

UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mention : Physique et Applications

Mémoire de MASTER

Spécialité : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

Option : Énergie Solaire et Bioénergie

Sujet :

Modélisation et Optimisation d'une photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel

Présenté et soutenu publiquement par : Mamadou FAYE le 11/01/2023

Nom Prénom	Grade	Qualité	Établissement
NDIAYE Lat Grand	Professeur Titulaire	Président de jury	UFR-ST, UASZ
TINE Modou	Maître de conférences Assimilé	Rapporteur	UFR-ST, UASZ
THIAO Serigne	Maître de conférences Titulaire	Examineur	UFR-ST, UASZ
CAMARA Moussa	Docteur, Assistant vacataire	Invité	UFR-ST, UASZ
THIAME Moustapha	Professeur Assimilé	Encadrant	UFR-ST, UASZ

Dédicace

A vous mes parents, les quelques mots que je relate ne sauront jamais décrire ma reconnaissance envers vous. L'éducation, l'affection et votre bienveillance nous guident et vos présences à nos côtés ont toujours été une force pour affronter les différents obstacles de la vie.

Je vous dédie ce modeste travail et voyez-le comme le fruit de vos temps d'années de sacrifice envers moi.

Jamais je ne pourrais vous remercier comme il se doit.

Que Dieu vous protège et vous prête longue vie.

Je dédie ce travail :

A mes frères, mes grands-parents et à Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A mon tuteur ainsi que tous les membres de sa famille.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plein de succès.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Remerciement

Avant tout nous rendons grâce à Dieu le très haut, maître de l'univers, le miséricordieux de nous avoir accordé la santé, le courage et la force dans nos chantiers. Nous prions également sur notre bien aimé le prophète **Mouhamed** paix et salut sur lui.

Je ne saurais au terme de ce travail m'empêcher d'adresser ma profonde gratitude à tous les membres de ma famille, mes parents pour leurs soutiens sans faille.

Je tiens à remercier à travers ces quelques lignes les nombreuses personnes qui ont contribuées de près ou de loin au succès de mes années d'études universitaires et qui, par la confiance, la patience et l'amitié qu'ils ont manifestées à mon égard, m'ont permis d'apprécier pleinement ces années passées à Ziguinchor. Je m'excuse par avance auprès de ceux que j'oublierai de citer ou que je ne pourrai évoquer explicitement dans ce paragraphe, et je leur réaffirme par ailleurs ma reconnaissance.

J'exprime ma gratitude envers mon encadreur Monsieur **Moustapha THIAME**, ses conseils et ses encouragements ont permis à ce modeste travail d'aboutir. Ses capacités scientifiques et ses compétences étaient pour moi un grand support. Faire mon projet de mémoire sous sa direction était pour moi un grand honneur et un immense plaisir.

Je dois aussi une grande partie de mon travail à monsieur **Moussa CAMARA**. Ses conseils m'ont aidé à surmonter beaucoup de difficultés. Je le remercie chaleureusement pour sa gentillesse, sa patience et sa disponibilité.

Mes remerciements vont aussi à tous les autres membres du jury à commencer par le président Monsieur **Lat Grand NDIAYE**, le rapporteurs Monsieur **Modou TINE** et l'examineur Monsieur **Serigne THIAO**.

Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et l'enrichir par leurs propositions.

Enfin je ne peux pas oublier mon tuteur Monsieur **Abdoulaye Diome** et **sa famille**, merci de m'avoir accueilli chez vous durant toute mon cursus universitaire ainsi que toute la gratitude que vous avez témoignée à mon égard. Merci du fond du cœur.

Mention spéciale à mes **camarades** de promotions avec qui nous avons cheminé ensemble durant cette formation.

Résumé

Les alliages $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ont récemment émergé en tant que matériaux prometteurs pour les cellules solaires photovoltaïques, en raison de leur bande interdite directe qui couvre quasiment la totalité du spectre solaire, tout en présentant une forte absorption optique d'environ 10^5 cm^{-1} près de la bande interdite.

Dans ce travail il a été question de faire une modélisation et optimisation d'une photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel.

D'abord nous avons élaboré un modèle mathématique de la photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dans le but d'étudier son comportement, lorsqu'elle est soumise à un éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel.

