phénomènes inductifs.

Pailleurs on observe une légère augmentation de la phase avec le taux de dopage au gallium. Pour illustrer cette augmentation nous avons tracé à la figure II.20 le profil de la phase de sf0 en fonction du taux de dopage.

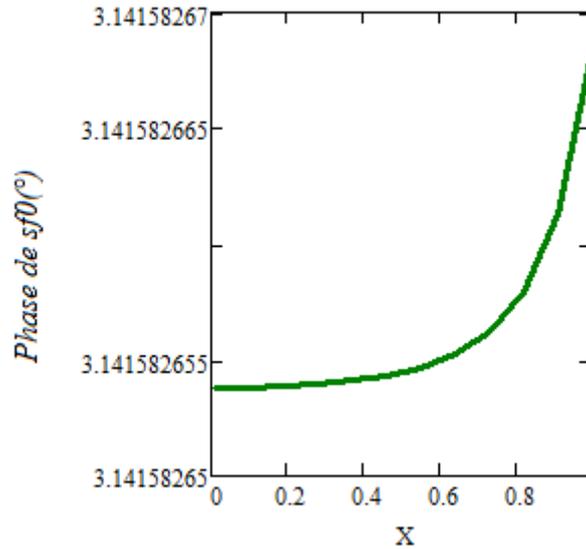


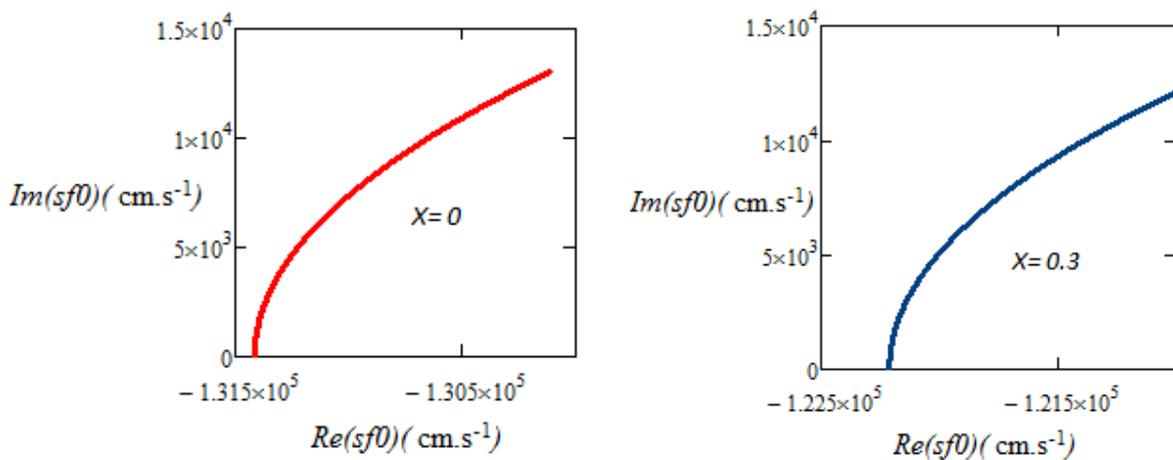
Figure II. 20 : phase de la vitesse se recombinaison intrinsèque à la jonction $Sf0$ en fonction du taux de dopage au gallium

$$\omega = 10^3 \text{ rad/s} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m}$$

Cette figure II.20 montre que la phase augmente avec le taux de dopage au gallium. Par ailleurs nous constatons que la variation est très faible. Cette faible variation montre le caractère intrinsèque (dopage intrinsèque) de la couche absorbante CIGS

II-7-3-3) Diagramme de Niquist de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la face avant

A la figure II.21, nous donnons le profil de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction :



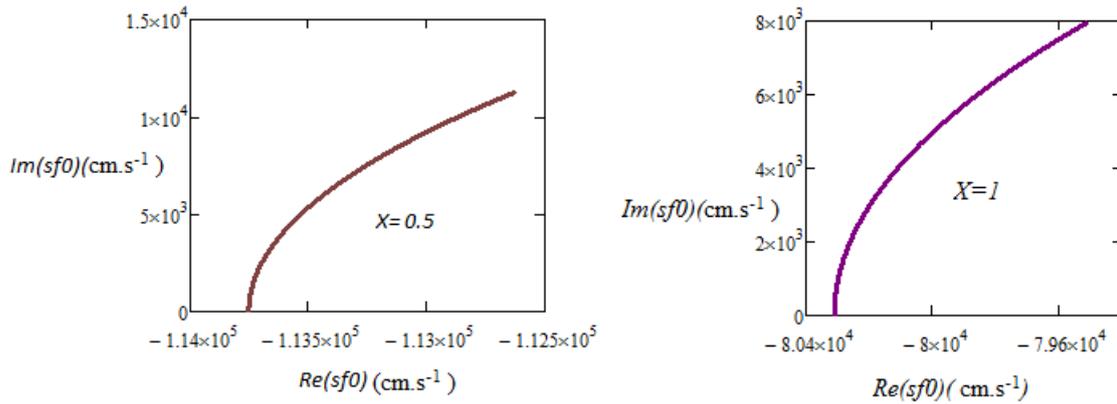


Figure II. 21 : partie imaginaire en fonction de la partie réelle de la vitesse de recombinaison intrinsèque $Sf0$ pour un éclairage par la face avant

$$\lambda = 0,60\mu m$$

Cette figure II.21 présente la partie imaginaire de la vitesse de recombinaison intrinsèque $Sf0$ en fonction de sa partie réelle. Nous observons une augmentation de la partie imaginaire avec la partie réelle. Ainsi la partie imaginaire de la vitesse de recombinaison est égale à zéro lorsque la pulsation tend vers zéro et maximale quand la pulsation tend vers l'infini. Cette évolution met en évidence les phénomènes inductifs de notre système. Par ailleurs nous constatons que la partie imaginaire diminue, la partie réelle augmente tout en restant négative sous l'effet du taux de dopage au gallium.

Conclusion

L'étude de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile pour un éclairage, monochromatique en modulation de fréquence, par la face avant, a permis de déterminer quelques paramètres électriques tels que : la densité de photocourant, la phototension. A partir de ces paramètres électriques, nous avons pu déterminer les vitesses de recombinaisons à la jonction et à la face arrière. Ainsi les effets de la longueur d'onde de l'angle d'incidence et du dopage au gallium ont été mis en évidence.

Références

- [1] N. Honma et C. Munakata, « Sample thickness dependence of minority carrier lifetimes measured using an ac photovoltaic methode » ,Japan. J.Appl. Phys. 26,2033-6, 1987
- [2] A. Dieng, I. Zerbo, M. Wade, A. S. Maiga et G. Sisoko, « Three - dimensional study of a polycrystalline silicon solar cell : the influence of the applied magnetic field on the elctrical parameters », Semicond. Sci. Technol. 26, pp, 5023-5032 (9pp),2011
- [3] J. Dugas, « *3D modelling of a reverse cell made with improved multicrystalline silicon wafers* » . Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 32. Issue 1, (January 1994).
Pages71-88
- [4] T. Flohr et R. Helbig, « *Determination of minority-carrier lifetime and surface recombination velocity by Optical-Beam-Iduced-Current measurements at different light wavelengths* » J. Appl. Phys. Vol. 66(7), (1989) pp 3060-3065.
- [5] Sissoko, G., Museruka, C., Corr ea, A., Gaye, I. and Ndiaye, A.L. (1996) Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. *World Renewable Energy Congress*, Part III, 1487-1490.
- [6] G kan,  ., Thiam, N., Ndiaye, M., Diao, A., Mbow, B. and Sissoko, G. (2014) Influence of Illumination Wavelength on the Electrical Parameters of a Vertical Junction Silicon Solar Cell in Frequency Modulation. *IPASJ International Journal of Electrical Engineering (IJEE)*, 2, 23-28.
- [7]. Morales-Acevedo « Effective absorption coefficient for graded band-gap semiconductors and the expected photocurrent density in solar cells » *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (2009) 41– 44
- [8] P. D. Paulson, R. W. Birkmire, and W. N. Shafarman. “Optical characterization of Cu(In,Ga)Se₂ alloy thin films b spectroscopic ellipsometry”. *Journal of Applied Physics*, 94(2), (2003) 879.
- [9] G. Hanna, A. Jasenek, U. Rau, and H.W. Schock, « Influence of the Ga-content on the bulk defect densities ofCu(In,Ga).Se₂ » *Thin Solid Films*, 387, 71-73 (2001)
- [10] Nima Khoshsirata, Nurul Amziah Md Yunusa*, Mohd Nizar Hamidona, Suhaidi Shafiea, Nowshad Aminb « Analysis of absorber layer properties effect on CIGS solar cell performance using SCAPS » *Optik* 126 (2015) 681–686
- [11] U. Rau and H.W. Schock. « Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells-recent achievements, current understanding, and future challenges ». *Applied Physics A : Materials Science & Processing*, 69(2) :131–147, August 1999.

- [12] Gerome SAMBOU*, Alain Kassine EHEMBA, Mouhamadou Mamour SOCE, Amadou DIAO, Moustapha DIENG « Frequency Modulation Study of a Monofacial Solar Cells Based on Copper Indium and Gallium Diselenide (CIGS) under Monochromatic Illumination: Influence of Incidence Angle and Gallium Doping » *American Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 6, No. 1, 7-11
- [13] Sunghun Jung, SeJin Ahn, Jae Ho Yun, Jihye Gwak, Donghwan Kim, Kyunghoon Yoon a,* « Effects of Ga contents on properties of CIGS thin films and solar cells fabricated by co-evaporation technique » *Current Applied Physics* 10 (2010) 990–996.
- [14] N. Kohara, S. Nishiwaki, Y. Hashimoto, T. Negami, T. Wada, “Electrical properties of the Cu(In,Ga)Se₂/MoSe₂/Mo structure”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 67 (2001) 209.
- [15] T. Wada, N. Kohara, S. Nishiwaki, T. Negami,” Characterization of the Mo/Cu(In,Ga)Se₂ interface in CIGS solar cells”, *Thin Solid Films* 387 (2003) 118
- [16] Lathi, Bhagwandas Pannalal: SIGNALS, SYSTEMS AND CONTROLS

CHAPITRE III. Détermination des paramètres électriques d'une cellule solaire à base de CIGS

Introduction

Dans ce chapitre sera étudié les différents paramètres électriques d'une cellule solaire à base de CIGS. La détermination des paramètres d'une cellule solaire nous permette d'avoir des appréciations sur ses performances.

Ainsi, la caractéristique photocourant-phototension, en régime dynamique fréquentiel, est étudiée et des paramètres électriques comme la résistance série, la résistance shunt sont déduits au moyen des modèles électriques [1]. Par la suite, une étude de la capacité sera faite puis celle de la résistance dynamique au moyen des diagrammes de Nyquist et de Bode enfin celles de la puissance, du facteur de forme et du rendement de la cellule. Il faut noter que les effets de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur tous ces paramètres de la cellule seront aussi étudiés.

III.1- la caractéristique photocourant -phototension (J-V)

La caractéristique photocourant-phototension d'une cellule est la courbe qui traduit l'évolution de la densité de photocourant qui traverse la cellule en fonction de la phototension à ses bornes. L'exploitation de cette caractéristique J-V [2] permet de comprendre non seulement le fonctionnement de la cellule, mais aussi d'apprécier les performances des paramètres comme la résistance série et la résistance shunt.

La figure III.1 illustre le profil d'une caractéristique J-V. Elle est tracée en reliant le photocourant à la phototension de la photopile pour chaque point de fonctionnement caractérisé par la vitesse de recombinaison à la jonction SFP.

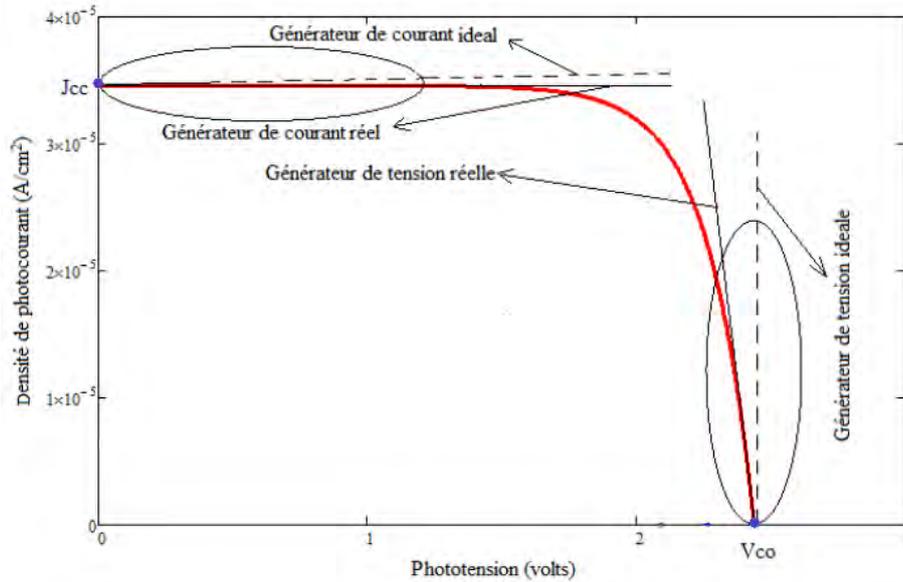


Figure III. 1 : caractéristique photocourant-phototension d'une cellule solaire

Cette figure III.1 montre la variation du photocourant en fonction de la phototension dans laquelle peut être définie deux grandeurs physiques.

- la phototension à vide (circuit ouvert) : V_{phco} . Cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée.
- le photocourant de court-circuit : J_{phcc} . Cette valeur représenterait le courant généré par la cellule éclairée.