Ensuite nous avons simulé les différents paramètres électriques de la photopile dans le but de mettre en évidence l'effet de la fréquence de modulation, de la fraction d'indium, de la longueur d'onde en fonction de la profondeur de la base, de la vitesse de recombinaison de la face avant et de la fréquence sur les différents paramètres électriques de la photopiles (coefficient de diffusion, densité de photocourant, phototension etc.).

Nous avons fait une analyse des résultats obtenus de la simulation et il en ressort que l'élévation de la fréquence de modulation a un effet négatif sur la diffusion des charges photogénérées provoquant ainsi une grande concentration des porteurs de charges minoritaires dans la base et une diminution de la densité de photocourant. De même que l'augmentation de la fraction d'indium dans l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, de la fréquence et de la longueur d'onde ont un effet négatif pour certains paramètres électriques tel que : la densité de photocourant, la phototension, le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert de la photopile et positive sur d'autre comme la résistance shunt.

Enfin nous avons fait une optimisation en simulant le rendement de la photopile en fonction de la fraction d'indium x pour différentes valeurs de la fréquence. Cela nous a permis d'obtenir pour une fréquence d'éclairage allant de 0 à 10^7 rad/s , les valeurs optimales de la fraction d'indium qui sont respectivement $x_{\text{opt}} = 0,28$ et $0,26$ pour des longueurs d'ondes respectives λ égal à $0,5 \mu\text{m}$ et $0,9 \mu\text{m}$ avec des rendements optimaux respectives η égal à $28,7\%$ et $26,6\%$.

Mots clés : modélisation, optimisation, photopile, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, régime dynamique fréquentiel, éclairage monochromatique

Abstract

In_xGa_{1-x}N alloys have recently emerged as promising materials for photovoltaic solar cells, due to their direct bandgap that spans virtually the entire solar spectrum, while exhibiting strong optical absorption of around 10^5 cm^{-1} near of the forbidden band.

In this work, it was a question of modeling and optimizing a solar cell based on In_xGa_{1-x}N under monochromatic illumination in a dynamic frequency regime.

First, we developed a mathematical model of the solar cell based on In_xGa_{1-x}N in order to study its behavior when subjected to monochromatic illumination in a dynamic frequency regime.

Then, we simulated the different electrical parameters of the solar cell in order to highlight the effect of the modulation frequency, the fraction of indium, the wavelength according to the depth of the base, the recombination speed of the front face and the frequency on the various electrical parameters of the solar cell (diffusion coefficient, photocurrent density, photovoltage, etc.).

We have made an analysis of the results obtained from the simulation and it appears that raising the modulation frequency has a negative effect on the diffusion of the photogenerated charges, thus causing a large concentration of minority charge carriers in the base and a decrease in the photocurrent density. As the increase of the indium fraction in the In_xGa_{1-x}N alloy, the frequency and the wavelength have a negative effect for certain electrical parameters such as: the photocurrent density, the photovoltage, the short circuit current, the open circuit voltage of the solar cell and positive on the other like the shunt resistor.

Finally, we optimized the efficiency of the solar cell as a function of the indium fraction x for different values of the frequency. This allowed us to obtain for an illumination frequency ranging from 0 to 10^7 rad/s , the optimal values of the indium fraction which are respectively $x_{\text{opt}} = 0.28$ and 0.26 for respective wavelengths λ equal to $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ and $0.9 \text{ }\mu\text{m}$ with respective optimal yields η equal to 28.7% and 26.6% .

Keywords: modeling, optimization, Solar cell, In_xGa_{1-x}N, frequency dynamic regime, monochromatic illumination

LISTE DES FIGURES

Figure (I-1): Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure (I-2) : Semi-conducteur de type n	10
Figure (I-3): Semi-conducteur de type p	10
Figure (I-4): Jonction p-n d'une cellule solaire.....	11
Figure (I-5): Niveaux d'énergie au voisinage de la jonction	11
Figure (I-6): Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque	12
Figure (I-7): Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	14
Figure (I-8): Structures cristallines et séquences d'empilement des plans cristallins du GaN	15
Figure (I-9): Courbes d'absorption de couches d'InGaN élaborées avec différentes composition	17
Figure (I-10): Schéma de la structure PIN homojonction étudiée par Doolittle et al.	19
Figure (I-11): Schéma de la cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al.....	19
Figure (I-12): Cellule solaire au silicium à jonction verticale	21
Figure (II-13): (a) Module de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'ondes, (b) Phase de la capacitance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde.....	22
Figure (II-1): Présentation de la photopile à base $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ soumis à un éclairage uniforme	26
Figure (II-2): Circuit électriques équivalent d'une photopile fonctionnant en circuit ouvert...	32
Figure (II-3): Circuit électriques équivalent d'une photopile fonctionnant en court-circuit ...	33
Figure (III-1): Interface du logiciel Mathcad	37
Figure (III-2): Coefficient de diffusion en fonction du logarithme de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la fraction d'indium(x).	38
Figure (III-3): Coefficient de diffusion en fonction du logarithme de la fréquence de modulation pour différentes valeurs de la fraction d'indium(x).....	38
Figure (III-4): Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la pulsation ω (rad/s) ($S_b= 2.10^2\text{cm/s}$, $x= 0,3$, $H=3\mu\text{m}$, $\lambda= 0,5\mu\text{m}$)	39
Figure (III-5): Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($\omega=10^5$ rad/s $H=3\mu\text{m}$, $S_b=2.10^2$, $H=3\mu\text{m}$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$)	40
Figure (III-6): Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($\omega=10^5$ rad/s $H= 3\mu\text{m}$, $S_b= 2.10^2\text{cm/s}$ $x= 0,3$)	40

Figure (III-7): Densité de photocourant en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la fraction d'indium x ($H=3\mu\text{m}$, $S_b= S_f= 2.10^2\text{cm/s}$, $\lambda= 0,5\mu\text{m}$)	41
Figure (III-8): Densité de la photocourant en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la longueur d'onde λ ($H=3\mu\text{m}$, $S_b= S_f= 2.10^2\text{ cm/s}$, $x= 0,3$).....	42
Figure (III-9): Courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($S_b= S_f= 2.10^2\text{ cm/s}$, $x= 0,3$ $\lambda= 0,9\mu\text{m}$).....	43
Figure (III-10): Courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($S_f= 2.10^2\text{cm/s}$, $\lambda= 0,9\mu\text{m}$, $\omega= 10^5\text{ rad/s}$).....	43
Figure (III-11): Courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f= 3.10^3\text{ cm/s}$, $S_b= 2.10^2\text{ cm/s}$, $x= 0,3$, $\omega=10^5\text{ rad/s}$)	44
Figure (III-12): Phototension en circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($S_f= 3.10^3\text{ cm/s}$, $S_b= 2.10^2\text{cm/s}$, $x=0,3$, $\lambda=0,9\mu\text{m}$)...	45
Figure (III-13): Phototension en circuit ouvert en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($S_f= 3.10^3\text{ cm/s}$, $S_b= 2.10^2\text{cm/s}$, $\lambda= 0,9\mu\text{m}$, $\omega= 10^5\text{ rad/s}$) ...	45
Figure (III-14): Phototension en circuit ouvert en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f= 3.10^3\text{ cm/s}$, $S_b= 2.10^2\text{cm/s}$, $x= 0,3$, $\omega= 10^5\text{ rad/s}$)	46
Figure (III-15): Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la fréquence ($S_b= 2.10^2\text{cm/s}$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $\omega=2.10^5\text{rad/s}$, $x=0,3$).....	47
Figure (III-16): Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($S_b= 2.10^2\text{ cm/s}$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $\omega=2.10^5\text{rad/s}$)	47
Figure (III-17): Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_b=2.10^2\text{ cm/s}$, $x=0,3$, $\omega=2.10^5\text{ rad/s}$).....	48
Figure (III-18): La puissance en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($H=3\mu\text{m}$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $x=0,3$, $S_b=2.10^2\text{cm/s}$).....	49
Figure (III-19): La puissance en fonction de phototension pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($H=3\mu\text{m}$ $x=0,3$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $x=0,3$, $S_b=2.10^2\text{cm/s}$).....	50
Figure (III-20): Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($H=3\mu\text{m}$ $x=0,3$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$).....	51
Figure (III-21): Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($H=3\mu\text{m}$, $x=0,3$, $\omega=9.10^5\text{rad/s}$).....	51
Figure (III-22): Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($H=3\mu\text{m}$, $x=0,3$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $\omega=9.10^5\text{rad/s}$).....	52
Figure (III-23): Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la fraction d'indium x ($H=3\mu\text{m}$ $x=0,3$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $\omega= 10^5\text{rad/s}$).....	53