III.2- Effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur la caractéristique J-V

III.2- 1 Effet de l'angle d'incidence sur la caractéristique J-V

La figure III.2 présente la caractéristique J-V pour différentes valeurs de l'angle d'incidence :

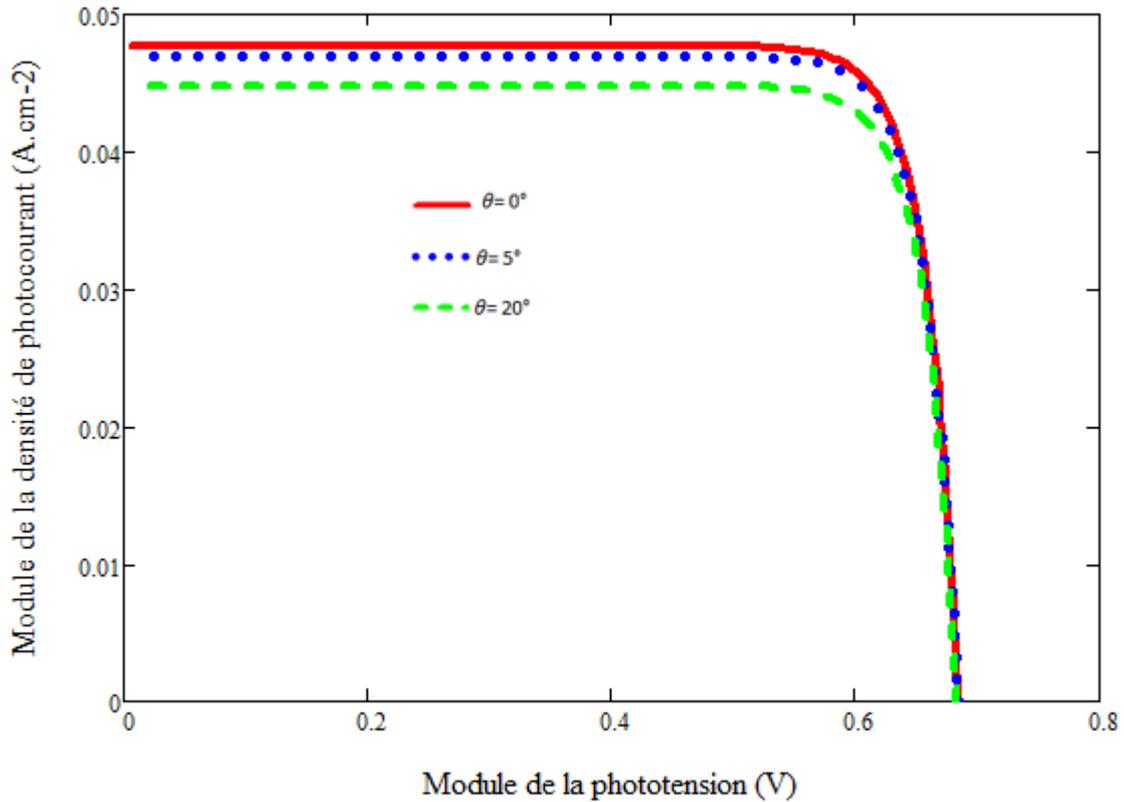


Figure III. 2 : caractéristique photocourant-phototension pour différentes valeurs de l'angle d'incidence

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s}; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1}; \lambda = 0,60\mu\text{m}; X = 0,3$$

A la figure III.2 on distingue deux parties principales. Une première où la densité du photocourant est constante : cette partie correspond au fonctionnement de la photopile en situation de court-circuit Une deuxième partie où le photocourant diminue de sa valeur de court-circuit à des valeurs très faibles correspondants au fonctionnement de la photopile en situation de circuit ouvert.

On observe une diminution du photocourant de court-circuit avec l'augmentation de l'angle d'incidence. Au même moment le point de fonctionnement en situation de circuit ouvert n'est pas aussi affecté. Ainsi l'angle d'incidence aura pour effet de changer le point de fonctionnement de la photopile en court-circuit.

III.2- 2 effet du taux de dopage au gallium sur la caractéristique J-V

A la figure III.3: les effets du taux de dopage au Gallium sont mis en exergue sur la caractéristique J-V.

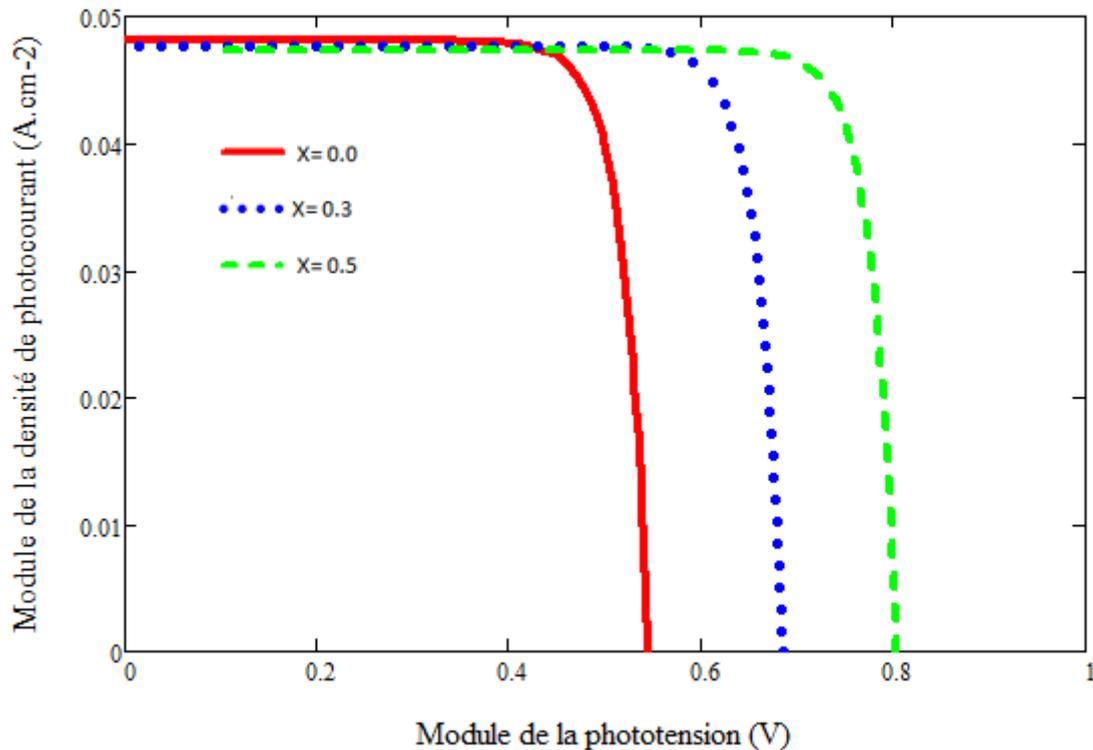


Figure III. 3 : caractéristique photocourant-phototension pour différents taux de dopage de gallium.

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; \theta = 0,0^\circ$$

Les courbes de la figure III.3 présentent les mêmes allures. Nous y observons les deux situations de fonctionnement de la photopile : fonctionnement en court-circuit mais aussi celui en circuit ouvert. On observe une influence du taux de dopage au gallium sur la caractéristique J-V. car la phototension de circuit-ouvert augmente avec le taux de dopage au Gallium. Contrairement aux effets de l'angle d'incidence, le taux de dopage au gallium affecte principal le point de fonctionnement en circuit-ouvert.

Les caractéristiques photocourant-phototension de la cellule solaire étudiée montrent que celle-ci fonctionne en générateur de courant quand elle est éclairée. Cependant, pour une cellule solaire idéale, le courant débité est constant, quelle que soit la tension à ses bornes. En pratique, les photopiles que nous utilisons, ne sont pas idéales, car il existe un courant de fuite qui entraîne une légère diminution du photocourant débité lorsque la phototension varie. Ce qui présage la présence d'une résistance interne liée à la photopile qu'on appelle résistance de fuite (ou résistance shunt). Un raisonnement analogue sur la phototension montre l'existence d'une résistance série liée à la résistivité de la photopile.

Dans la suite de notre étude, nous étudierons l'influence de l'angle d'incidence puis du taux de dopage au gallium sur les résistances série et shunt que nous déterminerons.

III-3-détermination des résistances série et shunt

III-3-1 Etude de la résistance série

Les caractéristiques densité de photocourant-phototension présentent des paliers presque verticaux (figure III.2 ou figure III.3) où la phototension varie faiblement avec le photocourant. Cette situation de fonctionnement de la photopile correspond à une source de tension qui est égale à la phototension de circuit ouvert.

Par ailleurs, la présence des pertes dans la photopile présage l'existence d'une résistance série R_s . Cette dernière présente dans le circuit équivalent est montée en série avec la source de tension. Il faut noter que cette résistance représente l'ensemble de la résistivité du matériau et des contacts métal-grilles. Dans les cellules solaires à base de CIGS, les variations de la résistance série sont généralement attribuées à la formation de la couche MoSe_2 formée à l'interface Mo/CIGS pendant le processus de dépôt de la couche CIGS [3]

A la **figure III-4** un circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en situation de circuit ouvert est représenté [4] :

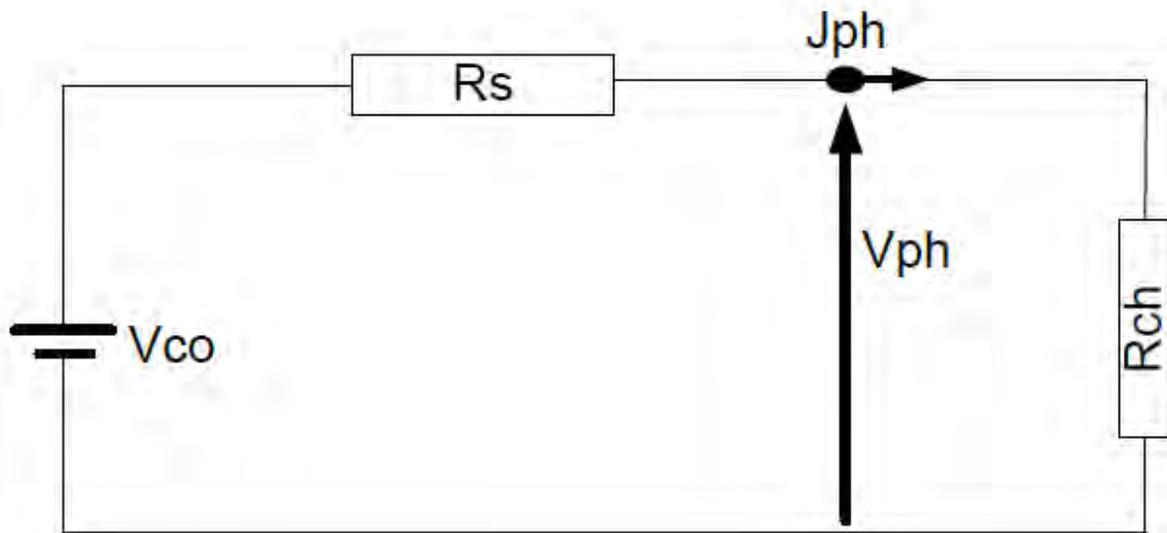


Figure III. 4 : Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en circuit ouvert

V_{co} : 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 :

$$V_{ph}(SF) = V_{CO} - R_S \cdot J_{ph}(SF)$$

III-1

De cette équation III-1, on obtient :

$$R_S = \frac{V_{CO} - V_{ph}(SF)}{J_{ph}(SF)} \quad \text{III-2}$$

$$V \rightarrow V_{CO}$$

$$SF \rightarrow 0$$

III.3.1.1 Effet de l'angle d'incidence sur la résistance Série

La figure III.5 montre la variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence :

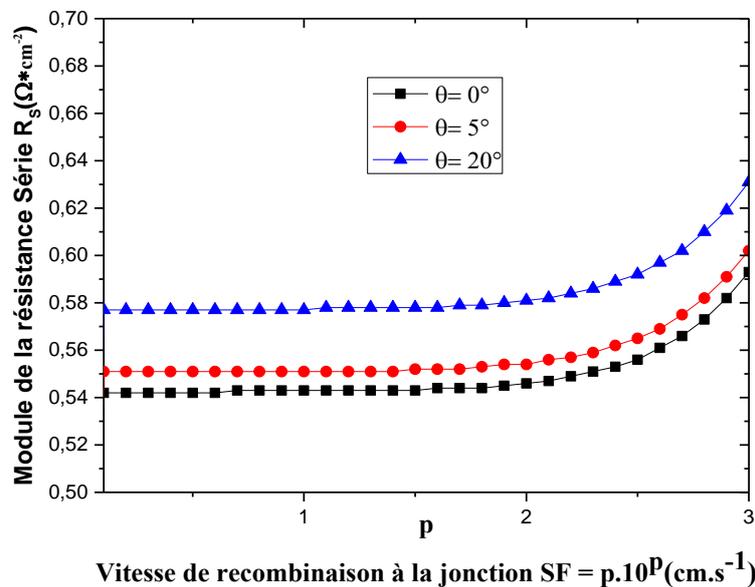


Figure III. 5 : module de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad.s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; X = 0,3$$

On observe une augmentation de la résistance Série avec la vitesse de recombinaison à la jonction. En effet l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction en circuit ouvert augment l'accumulation de charges en générant V_{CO} . Cela entraînant ainsi une augmentation des recombinaisons en volume et en surface, donc une augmentation de la résistance Série.

Nous remarquons que le module de la résistance Série augmente avec l'augmentation de l'angle d'incidence. En effet même si l'augmentation de l'angle d'incidence est accompagnée

à une faible production de porteurs de charges leur accumulation en circuit ouvert favorise les pertes à l'interface, donc une augmentation du module de la résistance série.

III.3.1.2 Effet du dopage au gallium sur la résistance Série

A la figure III-6 nous présentons le profil du module de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage au gallium.

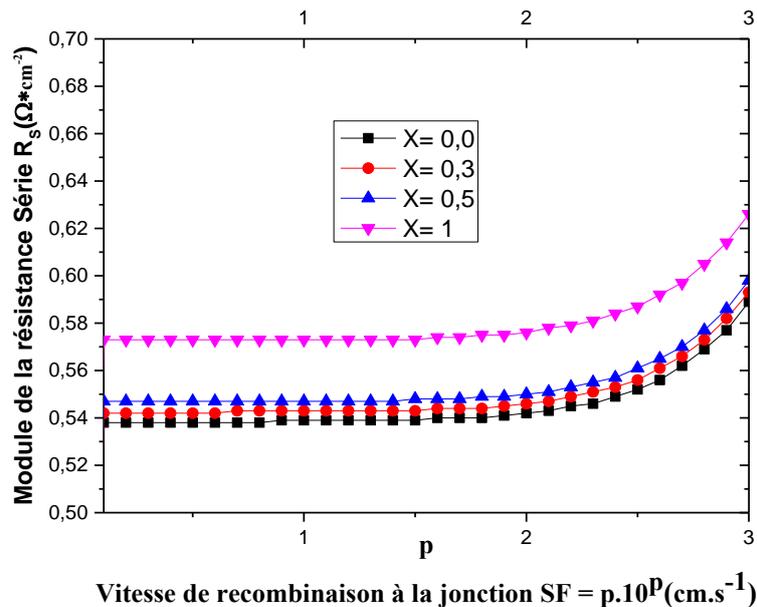


Figure III. 6 : module de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage au gallium

$$SB = 3 \cdot 10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; \theta = 0,0^\circ$$

La figure III.6 montre le même profil de courbes que la figure III.5. Nous observons une augmentation de la résistance série avec l'augmentation du taux de dopage au gallium. Cette augmentation provient essentiellement des effets du taux de dopage au gallium sur l'interface CdS/CIGS. Par ailleurs une augmentation préférentielle de la concentration du gallium à proximité du contact arrière Mo peut bien diminuer la résistance série. [5]

III-3-2 Etude de la résistance shunt

La caractéristique J-V présente une partie horizontale qui correspond à une zone de photocourant court-circuit où le photocourant est indépendant de la phototension. Cette partie peut être représentée par un générateur de courant qui débite une intensité électrique constante

quel que soit la valeur de la phototension. Par ailleurs, on note l'existence d'un courant de fuite. Ces effets sont représentés par une charge interne à la photopile appelée résistance de fuite ou résistance shunt.

A la figure III-7 nous représentons un circuit électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne en situation de court-circuit [6].

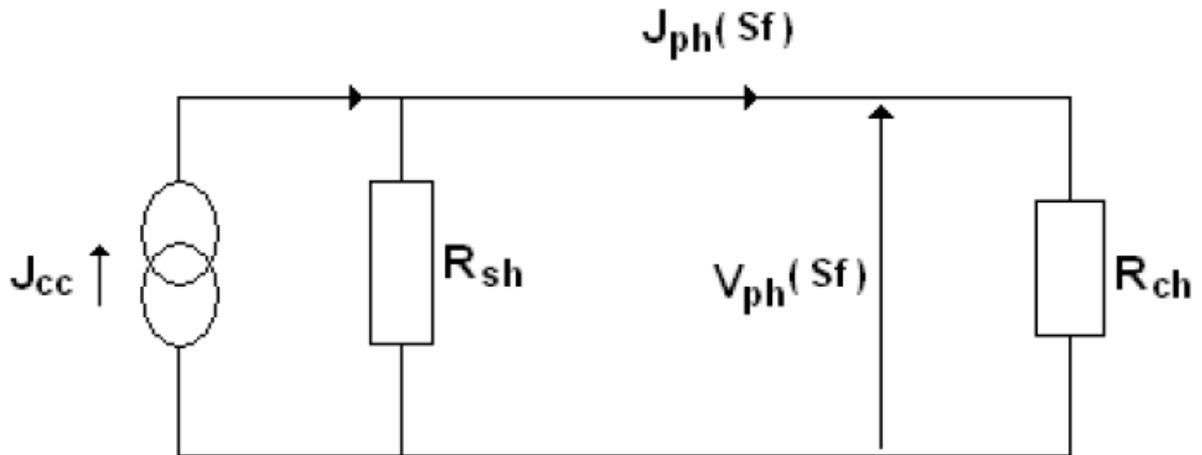


Figure III. 7 : Circuit électrique équivalent d'une photopile fonctionnant en situation de court-circuit

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 :

$$V_{ph} = R_{sh}(J_{phcc} - J_{ph}) \quad \text{III-3}$$

De l'équation III-3 on obtient la résistance shunt, suivante :

$$R_{sh} = \frac{V_{ph}}{J_{phcc} - J_{ph}} \quad \text{III-4}$$

$$J_{ph} \rightarrow J_{phcc}$$

$$SF > 10^5 \text{ cm. s}^{-1}$$

III.3.2.1 Effet de l'angle d'incidence sur la résistance shunt

La figure III- 8 suivante présente la variation du module de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

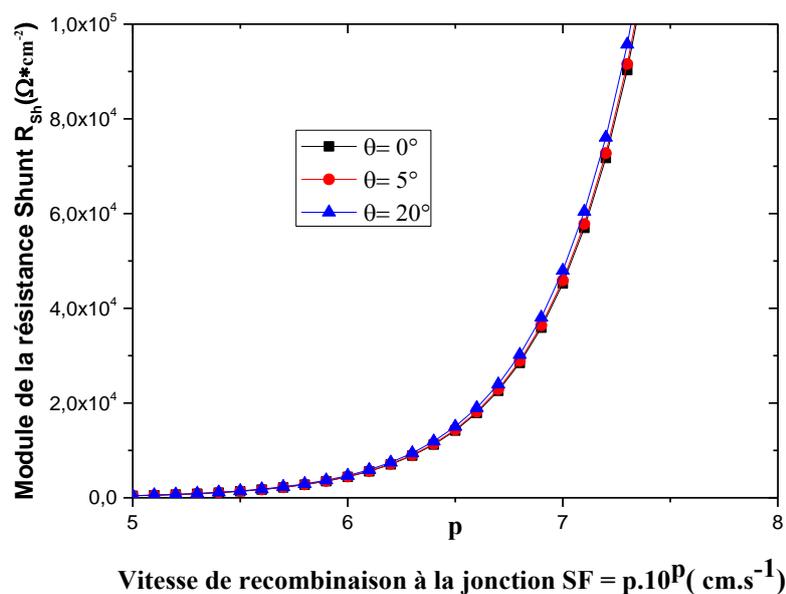


Figure III. 8 : module de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s}; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1}; \lambda = 0,60 \mu\text{m}; X = 0,3$$

Pour une longueur d'onde donnée la résistance shunt augmente de façon exponentielle avec la vitesse de recombinaison à la jonction SF ($SF > 5.10^5 \text{ cm/s}$). Cela se traduit par une forte recombinaison des porteurs à la jonction.

Nous constatons aussi que le module de la résistance shunt augmente légèrement avec l'augmentation de l'angle d'incidence. L'atténuation de l'intensité lumineuse suivant l'augmentation de l'angle d'incidence favorise des recombinaisons entre les bandes intermédiaires, donc une augmentation des courants de fuites.

III.3.2.2 Effet du taux de dopage au gallium sur la résistance shunt

A la figure III-9 nous représentons le profil du module de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium

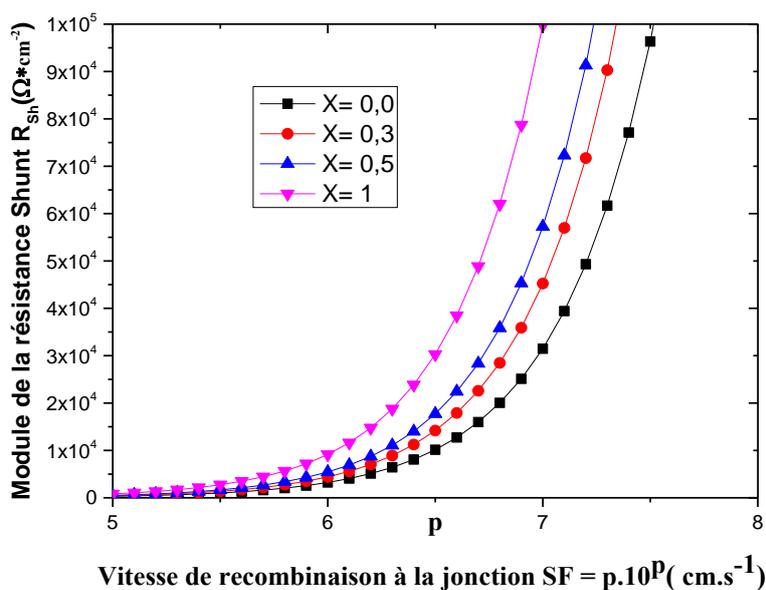


Figure III. 9 : module de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents taux de dopage au gallium

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad.s}^{-1} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; \theta = 0,0^\circ$$

Dans cette figure III-9, est illustrée la variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium. On observe que la résistance shunt augmente de façon exponentielle avec les grandes vitesses de recombinaisons à la jonction SF (photopile en situation de court-circuit).

En outre l'augmentation du taux de dopage au gallium augmente aussi la résistance shunt. On rappelle que l'augmentation du taux de dopage au gallium est accompagnée de celle de la zone de charge d'espace d'où une possible augmentation des fuites donc de la résistance shunt.

III-4 Etude de la capacité de diffusion

Sous l'effet du rayonnement solaire, les phénomènes de génération et de diffusion apparaissent de part et d'autre de la zone de charge d'espace de la cellule solaire induisant ainsi un stockage de charges négatives ($-Q$) dans la base et positives ($+Q$) dans l'émetteur. Cette disposition de charges de signes opposés le long de la zone de charges d'espace (ZCE) confère à la photopile les propriétés d'un condensateur plan de capacité variable. Par ailleurs la vitesse de recombinaison à la jonction qui fixe le point de fonctionnement du circuit ouvert et celui du court-circuit [7-1] conditionne l'épaisseur de la capacité de diffusion.

Cette capacité de diffusion est donnée par la relation

$$C = \frac{dQ}{dV_{ph}} \quad \text{III-5}$$

Avec

$$Q = q \cdot \delta(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)|_{x=0} \quad \text{III-6}$$

$$V_{ph} = V_T \cdot \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_i^2} \cdot \delta(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)|_{x=0} \right] \quad \text{III-7}$$

Tout calcul fait donne :

$$C = \frac{q \cdot n_i^2}{V_T \cdot N_b} + \frac{q \cdot \delta(0, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{V_T} \quad \text{III-8}$$

De cette expression on voit bien que la capacité est composée de deux termes :

-Le premier terme $\left(\frac{q \cdot n_i^2}{V_T \cdot N_b} \right)$ exprime la capacité intrinsèque C_0 ; elle dépend de la nature du matériau (substrat) à travers (n_i) , du dopage du matériau à travers (N_b) , de la température à travers V_T et du taux de dopage au gallium.

-Quant au deuxième terme $\left(\frac{q \cdot \delta(0, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{V_T} \right)$, il dépend bien sûr de la température (V_T) , du dopage du matériau et de sa nature (D et L), du point de fonctionnement (Sf), de la qualité de l'interface arrière (Sb), de la dimension de la photopile (H) de l'angle d'incidence θ et du taux de dopage au gallium. D'après cette analyse de l'expression de la capacité de diffusion, il est aisé de comprendre qu'elle sera facilement influençable par les paramètres tels que la longueur d'onde, la fréquence, la pulsation, l'angle d'incidence θ et le taux de dopage au gallium.

III-4-1 Etude du profil de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes longueurs d'ondes

À la **figure III-10** nous étudions le module de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde.

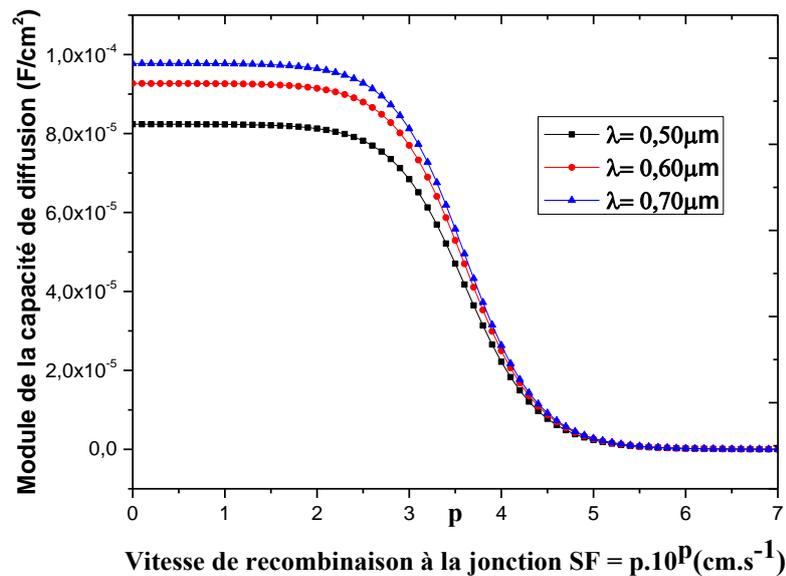


Figure III. 10 : module de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction SF pour différentes longueurs d'ondes

$$SB = 210^2 \text{ cm/s}; \quad \omega = 3 \cdot 10^6 \text{ rad.s}^{-1}; \quad \theta = 0,0^\circ \quad X = 0,3$$

Ces courbes montrent que le module de la capacité diminue avec la vitesse de recombinaison à la jonction. Ainsi on distingue deux zones caractéristiques :

- première zone située au voisinage du circuit ouvert : cette zone aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison, correspond au maximum de la capacité. En effet, au voisinage du circuit ouvert peu de porteurs de charges minoritaires en excès dans la base traversent la jonction. D'où un stockage significatif de charges dans la zone de charge d'espace.

- deuxième zone correspondant aux vitesses de recombinaisons élevées : ici la capacité diminue brusquement pour enfin tendre vers la capacité de valeurs faibles de court-circuit. Cette diminution brusque est due à une rapide libération des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base de la photopile.

Par ailleurs une observation plus profonde de l'influence de la longueur d'onde dans le visible permet de constater que plus cette dernière augmente plus l'amplitude du module de la capacité de la photopile augmente. En effet l'augmentation de la longueur d'onde, correspond à une diminution de l'énergie associée au rayonnement. Nous sommes dans un domaine d'énergie juste nécessaire pour stimuler les transitions inter-bandes dans la zone de charges d'espace, d'où une augmentation du cumul de charges, donc de celui de la capacité.