Figure (III-24): Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($H=3\mu\text{m}$, $x=0,3$, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $\omega=10^5\text{rad/s}$, $S_b=2.10^2\text{ cm/s}$)..... 54

Figure (III-25): Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la fréquence de modulation..... 55

Figure (III-26): La capacité de diffusion en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la fraction d'indium x ($\lambda=0.5\mu\text{m}$, $H=3\mu\text{m}$, $S_b=S_f=2.10^2\text{cm/s}$, $x=0,3$)56

Figure (III-27): La capacité de diffusion en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la Longueur d'onde λ ($H=3\mu\text{m}$, $S_b=S_f=2.10^2\text{cm/s}$, $x=0,3$) 56

Figure (III-28) : Le rendement de la photopile en fonction de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence ($\lambda = 0.5\mu\text{m}$, $H = 3\mu\text{m}$, $S_f = 6.10^6\text{cm/s}$, $S_b = 2.10^2\text{cm/s}$)....58

Figure (III-29) : Le rendement de la photopile en fonction de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence ($\lambda = 0.9\mu\text{m}$, $H=3\mu\text{m}$, $S_f = 6.10^6\text{cm/s}$, $S_b = 2.10^2\text{cm/s}$)...58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (II-1): Résumé de l'état de l'art de cellule solaire à base d'InGaN	20
Tableau (III-1) : Valeurs optimale de la photopile pour $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$	59
Tableau (III-2) : Valeurs optimale de la photopile pour $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$	59

NOMENCLATURE

Symboles	Désignations	Unités
$D(\omega)$	Coefficient de diffusion complexe des porteurs dans la base	$\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$
ω	Fréquence angulaire	rad. s^{-1}
S_f	La vitesse de recombinaison à la jonction	cm/s
S_b	La vitesse de recombinaison à la face arrière	cm/s
z	Profondeur dans la base de la photopile	cm
R_{sh}	Résistance shunt	$\Omega.\text{cm}^{-3}$
$R_{sh_{opt}}$	Résistance shunt optimale	$\Omega.\text{cm}^{-3}$
R_s	Résistance série	$\Omega.\text{cm}^{-2}$
$R_{s_{opt}}$	Résistance série optimale	$\Omega.\text{cm}^{-2}$
$L(\omega)$	Longueur de diffusion complexe des porteurs dans la base	cm
n_i	Concentration intrinsèque du matériau $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	cm^{-3}
N_b	Taux de dopage des impuretés dans la base	cm^{-3}
q	Charge élémentaire de l'électron	C
T	Température	K
τ	Durée de vie moyenne des porteurs minoritaires dans la base	s
t	Temps	s
$\delta(z,t)$	Densité des porteurs minoritaires en fonction de la base et du temps	cm^{-3}
V_{ph}	Phototension	V
V_{co}	Phototension en circuit ouvert	V
$V_{co_{opt}}$	Phototension en circuit ouvert optimale	V
J_{ph}	Densité de photocourant	A/cm^2
J_{cc}	Courant de court-circuit	A
$J_{cc_{opt}}$	Densité de courant de court-circuit optimal	A/cm^2
V_T	Tension thermique	V
K_B	Constante de boltzman	J. K^{-1}
$G(z,t)$	Taux de génération en fonction de la profondeur de la base z et du temps	$\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$
In	Indium	
Ga	Gallium	
N	Nitride	
InGaN	Nitride de Gallium Indium	
AM 1,5	Spectre solaire standard	