III-4-2 Etude du profil de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence

La figure III-11 montre la variation du module de la capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

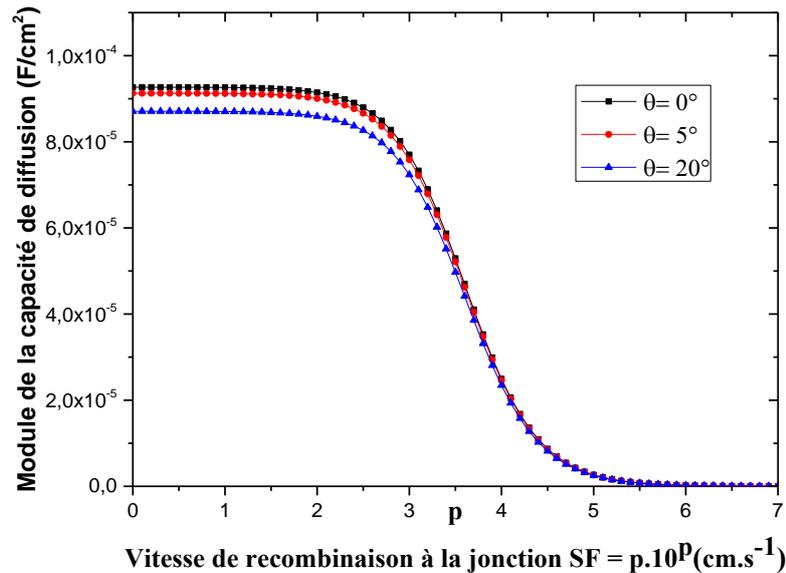


Figure III. 11 : module de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction SF pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

$$SB = 2.10^2 \text{ cm/s}; \quad \omega = 10^6 \text{ rad.s}^{-1}; \quad \lambda = 0,60\mu\text{m}; \quad X = 0,3$$

La capacité reste constante et élevée pour des valeurs faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction et diminue pour atteindre des valeurs très faibles vers des valeurs élevées des vitesses de recombinaisons à la jonction. On observe une diminution de la capacité si on augmente l'angle d'incidence. En effet la baisse de l'intensité lumineuse, les effets d'ombrage dus aux grilles métalliques et ceux des contacts ohmiques sont tant d'éléments limitant une bonne génération des porteurs minoritaires. Ainsi nous assistons à une faible génération des porteurs minoritaires d'où une faible diminution du stockage des porteurs, donc de la capacité.

III-4-3 Etude du profile de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium

A la figure III-12 nous représentons la variation du module de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium.

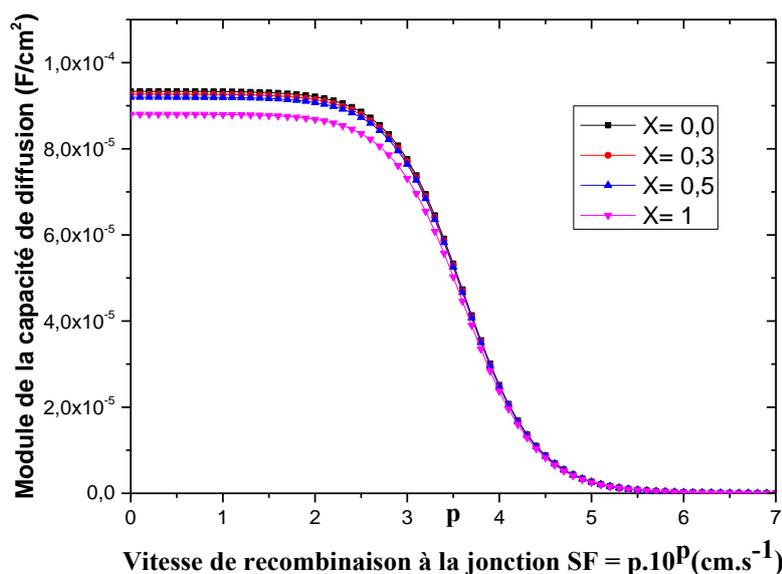


Figure III. 12 : module de la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction SF pour différents taux de dopage au gallium

$$SB = 210^2 \text{ cm/s}; \quad \omega = 3.10^6 \text{ rad. s}^{-1}; \quad \lambda = 0,60\mu\text{m}; \quad \theta = 0,0^\circ$$

Pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la capacité reste indépendante de la vitesse SF. Elle décroît très rapidement pour tendre vers des valeurs très faibles. L'augmentation du taux de dopage au gallium diminue le module de la capacité. En effet l'augmentation du taux de dopage au gallium augmente la zone de charges d'espace d'où la largeur de la capacité. Ainsi on assiste à une augmentation des zones de recombinaisons, engendrant une diminution des porteurs minoritaires donc diminution de la capacité.

III-5 Etude de l'impédance dynamique de la photopile

L'impédance de la photopile est donnée par l'expression (III-9) :

$$Z(H, \omega, SF, SB, \theta, X) = \frac{V_{cc}(H, \omega, SF, SB, \theta, X)}{J_{cc}(H, \omega, SF, SB, \theta, X)} \quad (\text{III-9})$$

Dans les paragraphes qui suivent l'impédance dynamique de la photopile sera étudiée au moyen des diagrammes de Nyquist et de Bode. Cela permettra d'avoir des appréciations sur la cellule solaire.

III-5-1 Etude du diagramme de Bode de l'impédance

Le diagramme de Bode [8] est une méthode mise au point pour simplifier l'obtention des tracés de réponse en fréquence.

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

III-5-1-1 Effet de l'angle d'incidence

La figure III-13 montre la variation du module de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation, pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

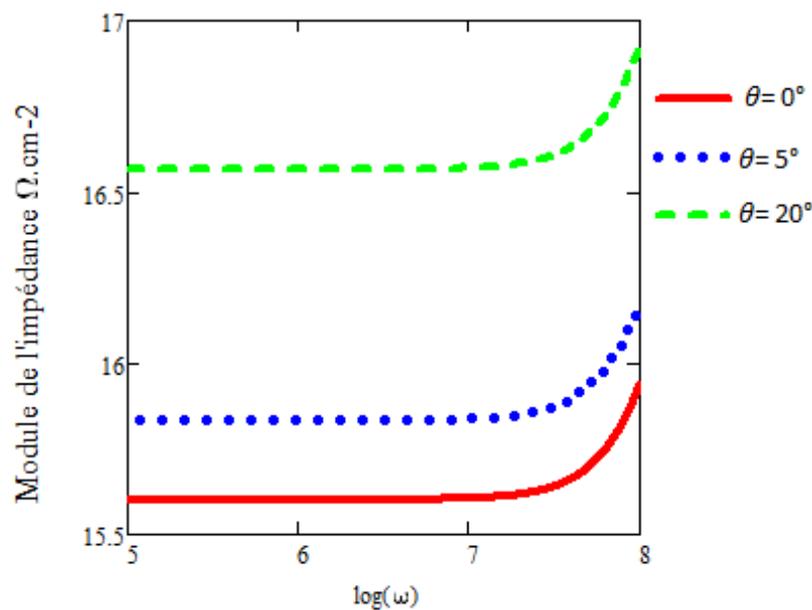


Figure III. 13 : module de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de l'angle d'incidence

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \lambda = 0,60\mu\text{m} ; X = 0,3$$

Sur cette figure III-13, on distingue deux zones d'évolution de l'impédance dynamique :

- la première zone correspondante à l'intervalle de pulsation $[0 \text{ rad/s} ; 3,1610^7 \text{ rad/s}]$: le module de l'impédance reste constant ; régime quasi statique,

- la deuxième zone correspondant à l'intervalle de pulsation $]3,16.10^7 \text{ rad/s} ; 10^8 \text{ rad/s}$ [on a une augmentation du module de l'impédance avec le logarithme de la pulsation ; régime dynamique.

Par ailleurs la figure III-13 montre que le module de l'impédance dynamique augmente avec l'angle d'incidence. Mais cette variation de l'angle d'incidence n'affecte pas la pulsation de résonnance correspondant au début de la variation de l'impédance avec la pulsation.

III-5-1-2 Effet du taux de dopage au gallium

A la figure III-14 nous représentons le module de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différents du taux de dopage au gallium.

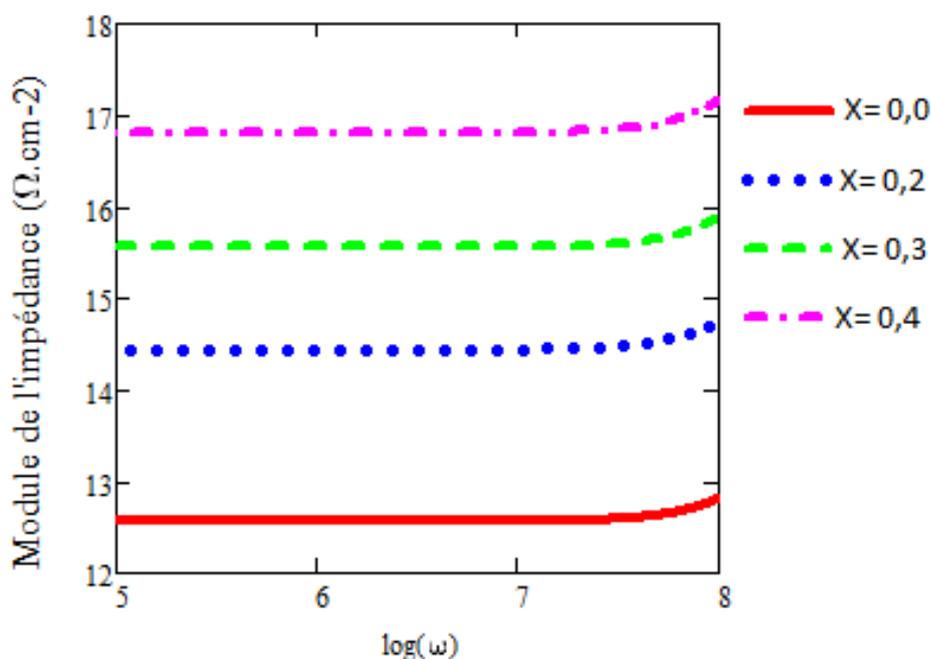


Figure III. 14 : module de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différents du taux de dopage au gallium

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \lambda = 0.60\mu\text{m} ; \theta = 0,0^\circ$$

Dans cette figure III-14 on observe deux zones de pulsations : la plage de pulsations $[0 \text{ rad/s} ; 3,1610^7 \text{ rad/s}]$ où le module est une constante ; régime statique et celle $]3,16.10^7 \text{ rad/s} ; 10^8 \text{ rad/s}$ [où le module augmente ; régime dynamique. Il faut noter que l'augmentation du taux de dopage au Gallium augmente la résistance dynamique sans affecter la pulsation limitant les deux zones.

III-5.2 Etude du diagramme de Bode de la phase de l'impédance

Dans ce diagramme il s'agit dans ces figures III-15 et III-16 de représenter la phase en fonction du logarithme de la pulsation.

III-5.2-1 Effet de l'angle d'incidence

La figure III-15 montre la variation de la phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

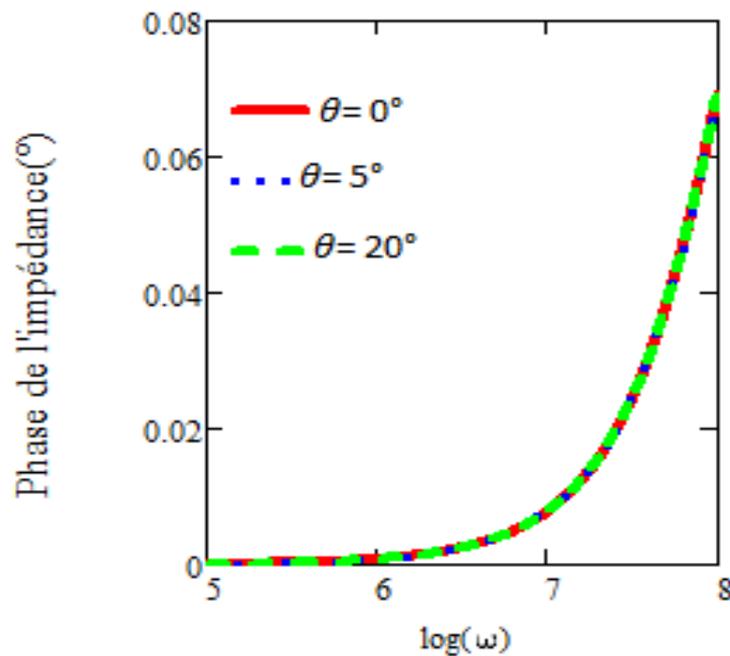


Figure III. 15 : phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

$$SB = 3 \cdot 10^3 \text{ cm/s} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; X = 0,3$$

La figure III-15 ainsi présentée illustre la variation de la phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation. Ainsi nous distinguons dans ce graphe deux domaines distincts. Le premier domaine correspond aux pulsations inférieures à 10^6 rad/s où la phase est presque égale à zéro. Dans ce domaine il n'y a pas de déphasage entre le signal et les porteurs produits. La deuxième partie correspond à des pulsations supérieures à 10^6 rad/s , où nous observons une augmentation de la phase avec la pulsation. Ainsi il y a déphasage entre le signal incident et les porteurs produits. L'observation de cette figure III-5 indique que l'angle d'incidence n'affecte pas la phase mais aussi la pulsation limitant les effets du déphasage.

III-5.2-2 Effet du taux de dopage au gallium

La Figure III-16 montre la variation de la phase de l'impédance dynamique avec le logarithme de la pulsation pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium

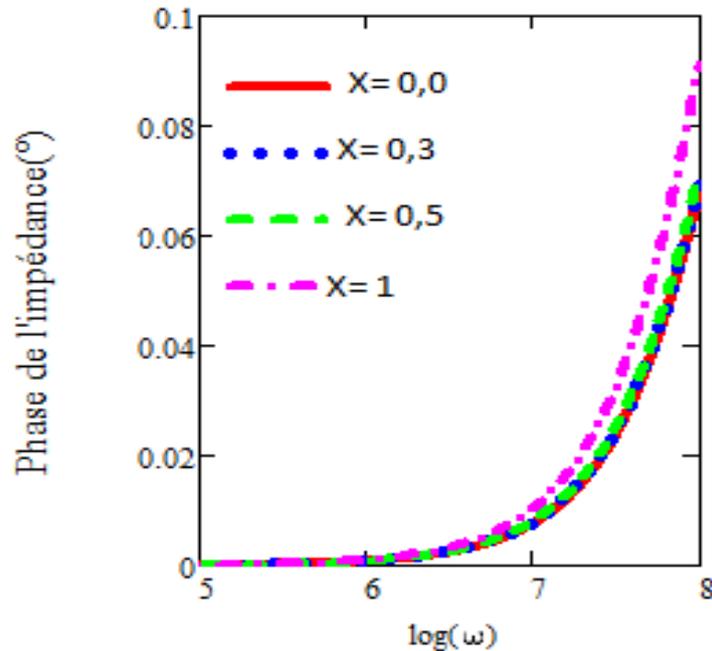


Figure III. 16 : phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différents taux de dopage gallium

$$SB = 3 \cdot 10^3 \text{ cm/s}; \lambda = 0,60 \mu\text{m}; \theta = 0,0^\circ$$

Dans cette figure III-16 est présentée la variation de la phase de l'impédance en fonction du logarithme de la pulsation pour différents taux de dopage gallium. Nous y distinguons aussi deux domaines. Le premier domaine aux pulsations inférieures à 10^6 rad/s ; la phase est presque nulle, il n'y a pas de déphasage entre le signal et les porteurs produits. Le deuxième domaine correspond à des pulsations supérieures à 10^6 rad/s . Ici nous observons une augmentation de la phase avec l'augmentation de la pulsation, il y a déphasage entre le signal incident et les porteurs produits. La figure indique aussi que l'augmentation du dopage au gallium augmente la phase de l'impédance. Mais aussi on assiste à une légère diminution de la pulsation limitant les effets de déphasage entre le signal et les porteurs produits.

Par ailleurs les figures III-15 et III-16 montrent que la phase reste positive ; les phénomènes inductifs restent prédominants.

III-6 Etude du diagramme de Nyquist de l'impédance

On rappelle que le diagramme de Nyquist [8-9-10] est la représentation de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance complexe $Z(\lambda, \omega, SB, SF, \theta, X)$.

III-6-1 Effet de l'angle d'incidence

La figure III-17 montre le diagramme de Nyquist de l'impédance avec les effets de l'angle d'incidence.

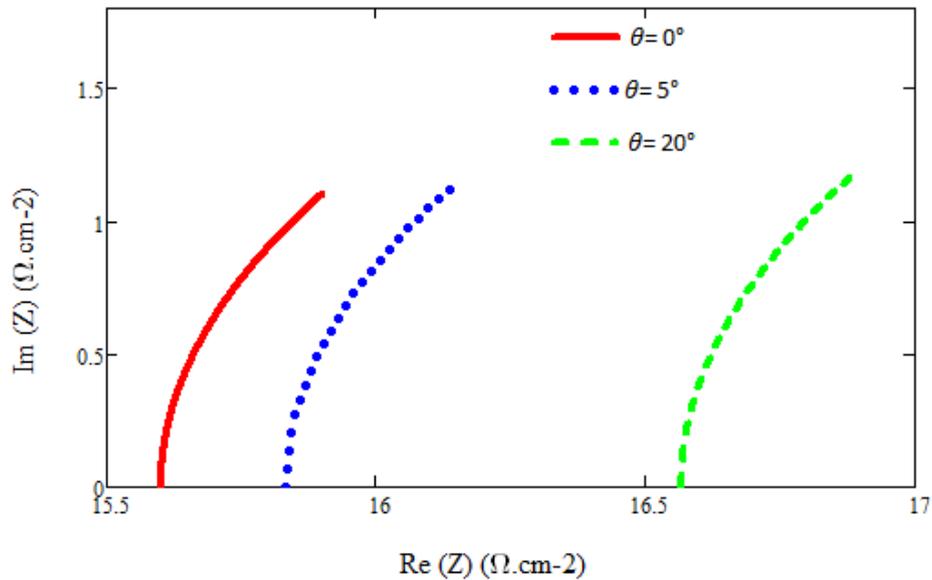


Figure III. 17 : partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance pour différentes valeurs de l'angle d'incidence

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s}; \lambda = 0,60\mu\text{m}; X = 0,3$$

Cette figure III-17 illustre la variation du diagramme de Nyquist avec les effets de l'angle d'incidence.

Le diagramme de Nyquist de l'impédance dynamique ne donne pas de demi-cercle mais des quarts de cercle. Ainsi l'allure des courbes montre l'augmentation de la partie imaginaire avec l'augmentation de la partie réelle de l'impédance selon la pulsation du rayonnement incident.

Par ailleurs la figure III-17 montre que la partie réelle augmente avec l'angle d'incidence au voisinage des pulsations nulles, le maximum des courbes vers les fréquences limites élevées reste une constante quelle que soit l'angle d'incidence. Ainsi le rayon des quarts de cercle reste une constante, cela présage une constance de la résistance shunt suivant les effets de l'angle d'incidence.

III-6-2 Effet du taux de dopage au gallium

La figure III-18 montre le diagramme de Nyquist de l'impédance avec les effets du taux de dopage au gallium

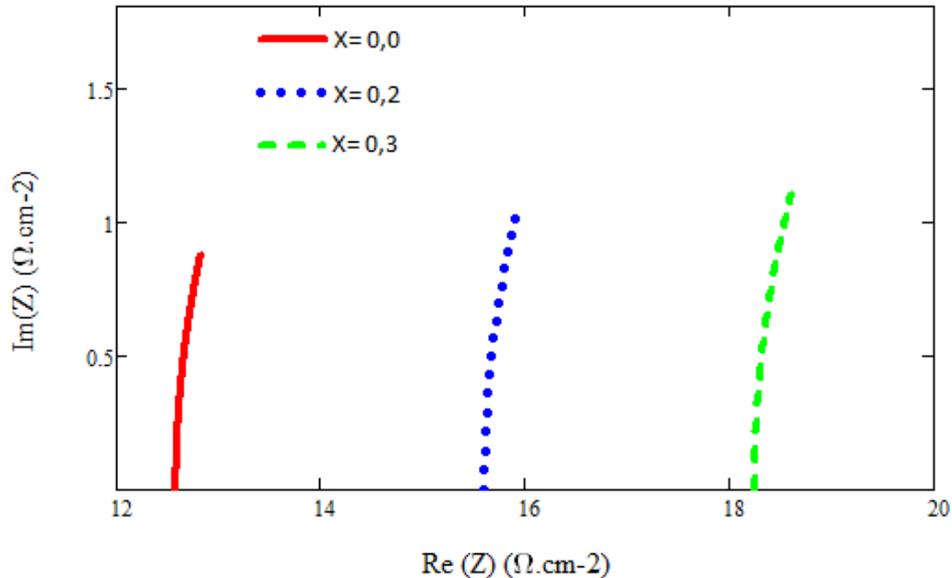


Figure III. 18 : partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance pour différents taux de dopage au gallium

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s}; \lambda = 0,60\mu\text{m}; \theta = 0,0^\circ$$

Cette figure III-18 met en évidence la variation de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle de l'impédance pour différents taux de dopage au gallium. Le diagramme de Nyquist de l'impédance dynamique ainsi représenté donne des quarts de cercle. L'allure des courbes montre l'augmentation de la partie imaginaire avec de la partie réelle de l'impédance selon la pulsation du rayonnement incident.

De suite toutes les courbes montrent que la partie réelle augmente avec le taux de dopage au gallium au voisinage des pulsations nulles. En plus nous observons que le maximum des courbes augmente avec le taux de dopage au gallium vers les fréquences limites élevées. On note aussi une augmentation des rayons de ces quarts de cercle. Les effets du taux de dopage sur cette représentation présagent une variation des résistances shunt et série avec le taux de dopage au gallium.

III-7 Schémas électriques équivalents de l'impédance

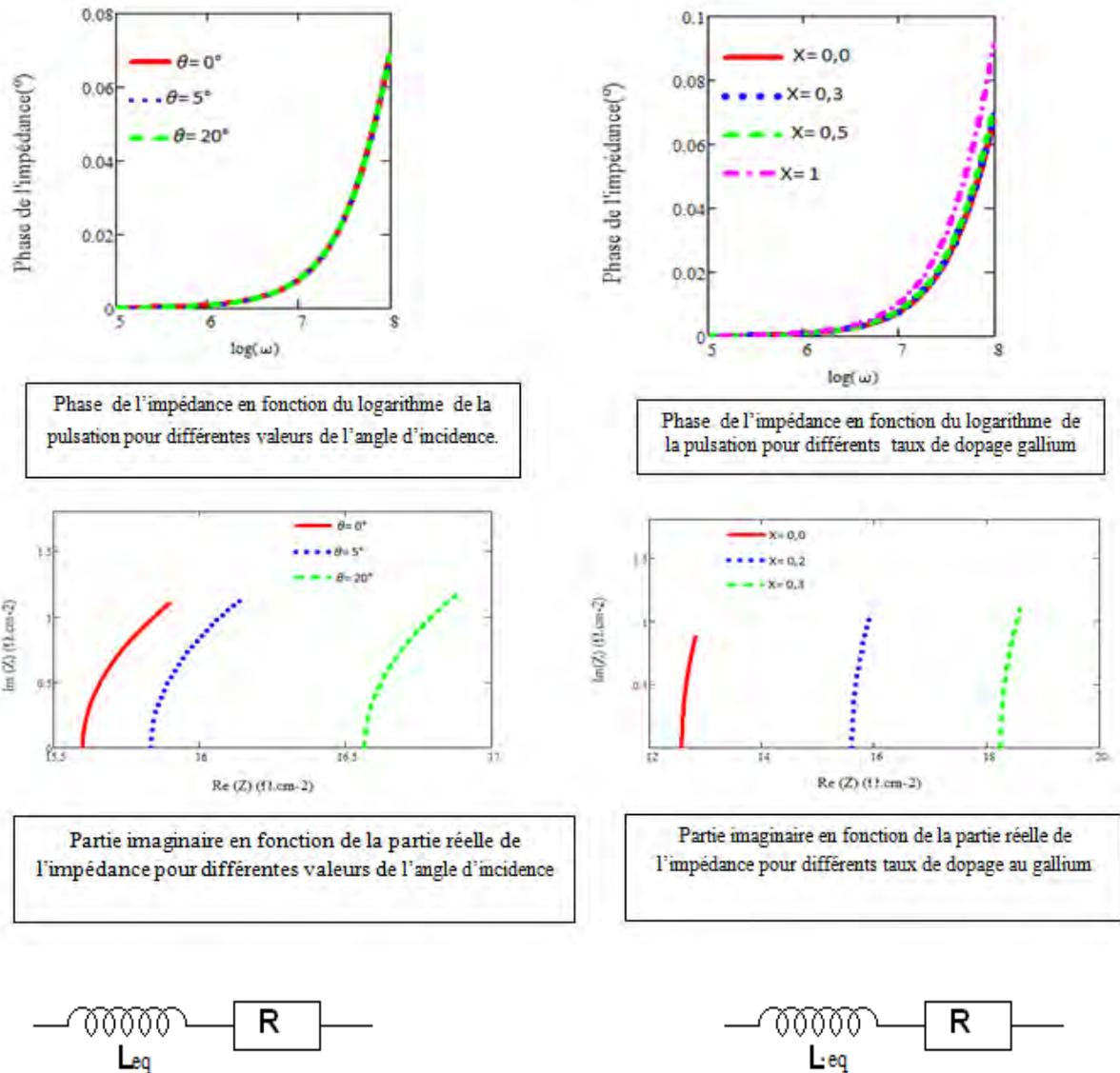


Figure III. 19 : schéma électrique équivalant de la cellule solaire

Les représentations de Bode et Nyquist de l'impédance dynamique nous ont permis d'aboutir aux schémas de circuits électriques équivalents caractérisant les effets dominants dans la photopile. On observe que les effets inductifs restent dominants. De ces schémas R est la résistance série qu'on détermine lorsque la fréquence est nulle et L_{eq} l'inductance qui peut être déduite lorsque la fréquence tend vers l'infini.

III-8 Puissance électrique de la photopile

III-8-1 Expression de la puissance

La puissance fournie par la photopile sous illumination monochromatique de longueur d'onde (λ_i) et pour un point de fonctionnement à SF donné, s'exprime par l'expression :

$$P = I \cdot V_{ph} \quad \text{III-10}$$

avec

$$I = J_{ph} - Id \quad \text{III-11}$$

où Id est le courant de diode

On rappelle que le courant de diode est un courant qui s'établit lorsque les porteurs de charge sont injectés ou photogénérés dans la photopile. Ainsi, pour une photopile éclairée, ce courant caractérise les pertes de porteurs générés et dépend de la tension, du coefficient d'absorption et des vitesses de recombinaison SF et SB. Il est donné par l'expression suivante [11].

$$Id = q \cdot SF0 \cdot \delta(0) \quad \text{III-12}$$

Où SF0 est la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, q la charge élémentaire et $\delta(0)$ donné par l'expression

$$\delta(0) = \frac{N_b}{n_i^2} \left[e^{\left(\frac{V}{V_T}\right)} - 1 \right] \quad \text{III-13}$$

III-8-2 Etude de l'effet de l'angle d'incidence sur la puissance

Nous représentons à la figure (III-20) la variation de la puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'angle d'incidence.