TABLE DES MATIERES

Dédicace.....	i
Remerciement.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Liste des Figures.....	v
Liste des tableaux.....	v
Nomenclature.....	vi
INTRODUCTION GENERALE :	2
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
INTRODUCTION :.....	6
I.1 GENERALITE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :	6
I.1.1 Historique de l'effet photovoltaïque	6
I.2 LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	8
I.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule.....	8
I.2.2 La jonction PN	9
I.2.3 Architecture d'une cellule solaire	11
I.3 DEFINITION DES PARAMETRES PHOTOVOLTAÏQUES :	12
I.3.1 Courant de court-circuit, I_{cc}	13
I.3.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}	13
I.3.3 Facteur de forme, FF	13
I.3.4 La puissance maximale d'une cellule.....	13
I.3.5 Rendement de conversion, η	14
I.4 LE NITRURE DE GALLIUM INDIUM (INGAN) :	15
I.4.1 Les propriétés structurales :.....	15
I.4.2 Les propriétés optiques du matériau :	16
I.4.2 Les propriétés électriques :.....	17
I.4.3 Cellules solaires à base d'InGaN	18
I.4.4 Quelques travaux sur la modélisation et la simulation des cellules solaires en régime dynamique fréquentiel :.....	20
CONCLUSION :	24

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA PHOTODIODE A BASE D'IN _x GA _{1-x} N.....	25
INTRODUCTION :.....	26
II.1 PHOTODIODE A BASE D'IN _x GA _{1-x} N.....	26
II.2 DETERMINATION DES PARAMETRES :.....	27
II.2.1 Les paramètres optiques :.....	27
II.2.2 PARAMETRES ELECTRONIQUES:.....	27
II.3 MODELE MATHEMATIQUE :	28
II.3.1 Equation de continuité.....	28
II.3.2 Le taux de génération :	28
II.3.3 Le coefficient de diffusion :	29
II.3.4 Solution de l'équation de continuité :	29
II.3.5 Détermination des coefficients A et B	29
II.4 LA DENSITE DE PHOTOCOURANT ET LA PHOTOTENSION :.....	31
II.4.1 La densité de photocourant :	31
II.5.2 La phototension :.....	31
II.5.3 Photocourant de court-circuit :	31
II.5.4 Tension en circuit ouvert :.....	31
II.5.5 Le courant de diode et de la puissance :.....	32
II.5.6 La résistance Série et Shunt :	32
II.5.7 Détermination de la Capacité de diffusion :.....	34
CONCLUSION :.....	34
CHAPITRE III : SIMULATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.....	35
INTRODUCTION :.....	36
III.1 PRESENTATION DU LOGICIEL MATHCAD :	37
III.2 PROFIL DU COEFFICIENT DE DIFFUSION EN FONCTION DU LOGARITHME DE LA FREQUENCE :	38
III.3 ETUDE DES PARAMETRES ELECTRIQUES :	39
III.3.1 Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison Sf :	39
III.3.2 Etude de photocourant de court-circuit	42
III.3.3 Etude de la phototension en circuit-ouvert.....	45
III.3.4 Etude de la Caractéristique Courant-tension :.....	46
III.3.5 Effet de la fréquence de modulation sur la Puissance :.....	49

III.3.6 La puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la fraction d'indium	50
III.3.7 Profil de la résistance série et la résistance shunt :.....	51
III.3.8 Etude de la résistance shunt	52
III.3.9 Effet de la fréquence de modulation sur la capacité de diffusion :	55
III.3.10 Etude de la capacité de diffusion	56
III.4 LA METHODOLOGIE D'OPTIMISATION :	57
III.4.1 Optimisation de la photopile à base $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$:.....	57
CONCLUSION	59
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	61
BIBLIOGRAPHIES:	63

INTRODUCTION GENERALE :

Introduction générale :

Nous avons assisté à ces dernières décennies aux phénomènes de réchauffement climatique qui ont engendré des conséquences désastreuses sur la terre. Ces phénomènes ont trainé la planète dans l'instabilité climatique accompagnée par des catastrophes naturelles (la température élevée, les tremblements de terre, les inondations etc.). Cette perturbation du climat ou « l'effet de serre » est dû en partie à la quantité importante de CO₂ émise dans l'atmosphère avec essentiellement l'utilisation des énergies fossiles.

En effet, la consommation mondiale d'énergie est très majoritairement assurée par les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), polluants en dioxyde de carbone (CO₂). Ces derniers assurent près de 85% de la consommation mondiale en énergie. Les énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque) assurent, quant à eux, environ 3% de la consommation mondiale [1]. Afin de parvenir à une énergie moins polluante, la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique devrait considérablement augmenter. D'énormes efforts sont donc actuellement entrepris à l'échelle mondiale pour le développement de ces énergies renouvelables dites également "propres".