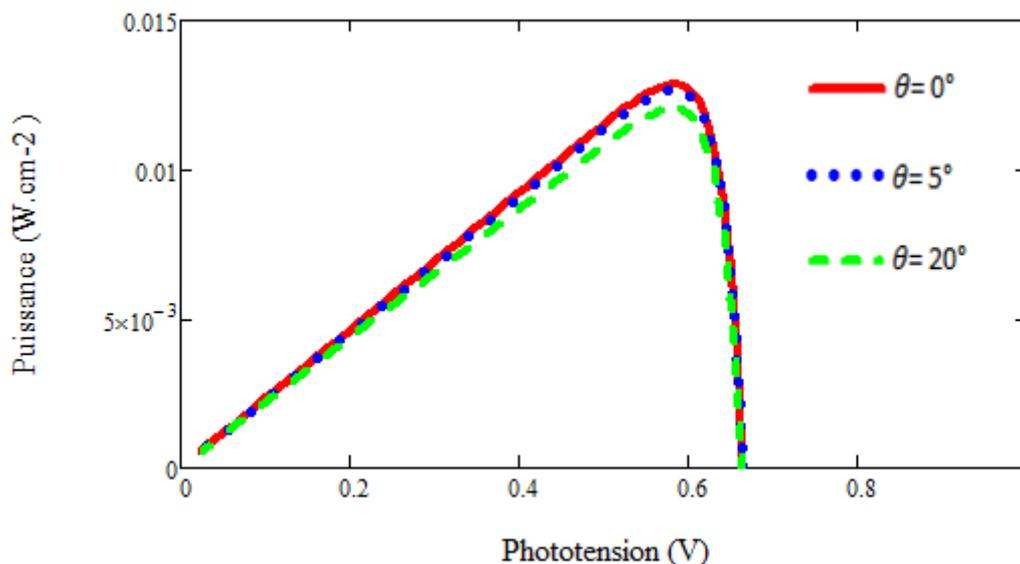


Figure III. 20 : module de la puissance de la photopile en fonction de la phototension pour différentes valeurs de l'angle d'incidence

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \lambda = 0,60\mu\text{m} ; X = 0,3$$

Cette figure III-20 ci-dessus montre que le module de la puissance électrique augmente avec la phototension jusqu'à atteindre sa valeur maximale qui correspond au point de fonctionnement maximal de la cellule solaire. A partir de cette valeur, la puissance diminue progressivement et tend vers des valeurs presque nulles quand la phototension tend vers la valeur de la phototension de circuit ouvert. En outre, le module de la puissance diminue avec l'augmentation de l'angle d'incidence, mettant ainsi en exergue les effets de l'atténuation de l'intensité du rayonnement.

III-8-3 Etude de l'effet du taux de dopage au gallium sur la puissance

A la figure III-21 nous montrons la variation de la puissance en fonction de la phototension pour différents taux de dopage au gallium.

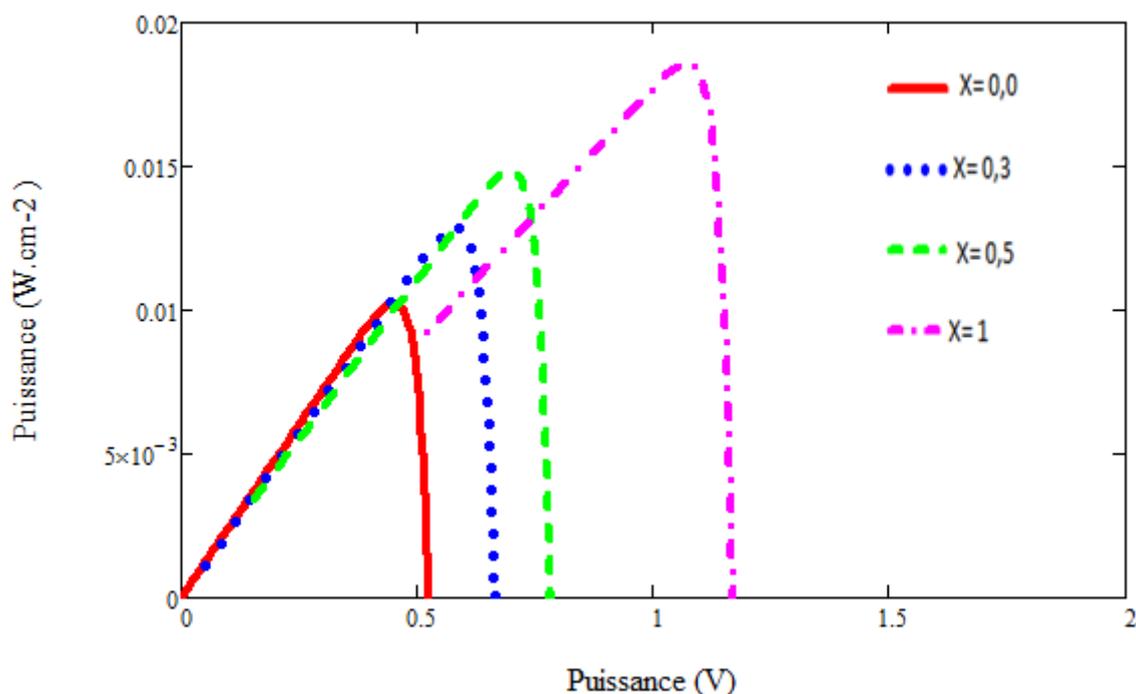


Figure III. 21 : variation du module de la puissance en fonction de la photo-tension pour différentes valeurs du taux de dopage au gallium

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad. s}^{-1} ; \lambda = 0,60\mu\text{m} ; \theta = 0,0^\circ$$

Dans cette figure III-21 nous observons les mêmes allures pour les quatre courbes. Une augmentation du module de la puissance avec la phototension atteignant sa valeur maximale et puis diminue progressivement pour tendre vers zéro. Par ailleurs l'augmentation du dopage au gallium a pour effet, une augmentation du maximum de la puissance.

III-9 Etude du facteur de forme et rendement de conversion photovoltaïque

III-9 -1 Etude du facteur de forme

III-9 -1-1 Expression du facteur de forme

Le facteur de forme FF 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} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale)

Son expression est donnée par la relation (III-14):

$$FF = \frac{P_{max}(\lambda, \omega, SB, SF, \theta, X)}{V_{CO}(\lambda, \omega, SB, SF, \theta, X) \cdot J_{CC}(\lambda, \omega, SB, SF, \theta, X)} \quad \text{III-14}$$

III-9 -1-2 Etude de l'effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur le facteur de forme

Nous représentons dans la figure III-22 la variation du facteur de forme en fonction de l'angle d'incidence

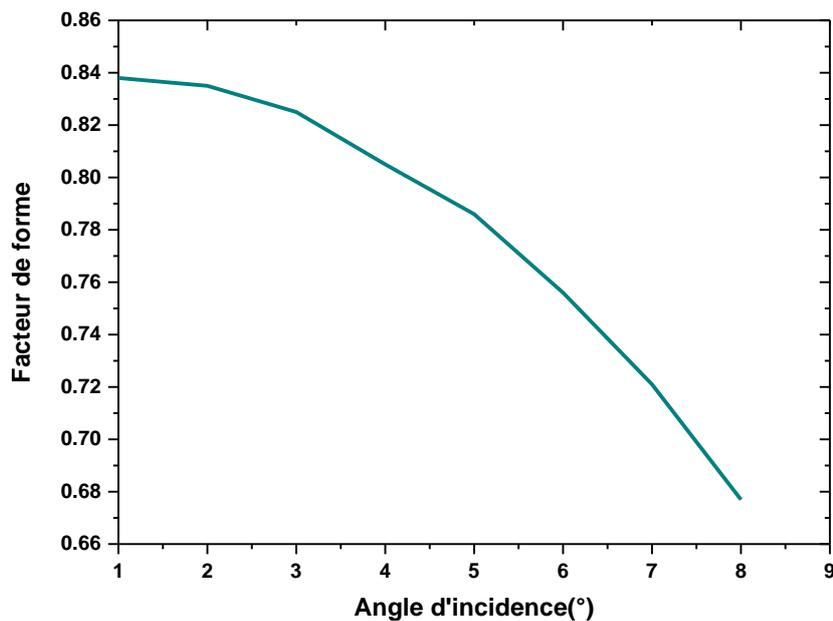


Figure III. 22 : module du facteur de forme en fonction de l'angle d'incidence

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad/s} ; \lambda = 0.60 \mu\text{m} ; X = 0.3$$

La figure III-22 ainsi représentée montre la variation du facteur de forme avec l'angle d'incidence. Nous observons une diminution du facteur de forme avec l'augmentation de l'angle d'incidence. En effet nous avons observé dans la figure précédente une diminution du

module de la puissance avec l'augmentation de l'angle d'incidence. Ces effets se font ressentir sur le facteur de forme.

A la figure III-23 nous représentons le module du facteur de forme en fonction du taux de dopage au gallium.

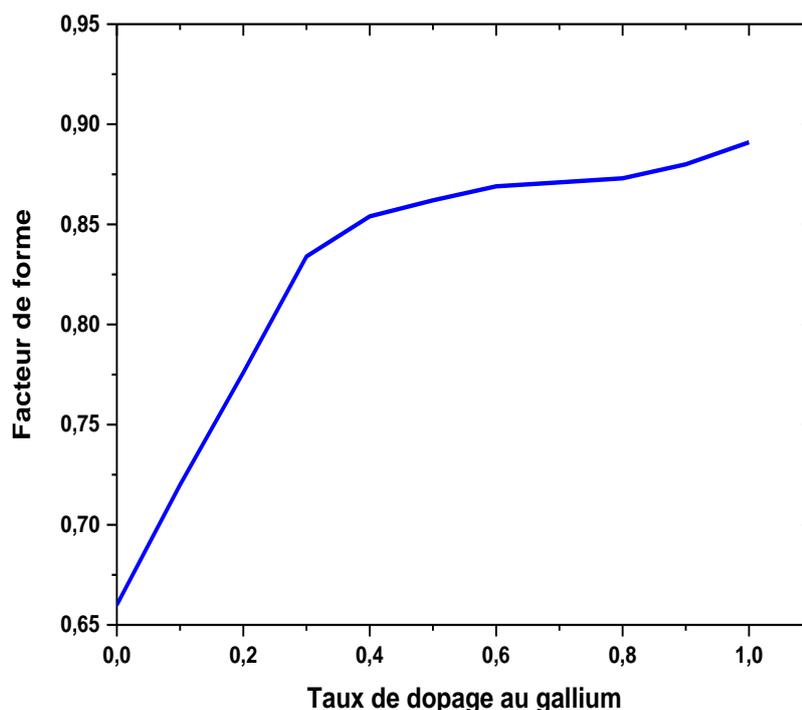


Figure III. 23 : variation du module du facteur de forme avec le taux de dopage au gallium

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad/s} ; \lambda = 0,60 \mu\text{m} ; \theta = 0,0^\circ$$

De cette figure III-24 est illustrée la variation du facteur de forme avec le taux de dopage. Nous observons une augmentation du facteur de forme avec l'augmentation du dopage au gallium. Ainsi le taux de dopage au gallium augmente la qualité de la cellule.

III-9 -2 le rendement de conversion photovoltaïque

III-9-2-1 Expression du rendement

Le rendement est le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule par la puissance lumineuse incidente. Le rendement est donné par la relation (III-15) :

$$\eta = \frac{P_{max}(\lambda, \omega, SB, SF, \theta, X)}{P_{in}(\lambda)} = FF \frac{V_{CO} J_{CC}}{P_{in}(\lambda)} \quad \text{III-15}$$

Ou $P_{in}(\lambda)$ est la puissance incidente de la lumière et est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$ ($P_{solaire} = 100mW/cm^2$).

Ce rendement peut être ajuster selon le facteur de forme, la densité de courant de court-circuit, et la phototension de circuit ouvert.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans un circuit électrique. En circuit ouvert ($R_{ch} = \infty, J = 0, V = V_{CO}$) ou en court circuit ($R_{ch} = 0, J = J_{CC}, V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance charge R_{ch} pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la charge est maximale et noté P_{max} .

Par la suite nous examinerons par les figures précédentes les effets de l'angle d'incidence et du dopage du taux de gallium sur le rendement respectivement.

III-9 -I-2 Etude de l'effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur le rendement de conversion photovoltaïque

A La figure III-25 nous montrons la variation du rendement en fonction de l'angle d'incidence.

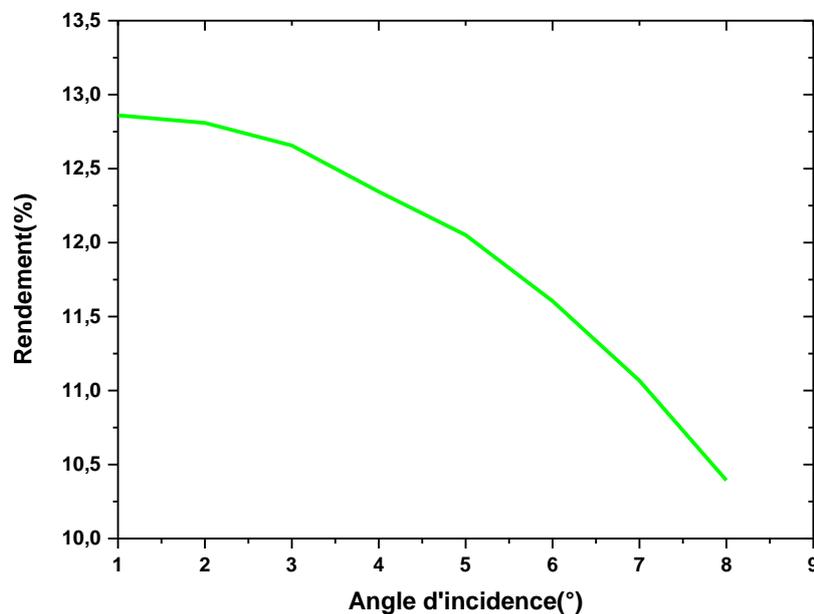


Figure III. 24 : rendement de conversion photovoltaïque en fonction de l'angle d'incidence

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad/s} ; \lambda = 0,60\mu\text{m} ; X = 0,3$$

Cette figure III-24 illustre la variation du rendement de la cellule solaire en fonction de l'angle d'incidence. Nous observons une diminution du rendement avec l'augmentation de l'angle d'incidence. A l'image de la diminution de la puissance mais aussi du facteur de forme suivant l'augmentation de l'angle d'incidence nous avons aussi les mêmes effets sur le rendement. En effet la diminution de l'angle d'incidence s'accompagne de celle des porteurs minoritaires donc de la diminution du rendement.

A la figure III-25 nous montrons la variation du rendement de conversion photovoltaïque de la cellule avec le taux de dopage au gallium

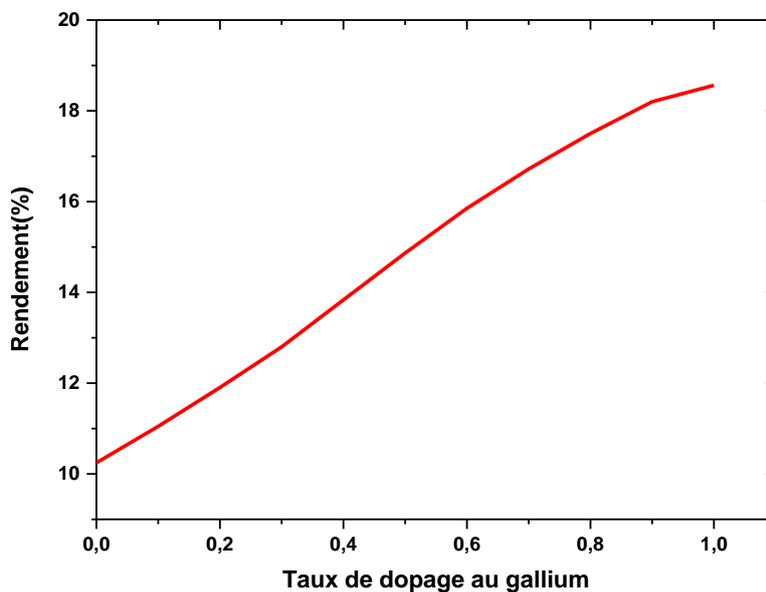


Figure III. 25 : variation du rendement de conversion photovoltaïque avec le taux de dopage au gallium

$$SB = 3.10^3 \text{ cm/s} ; \omega = 10^6 \text{ rad/s} ; \lambda = 0,60\mu\text{m} ; \theta = 0,0^\circ$$

Cette figure III-25 ci-dessus illustre l'évolution du rendement de conversion photovoltaïque avec le taux de dopage au gallium. Ainsi le rendement de la cellule augmente avec le taux de dopage au gallium. Donc le dopage au gallium renforce les bonnes performances de la cellule.

Conclusion

Dans ce chapitre l'étude de la cellule solaire à base de CIGS, pour un éclairage monochromatique à la face avant de la cellule solaire à base de CIGS, a permis de déterminer les paramètres électriques tels que, la résistance dynamique, la puissance, la capacité de la jonction les résistances série et shunt, le facteur de forme et le rendement photovoltaïque. Ces paramètres ainsi étudiés, varient aussi fortement avec la fréquence de l'éclairage lorsqu'on est dans le domaine des hautes fréquences $\omega > 10^6 \text{rad/s}$ et restent faiblement sensibles à la fréquence de l'éclairage pour des fréquences faibles $\omega < 10^6 \text{rad/s}$: régime quasi-statique). L'étude de la caractéristique courant-tension nous a permis d'illustrer les résistances série et shunt. Par ailleurs les effets de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium ont été mis en évidence sur les résistances série et shunt, la résistance dynamique, la capacité de la cellule, le facteur de forme et du rendement de la cellule, montrant ainsi les effets nuisibles de l'augmentation de l'angle d'incidence mais aussi de la possibilité de d'améliorer les performances d'une cellule solaire par l'augmentation du taux de dopage au gallium.

Références

- [1] H. L. Diallo, A. Wereme, A. S. Maiga et G. Sissoko, « New approach of both junction and back surface recombination velocities in 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell », *Eur Phys. J. Appl. Phys.* 42, pp. 203- 211, 2008.
- [2] S. Mbodji, B. Mbow, F. I. Barro et G. Sissoko, « A 3D model for thickness diffusion capacitance of emitter-base junction determination in a bifacial polycrystalline solar cell under real operating condition », *Turk. J. Phys.* 35 281-291, 2011
- [3] Charles Roger, Sébastien Noël, Olivier Sicardy, Pascal Faucherand, Louis Grenet, Nicolas Karst, Hélène Fournier, Frédéric Roux, Frédérique Ducroquet, Arnaud Brioude, Simon Perraud « Characteristics of molybdenum bilayer back contacts for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells on Ti foils » *Thin Solid Films* 548 (2013) 608–616
- [4] El-Adawi M. K. and Al-Nuaim I. A., “A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V characteristic curve considering its shunt resistance – new approach,” *Vacuum*, 64, pp. 33- 36, 2002.
- [5] Johnathan Charles Armstrong, Jingbiao Cui « Optimization of solution-processed Cu(In,Ga)S₂ by tuning series and shunt resistance » *J. Mater. Res.*, Vol. 29, No. 11, Jun 14, 2014
- [6] I. ZERBO, F.I. BARRO, B. MBOW, A. DIAO, F. ZOUGMORE, G. SISSOKO
“Theoretical Study of Bifacial Silicon Solar Cell Under Frequency Modulated White Light : Determination of Recombination Parameters”. Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2004), Poster 1AV.2.56, Paris, FRANCE.
- [7] G. SISSOKO, S. SIVOTHANAM, M. RODOT, P. MIALHE “Constant illumination-induced open circuit voltage decay (CIOCV) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk and back surface characterization”. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, poster 1B, 12-16 October, 1992, Montreux, Switzerland, pp.352-54
- [8] LATHI, BHAGWANDAS PANNALAL “Signals, systems and controls” Intext Educational Publisher, New York, 1973-1974
- [9] D. CHENVIDHYA, K. KIRTIKARA, C. JIVACATE. “Solar Energy Materials and Solar Cells” 80(2003) 459-464
- [10] R. ANIL KUMAR, M.S. SURESH AND J. NAGARAJU IEEE “Measurement of AC parameters of Gallium Arsenide (GaAs/Ge) solar cell by impedance spectroscopy”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.48, No.9, pp 2177-2179, September 2001.

[11] Effet de la longueur d'onde de l'excitation optique sur les phénomènes de recombinaison dans une photopile en régimes statique et transitoire Casimir Museruka these de doctorat de 3ème cycle mars 1995.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail présente l'étude en régime dynamique fréquentiel d'une photopile monofaciale à base de Diséléniure de Cuivre d'Indium et de Gallium (CIGS) sous éclairage monochromatique.

Au cours de notre premier chapitre, nous avons présenté les généralités sur la couche mince absorbante, le CIGS. Les propriétés optique, électrique et structurale ont été mis en exergue. Il est aussi présenté dans cette partie, certains modèles électriques qui ont permis de modéliser la cellule solaire étudiée dans ce travail.

L'étude est portée sur un modèle simplifié de cellule solaire à base de CIGS. En partant de l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès de la photopile en régime dynamique fréquentiel, les expressions du photocourant, de la phototension, et des vitesses de recombinaisons ont été obtenues.

Les effets de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur le photocourant, la phototension, et la vitesse de recombinaisons à la jonction y sont présentés.

Les résultats montrent que l'augmentation de l'angle d'incidence diminue la densité de porteurs minoritaires, le module de la densité de photocourant avec une légère décroissance de la phototension

En outre le module de la densité des porteurs minoritaires augmente alors que la phototension diminue quand le taux de dopage au gallium augmente.

Il est observé que la densité de photocourant de court-circuit J_{cc} est plus affectée par l'angle d'incidence θ .

Nous constatons aussi que les effets du taux de dopage au gallium sur la phototension sont plus importants que ceux observés par l'angle d'incidence.

Dans la suite de cette étude des paramètres électriques de la cellule ont été déterminés. Ainsi les paramètres électriques comme la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}), ont été déterminés par le biais de modèles électriques. Leur étude montre que le module de la résistance série augmente avec l'augmentation de l'angle d'incidence et celle du taux de dopage au gallium.

Le module de la résistance shunt augmente légèrement avec l'augmentation de l'angle d'incidence. L'augmentation du taux de dopage au gallium augmente aussi la résistance shunt. Une étude sur la capacité (C) montre une diminution de la capacité avec l'augmentation de l'angle d'incidence. Mais aussi l'augmentation du taux de dopage au gallium diminue le module de la capacité

L'impédance (Z) est étudiée par les moyens des diagrammes de Nyquist et de Bode (la phase et du module de l'impédance).

L'étude du diagramme de Bode nous a permis d'identifier deux zones.

*la première zone correspondante à l'intervalle de pulsation $[0 \text{ rad/s} ; 3,1610^7 \text{ rad/s}]$ ou le module de l'impédance reste constant c'est le régime quasi statique,

*la deuxième zone correspondante à l'intervalle de pulsation $]3,16.10^7 \text{ rad/s} ; 10^8 \text{ rad/s}]$ [ou on a une augmentation du module de l'impédance avec le logarithme de la pulsation ; régime dynamique.

Le module de l'impédance dynamique augmente avec l'angle d'incidence. Mais cette variation de l'angle d'incidence n'affecte pas la pulsation de résonance correspondant au début de la variation de l'impédance avec la pulsation.

Il faut noter que l'augmentation du taux de dopage au Gallium augmente la résistance dynamique sans affecter la pulsation limitant les deux zones.

En étudiant la phase nous observons que l'angle d'incidence n'affecte pas la phase mais aussi la pulsation limitant les effets du déphasage.

L'augmentation du taux dopage au gallium augment la phase de l'impédance. Mais aussi on assiste à une légère diminution de la pulsation limitant les effets de déphase entre le signale et les porteurs produits.

Le tracé des diagrammes de Niquist nous ont permis de proposer un modèle électrique équivalent de la photopile. On observe que les effets inductifs restent dominants

La puissance électrique, le facteur de forme et le rendement de la photopile ont été aussi déterminés et étudiés en fonction de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium.

En outre, le module de la puissance diminue avec l'augmentation de l'angle d'incidence, mettant ainsi en exergue les effets de l'atténuation de l'intensité du rayonnement.

Par ailleurs l'augmentation du dopage au gallium a pour effet, une augmentation du maximum de la puissance.

Le facteur de forme et le rendement diminuent sous l'effet de l'angle d'incidence et augmentent sous l'effet du taux de dopage au gallium.

En somme nous constatons une limite du modèle étudié. En effet dans la littérature c'est le taux de dopage de $X = 0,3$ qui donne le meilleur rendement et cela ne s'est pas vérifié dans cette étude. Néanmoins nous avons pu mettre en évidence les évolutions des paramètres de la cellule avec le taux de dopage au gallium et l'angle d'incidence en corrélation avec la littérature.

Cette contribution que nous venons d'effectuer dans l'étude de cellule solaire à couches minces en régime dynamique fréquentiel ouvre de nouvelles perspectives de recherche dans le domaine des photopiles à couches minces. En effet à l'avenir on peut envisager pour compléter notre travail comme perspectives des études sur :

- * la contribution de l'émetteur aux performances de la cellule
 - * l'effet des joints de grains et de la vitesse de recombinaison aux joints de grains
- * des couches peroxydes au lieu et place de la couche CIGS
- * Le comportement de la photopile en régime dynamique transitoire
- * la même photopile avec un éclairage multispectral.
- * L'étude à trois dimensions
- * Les caractéristiques de la photopile en régime statique
- * l'étude des cellules solaires tandem

ANNEXES MATHÉMATIQUE

I-EQUATION DE DIFFUSION DE PORTEURS DE CHARGES MINORITAIRES EN EXCES D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE DE CIGS EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL SOUS ECLAIREMENT MONOCROMATIQUE

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

La densité des porteurs minoritaires et le taux de génération des porteurs minoritaires dans la base peuvent se mettre respectivement sous la forme

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

$$G(x, \theta, t) = g(x, \theta) e^{(i\omega t)} \quad (3)$$

Le taux de génération $g(x, \theta)$, pour un éclairage par la face avant de la photopile est de la forme :

$$g(x, \theta) = \alpha(\lambda) \Phi(\lambda) (1 - R(\lambda)) \cos(\theta) e^{-\alpha(\lambda)x}$$

En remplaçant les équations (2), (3) et (4) dans l'équation (1), nous obtenons l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 \delta(x, \theta)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \theta)}{L^2(\omega)} + \frac{g(x, \theta)}{D(\omega)} = 0 \quad (4)$$

$$L(\omega) = L_0 \sqrt{\frac{(1-i\omega\tau)}{1+(\omega\tau)^2}} \quad (5)$$

$$\alpha(\lambda, X) = A \sqrt{\left(\frac{hc}{\lambda} - E_g(X)\right)} \quad (6)$$

$$E_g(X) = 1,035 + 0,65X - 0,264X(1 - X) \quad (7)$$

I- 2 Solution de l'équation de continuité et conditions aux limites

I- 2 -1 Solution de l'équation de continuité

La solution générale de l'équation s'écrit sous la forme :

$$\delta(x, \theta) = \delta_1(x, \theta) + \delta_2(x) \quad (8)$$

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

I- 2 -2 Solution particulière de l'équation avec second membre

La solution particulière de l'équation avec second membre est donnée par la relation (9) :

$$\delta_1(x, \theta) = C \cdot e^{(-\alpha(\lambda, X)x)} \quad (9)$$

En remplaçant l'équation (7) dans l'équation (4) on en déduit C, par l'expression :

$$C = \frac{\alpha(\lambda, X)\phi(\lambda)(1-R(\lambda)).L^2(\omega).\cos\theta}{D(\omega).(\alpha^2(\lambda, X)L^2(\omega)-1)} \quad (10)$$

$$\text{Donc, } \delta_1(x, \theta) = -\frac{\alpha(\lambda, X)\phi(\lambda)(1-R(\lambda)).L^2(\omega).\cos\theta}{D(\omega).(\alpha^2(\lambda, X)L^2(\omega)-1)} e^{(-\alpha(\lambda, X)x)} \quad (11)$$

I-2 -3 Solution générale de l'équation sans second membre :

La solution générale de l'équation sans second membre est donnée par la relation suivante.

$$\delta(x, \theta) = A \cosh\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) \quad (12)$$

Expression de la densité des porteurs de charges est donnée par la relation (11)

$$\delta(x, \lambda, \omega, t, \theta) = \left[A \cosh\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) - \frac{\alpha(\lambda, X)\phi(\lambda).(1-R(\lambda))\cos\theta}{D(\omega).(\alpha^2(\lambda, X)L^2(\omega)-1)} e^{(-\alpha(\lambda, X)x)} \right] \cdot e^{i\omega t} \quad (13)$$

I-3 Conditions aux limites

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

➤ à la jonction (en $x=0$):

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \theta)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{SF}{D(\omega)} \delta(0, \theta) \quad (9)$$

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

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \theta)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{SB}{D(\omega)} \delta(H, \theta) \quad (10)$$

Où SF et SB désignent respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs

$$\text{Soit } (H, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) \leftrightarrow (\dot{Y}) \quad (11)$$