Dans le secteur du photovoltaïque, les attentes sont nombreuses : augmentation de l'efficacité de conversion, diminution des coûts de production, diminution de l'impact environnemental, etc. Actuellement, la filière est largement dominée par la technologie silicium cristallin avec près de 93% de la production mondiale en 2016 [2]. Cependant, la production des cellules solaires à base de silicium reste coûteuse et nécessite une importante quantité de matériaux. En outre, les cellules en silicium présentent actuellement en laboratoire, un rendement maximal de 25,6% [3], ce qui est très proche de la limite théorique maximale pour une cellule simple jonction [4]. Par conséquent, le besoin grandissant d'énergie photovoltaïque a poussé les travaux de recherche sur l'utilisation d'autres matériaux alternatifs, bien que cela ne signifie nullement l'arrêt des recherches dans la filière silicium. Aujourd'hui, ces recherches, très nombreuses et variées, se focalisent principalement sur les technologies à couches minces. Parmi ces technologies, on trouve notamment, celle à base de matériaux III-V, très prometteuse en termes d'efficacité. Les alliages InGaN ont une bande interdite directe et variable de 3,42 eV à 0,76 eV qui couvre la totalité du spectre solaire. Ils ont un coefficient d'absorption très élevé (10^5 cm^{-1}) de sorte que quelques centaines de nanomètres d'épaisseur sont suffisantes pour l'absorption de la majorité de la lumière incidente. Cet alliage a commencé à émerger comme un matériau prometteur pour les applications PV après ses développements considérables pour les diodes électroluminescentes (DEL) blues[5].

Dans l'optique de contribuer à l'optimisation des paramètres électriques des cellules solaires à base d'InGaN, ce travail de mémoire propose une modélisation et une optimisation d'une photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel. Ainsi un modèle mathématique permettant d'obtenir les différents paramètres de la photopile sera proposée. Ensuite les différents paramètres électriques de la photopile seront simulés afin de visualiser et interpréter la variation des différents paramètres électriques.

Et enfin grâce à la simulation nous allons proposer une méthode d'optimisation dans le but d'avoir les meilleures performances de la photopile.

Ce manuscrit est décomposé en trois chapitres, comme suit :

Le premier chapitre aborde les généralités sur les cellules solaires photovoltaïque en présentant en premier lieu l'histoire du photovoltaïque de 1839 à nos jours, dans la perspective d'avoir un aperçu sur l'évolution de la technologie photovoltaïque au cours de ses années.

En second lieu des notions essentielles sur la physique des cellules photovoltaïques ont été abordées, en commençant par le principe de fonctionnement des photopiles, de la jonction PN, l'architecture d'une cellule solaire afin de comprendre la manière dont les cellules solaires sont conçues, ainsi que les différents paramètres électriques y sont également abordés.

Et dernier lieu nous avons présenté les paramètres du nitrure de Gallium indium (InGaN) avec ses diverses propriétés (structurale, optique et électrique), un résumé sur l'état de l'art des cellules solaires photovoltaïque à base d'InGaN et quelques travaux sur la modélisation d'une photopile en régime dynamique fréquentiel.

Dans le deuxième chapitre nous y proposons un modèle mathématique de la photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dans le but de pouvoir étudier le comportement de celle-ci en régime dynamique fréquentiel lorsqu'elle est soumise à un éclairage monochromatique.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation et la discussion des résultats obtenues grâce au modèle établie dans le deuxième chapitre. A partir de la simulation numérique nous avons proposé une méthode d'optimisation dans l'optique d'avoir les meilleures performances de la photopile

Enfin une conclusion générale qui résume le travail réalisé ainsi que des perspectives mettront fin à ce manuscrit.

Chapitre I : Etude Bibliographique

Introduction :

Réacteur à fusion nucléaire fonctionnant depuis 5 milliards d'années, le soleil libère d'énormes quantités d'énergies qui, après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres atteignent la surface de la Terre avec une puissance moyenne d'environ **1.000 W/m²**[1]. Au final, l'énergie solaire qui frappe la Terre est 10.000 fois supérieure à la demande énergétique globale de la population et selon les astronomes cela durera encore 5 autres milliards d'années. [6].

Le principe du photovoltaïque consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle emploie pour ce faire des modules ou panneaux photovoltaïques, composés de cellules solaires ou photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques, donc du courant, dans un circuit extérieur.

Récemment, diverses études sur les cellules solaires utilisant des semi-conducteurs au nitrure III dans les applications photovoltaïques ont été réalisées. Parmi eux, l'alliage InGaN est un candidat prometteur pour les applications photovoltaïques car il présente des propriétés photovoltaïques attrayantes telles qu'une tolérance élevée au rayonnement, une mobilité et un coefficient d'absorption élevés permettant à des couches plus minces de matériau d'absorber la majeure partie du spectre solaire [7]. De plus, l'avantage le plus important de l'alliage InGaN pourrait être l'énergie directe de la bande interdite qui peut être ajustée en fonction de la composition de l'indium. Ainsi, la bande interdite d'énergie de l'InGaN peut être ajustée de 0,7 eV à 3,42 eV[5], couvrant approximativement le spectre solaire total.

En fait, il est possible d'avoir une bande interdite d'énergie différente en changeant la fraction d'indium nommée par x dans ce type de cellule solaire ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) pour avoir un bon rendement[5].

I.1 Généralité sur les cellules photovoltaïques :

I.1.1 Historique de l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence par Antoine Becquerel en 1839 mais c'est seulement à partir de la 2ème moitié du 20ème siècle que l'on a réellement commencé à développer cette découverte.

- En 1839, Antoine-César Becquerel constate l'effet électrique que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique.
- En 1873 Willoughby Smith découvre la photoconductivité du sélénium, et en 1877 W.G. Adams et R.E. Day développe une jonction solide à base de sélénium dont le rendement était de l'ordre de 1%. Mais la recherche n'apportait plus rien pendant longtemps.
- En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

En 1940, Alder, reprenant une idée émise par Garrison en 1923, étudia la tension de circuit ouvert d'une pile et sa variation en fonction de l'intensité d'illumination, le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

🚩 1954-2000 : La conquête du photovoltaïque

- En 1954, les laboratoires Bell présentent la première cellule photovoltaïque qui alimente des appareils électriques domestiques.
- Dès 1958, Vanguard I est le premier satellite alimenté en énergie par des panneaux photovoltaïques.
- Durant les années 1960, l'usage du photovoltaïque pour les satellites se généralise. Embarqués à bord des lanceurs puis déployés en orbite autour de la terre, les panneaux photovoltaïques démontrent leur robustesse et leur fiabilité.
- A partir des années 1970, les panneaux photovoltaïques se développent sur des applications terrestres et maritimes. Ils permettent de fournir de l'énergie à des sites isolés qui ne sont pas desservis par un réseau électrique comme les balises en pleine mer ou les relais de télécommunication en plein désert.
- Le premier bâtiment alimenté uniquement par l'énergie solaire voit le jour à Albuquerque au Nouveau Mexique en 1974. Ce qui semblait impensable est devenu une réalité : l'énergie solaire peut répondre à l'intégralité des besoins énergétiques d'un bâtiment.

✚ 2000 à 2012 L'industrialisation du photovoltaïque

Après la signature des accords de Kyoto en 1997, des réflexions sont menées dans les grands pays développés pour trouver des solutions concrètes au problème d'émission de gaz à effet de serre. Il s'agit notamment de réduire notre consommation aux énergies fossiles. Le solaire photovoltaïque est identifié comme l'une des technologies les plus prometteuses. Afin de compenser son coût encore élevé, des mécanismes d'incitations financières sont mis en place au Japon et en Allemagne dès l'année 2000 puis progressivement dans la plupart des grands pays développés.

Ces incitations passent souvent par le principe du « tarif d'achat » : l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est achetée à un prix fixe et supérieur à celui du marché pendant une durée suffisante pour assurer la rentabilité de l'investissement. C'est le début du développement du solaire raccordé au réseau.

Dès lors le nombre de panneaux solaires en production dans le monde a été multiplié par 2500 entre 1996 et 2016. Cette croissance exponentielle du marché mondial a favorisé l'apparition de nouveaux fabricants et a conduit à des investissements massifs en recherche et développement. Ces efforts ont permis d'améliorer le rendement des panneaux et d'optimiser les procédés de fabrication. En parallèle, la taille moyenne des unités de fabrication de panneaux photovoltaïques a été multipliée par 1000.