Le calcul donne

$$A(\dot{Y}) = \frac{L^3(\omega).\alpha(\lambda, X).\phi(\lambda).(1-R(\lambda))\cos\theta}{D(\omega).(\alpha^2(\lambda, X)L^2(\omega)-1)} \cdot \left[\frac{D(\omega)(SB-\alpha(\lambda, X).D(\omega)).e^{(-\alpha(\lambda, X)H)} + (\alpha(\lambda, X).D(\omega)+SF).(D(\omega).\cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + L'\omega).SB.\sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right))}{(D^2(\omega)+L^2(\omega).SF.SB).\sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + L(\omega).D(\omega).(SB+SF).\cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)} \right] \quad (12)$$

$$B(\ddot{Y}) = \frac{L^3(\omega) \cdot \alpha(\lambda, X) \cdot \Phi(\lambda) (1 - R(\lambda)) \cos \theta}{D(\omega) \cdot (\alpha^2(\lambda, X) L^2(\omega) - 1)} \left[\frac{L(\omega) \cdot SF (SB - \alpha(\lambda, X) \cdot D(\omega)) e^{(-\alpha(\lambda, X) H)} - (\alpha(\lambda, X) \cdot D(\omega) + SF) (D(\omega) \cdot \sinh \frac{H}{L(\omega)} + L(\omega) \cdot SB \cdot \cosh \frac{H}{L(\omega)})}{(D^2(\omega) + L^2(\omega) \cdot SF \cdot SB) \cdot \sinh \frac{H}{L(\omega)} + L(\omega) \cdot D(\omega) \cdot (SB + SF) \cdot \cosh \frac{H}{L(\omega)}} \right] \quad (13)$$

Ainsi

$$\delta(\ddot{Y}) = \left[\begin{array}{c} A(H, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) \cosh \left(\frac{x}{L(\omega)} \right) + \\ B(H, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) \sinh \left(\frac{x}{L(\omega)} \right) - \frac{\alpha(\lambda, X) \cdot \Phi(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cos \theta}{D(\omega) \cdot (\alpha^2(\lambda, X) L^2(\omega) - 1)} e^{(-\alpha(\lambda, X) x)} \end{array} \right] \quad (14)$$

I-4 Calcul de la densité du photocourant

$$J_{ph}(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) = q \cdot D(\omega) \cdot \left. \frac{\partial \delta(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (15)$$

Tout calcul donne

$$J(\ddot{Y}) = q \cdot D(\omega) \left[\frac{B(H, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{L(\omega)} + \frac{\alpha^2(\lambda, X) L^2(\omega) \cdot \Phi(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cos \theta}{D(\omega) \cdot (\alpha^2(\lambda, X) L^2(\omega) - 1)} \right] \quad (16)$$

I-5 calcul de la densité du photocourant de court-circuit

$$J(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) |_{SF > 5.10^5} \rightarrow J_{cc}(\lambda, \omega, SB, \theta, X) \quad (17)$$

$$J_{cc}(\ddot{Y}) = \frac{L^2(\omega) \cdot \alpha(\lambda, X) \cdot \Phi(\lambda) \cdot q \cdot (1 - R(\lambda)) \cos \theta}{(\alpha^2(\lambda, X) L^2(\omega) - 1)} \left[\frac{L(\omega) \cdot (SB - \alpha(\lambda, X) \cdot D(\omega)) e^{(-\alpha(\lambda, X) H)} + (L(\omega) \alpha(\lambda, X) \cdot D(\omega) - L(\omega) SB) \cdot \cosh \frac{H}{L(\omega)} + (L^2(\omega) \cdot \alpha(\lambda, X) SB - D(\omega)) \cdot \sinh \frac{H}{L(\omega)}}{L^2(\omega) SB \cdot \sinh \frac{H}{L(\omega)} + L(\omega) D(\omega) \cdot \cosh \frac{H}{L(\omega)}} \right] \quad (18)$$

I.6 Phototension

$$V(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) = V_T \ln \left[\frac{N_b}{n_0^2} \delta(0, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) + 1 \right] \quad (19)$$

$$V_{ph}(\ddot{Y}) = VT \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{Nb}{n^2(X)} \left[A(H, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X) - \frac{\alpha(\lambda, X)L^2(\omega) \cdot \Phi(\lambda) \cdot (1-R(\lambda)) \cos\theta}{D(\omega) \cdot (\alpha^2(\lambda, X)L^2(\omega) - 1)} \right] \right\} \quad (20)$$

I-7 Phototension de circuit-ouvert

$$V(\lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)|_{SF \rightarrow 0} \rightarrow V_{CO}(\lambda, \omega, SB, \theta, X) \quad (21)$$

$$V_{CO}(\ddot{Y}) = VT \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{Nb \cdot \alpha(\lambda, X)L^2(\omega) \cdot \Phi(\lambda) \cdot (1-R(\lambda)) \cos\theta}{n^2(X) \cdot D(\omega) \cdot (\alpha^2(\lambda, X)L^2(\omega) - 1)} \left[\frac{L(\omega) \cdot D(\omega) (SB - \alpha(\lambda, X)) \cdot D(\omega) e^{(-\alpha(\lambda, X)H) +}}{L(\omega) \alpha^2(\lambda, X) D(\omega) \cosh \frac{H}{L(\omega)} + L(\omega) \alpha(\lambda, X) \cdot D(\omega) \cdot SB \sinh \frac{H}{L(\omega)}} \right] \right\} \quad (22)$$

I-8 Calcul de la capacité

$$C = \frac{dQ}{dV_{ph}} \quad (23)$$

Avec

$$Q = q \cdot \delta(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)|_{x=0} \quad (24)$$

$$V_{ph} = V_T \cdot \ln \left[1 + \frac{Nb}{n_i^2} \cdot \delta(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)|_{x=0} \right] \quad (25)$$

Tout calcul donne

$$C(\ddot{Y}) = \frac{q^2}{Kb.T} \left\{ \frac{n^2(X)}{Nb} + \frac{\alpha(\lambda, X)L^2(\omega) \cdot \Phi(\lambda) \cdot (1-R(\lambda)) \cos\theta}{D(\omega) \cdot (\alpha^2(\lambda, X)L^2(\omega) - 1)} \cdot \left[\frac{L(\omega) \cdot (SB - \alpha(\lambda, X) \cdot D(\omega)) (e^{(-\alpha(\lambda, X)H)} - \cosh \frac{H}{L(\omega)}) +}{D(\omega) (\alpha(\lambda, X)L^2(\omega) SB - D(\omega)) \cdot \sinh \frac{H}{L(\omega)}} \right] \right\} \quad (26)$$

I-9 Calcul de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction Sf0 à la jonction

$$\left. \frac{\partial j(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{\partial SB} \right|_{SB > 5.10^5} = 0 \quad (27)$$

$$Sf_0(\lambda, \omega, X) = \frac{D(\omega) \left[e^{-\alpha(X, \lambda)H} \left(\sinh \frac{H}{L(\omega)} + L(\omega) \alpha(X, \lambda) \cosh \frac{H}{L(\omega)} \right) - L(\omega) \alpha(X, \lambda) \right]}{L(\omega) \left[e^{-\alpha(X, \lambda)H} \left(-\cosh \frac{H}{L(\omega)} - L(\omega) \alpha(X, \lambda) \sinh \frac{H}{L(\omega)} \right) + 1 \right]} \quad (28)$$

I-10 Calcul de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la face arrière Sb0 à la face arrière

$$\left. \frac{\partial j(x, \lambda, \omega, SF, SB, \theta, X)}{\partial SF} \right|_{SF \geq 10^5 \text{ cm/s}} = 0 \quad (29)$$

$$SB_0(\lambda, \omega, X) = D(\omega) \cdot \frac{L(\omega)\alpha(X, \lambda) \left(e^{-\alpha(X, \lambda)H} - \cosh \frac{H}{L(\omega)} \right) + \sinh \frac{H}{L(\omega)}}{L(\omega) \left(e^{-\alpha(X, \lambda)H} - \cosh \frac{H}{L(\omega)} \right) + L(\omega)\alpha(X, \lambda) \sinh \frac{H}{L(\omega)}} \quad (30)$$

Frequency Modulation Study of a Monofacial Solar Cells Based on Copper Indium and Gallium Diselenide (CIGS) under Monochromatic Illumination: Influence of Incidence Angle and Gallium Doping

Gerome SAMBOU*, Alain Kassine EHEMBA, Mouhamadou Mamour SOCE, Amadou DIAO, Moustapha DIENG

Laboratory of Semiconductors and Solar Energy, Physics Department, Faculty of Science and Technology, - University Cheikh Anta Diop - Dakar - SENEGAL

*Corresponding author: sambougerome@yahoo.fr

Abstract In this article a frequency modulation study on a CIGS-based solar cells under the influence of incidence angle and gallium doping is made. The resolution of the minority carrier continuity equation allowed us to determine the density of minority carriers, the photocurrent density and photovoltage expressions according to modulation frequency, wavelength, incidence angle and gallium doping. Incidence angle and Gallium doping tend to decrease the performance of the solar cell by degrading its intrinsic properties.

Keywords: CIGS, frequency modulation, wavelength, incidence angle, gallium doping, photocurrent, photovoltage

Cite This Article: Gerome SAMBOU, Alain Kassine EHEMBA, Mouhamadou Mamour SOCE, Amadou DIAO, and Moustapha DIENG, "Frequency Modulation Study of a Monofacial Solar Cells Based on Copper Indium and Gallium Diselenide (CIGS) under Monochromatic Illumination: Influence of Incidence Angle and Gallium Doping." *American Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 6, no. 1 (2018): 7-11. doi: 10.12691/ajmse-6-1-2.

Study of the Diffusion Capacity of a CIGS-based Solar Cell in Dynamic Frequency Regime Under Monochromatic Illumination: Effect of Incidence Angle and Gallium Doping Rate

G erome Sambou^{1,*}, Amadou Diao², Jean Jude Domingo², Djimba Niane², Moustapha Dieng²

¹Laboratory of Semiconductors and Solar Energy, Physics Department, Faculty of Science and Technology, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal

²Physics Department, Faculty of Science and Technology, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal

Email address:

sambougerson@yahoofr.com (G. Sambou), ama_diao@yahoo.fr (A. Diao), ddomingo2001@yahoo.fr (J.-J. Domingo), djimbashie@gmail.com (D. Niane), moustaphadieng@yahoofr.fr (M. Dieng)

*Corresponding author

To cite this article:

G erome Sambou, Amadou Diao, Jean Jude Domingo, Djimba Niane, Moustapha Dieng. Study of the Diffusion Capacity of a CIGS-based Solar Cell in Dynamic Frequency Regime Under Monochromatic Illumination: Effect of Incidence Angle and Gallium Doping Rate. *American Journal of Energy Engineering*. Vol. 6, No. 4, 2018, pp. 50-56. doi: 10.11648/j.ajee.20180604.13

Received: December 5, 2018; Accepted: January 2, 2019; Published: January 28, 2019

Abstract: In this paper a study in dynamic frequency regime under monochromatic illumination was made on a CIGS-based solar cell model. After solving the continuity equation of the minority carriers, equation governing the diffusion capacitance of the solar cell are extracted. The study shows that increasing the wavelength in the visible increases the module of capacitance at a gallium doping rate $X=0.3$. On the other hand, the angle of incidence and the gallium doping rate decrease the module of diffusion capacitance. The study of the Bode diagram illustrated by the variation of the module of the capacitance and phase of the latter as a function of the logarithm of the pulsation shows the existence of two characteristic zones of the pulsation whose limit characterizes the dynamic regime. The study shows that the pulsation limiting the static regime to the dynamic regime increases with the increase of the gallium doping rate.

Keywords: CIGS, Frequency Modulation, Wavelength, Incidence Angle, Gallium Doping Rate, Capacitance, Bode Diagram



UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR :
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

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

Année : 2018 N° d'ordre :

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE : Spécialité : ÉNERGIE SOLAIRE, MATÉRIAUX ET SYSTÈMES

Présentée par : GEROME SAMBOU

Titre : Etude en régime dynamique fréquentiel d'une cellule solaire en couches minces à base de Diséléniure de Cuivre D'Indium et de Gallium $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS) sous éclairement monochromatique : effet de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium.

Soutenue publiquement le 13/ 02/ 2019 devant le jury composé de :

Président	Grégoire SISSOKO	PROFESSEUR TITULAIRE	FST /UCAD
Rapporteurs	Issa DIAGNE	MAITRE DE CONFERENCES	FST /UCAD
	Babacar DIAKHATE	MAITRE DE CONFERENCES	FST /UCAD
Membres	Amadou DIAO	MAITRE DE CONFERENCES	FST /UCAD
	Babacar Mbow	PROFESSEUR TITULAIRE	FST /UCAD
Directeur de thèse	Moustapha DIENG	PROFESSEUR TITULAIRE	FST/UCAD

Résumé

Des généralités sur les paramètres électriques, optiques et structuraux de la couche absorbante CIGS et sur les techniques et les méthodes de détermination des paramètres électriques en régime dynamique fréquentiel ont été présentées. L'étude théorique de la photopile, en régime dynamique fréquentiel, sous éclairement monochromatique est faite pour un éclairement par la face avant. Cette étude a permis d'établir, en fonction de la fréquence, de la longueur d'onde, des vitesses de recombinaison (à la jonction et en face arrière), les expressions de la densité des porteurs minoritaires, du photocourant et de la phototension. Et les effets de l'angle d'incidence et du taux de dopage au gallium sur ces paramètres ont été mis en évidence. Les caractéristiques ; densité de photocourant-phototension ont permis de déterminer les résistances shunt et série qui sont étudiées en fonction du taux de dopage au gallium et de l'angle d'incidence.

Les diagrammes de Nyquist et de Bode de l'impédance (Z), nous ont permis de proposer des modèles électriques équivalents de la photopile.

La capacité de diffusion (C) la puissance électrique, le facteur de forme et le rendement de la photopile ont été aussi déterminés et étudiés en fonction du taux de dopage au gallium et de l'angle d'incidence.

Mots clés : CIGS – Photocourant – Phototension – Impédance – Résistance série – Résistance shunt – Capacité de diffusion – Puissance – Facteur de forme – fréquence – longueur d'onde- rendement- taux de dopage au gallium- angle d'incidence-pulsation.