Les économies d'échelle obtenues ont été considérables. Cette phase intensive d'industrialisation a permis de diviser par 8 le coût de production des panneaux photovoltaïques entre 2000 et 2012. [7]

I.2 La cellule photovoltaïque

I.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s. Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au

soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons.

Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface (figure I-1).

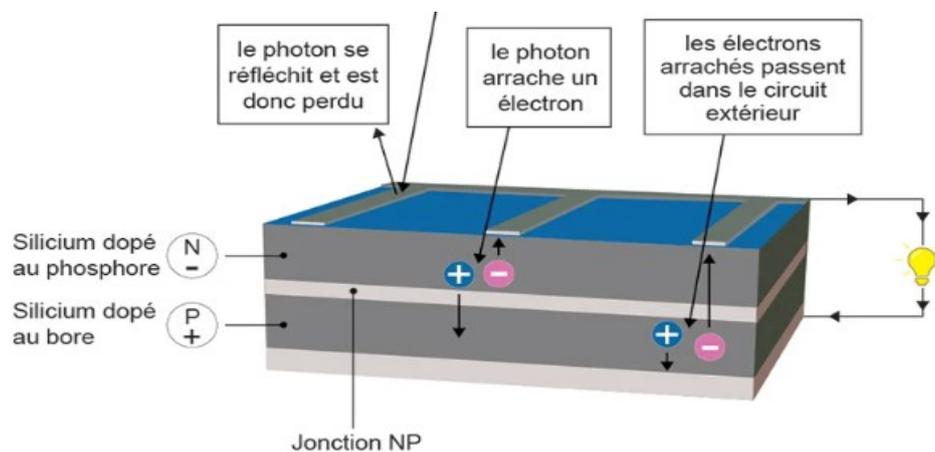
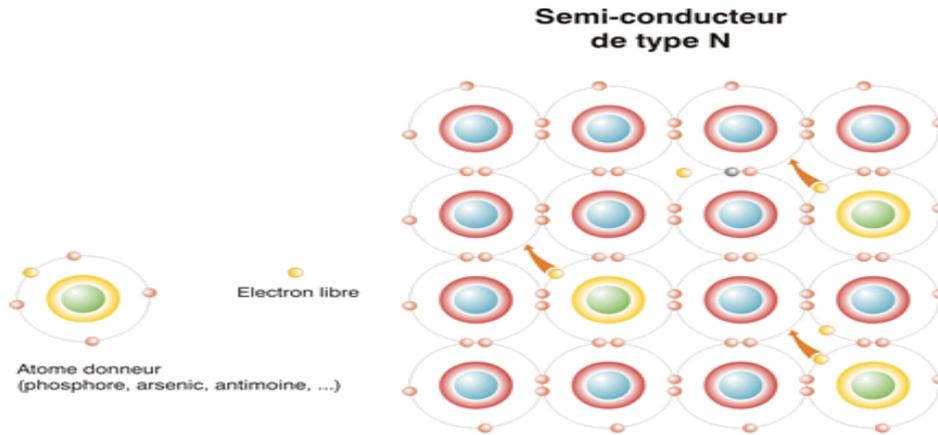


Figure (I-1) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8]

I.2.2 La jonction PN

Il est possible d'augmenter la conductibilité d'un semi-conducteur par un procédé chimique, appelé dopage, qui consiste à insérer des impuretés dans le semi-conducteur. On réalise ainsi des semi-conducteurs de type n et des semi-conducteurs de type p. Pour obtenir un matériau de type n, on dope le matériau semi-conducteur (généralement du silicium) avec un élément de valence supérieure (possédant plus d'électrons que le semi-conducteur), comme le phosphore, afin d'ajouter des électrons à la bande de conduction. La conduction est alors assurée par le déplacement de ces électrons (figure I-2).



Figure(I-2) : Semi-conducteur de type n [7]

Pour obtenir un matériau de type p, on dope le matériau semi-conducteur par un élément de valence moins importante, comme le Bore, afin de diminuer le nombre d'électrons de la bande de valence. La conduction est alors assurée par le déplacement de porteurs chargés positivement (trous correspondant au manque d'électrons) (figure I-3).

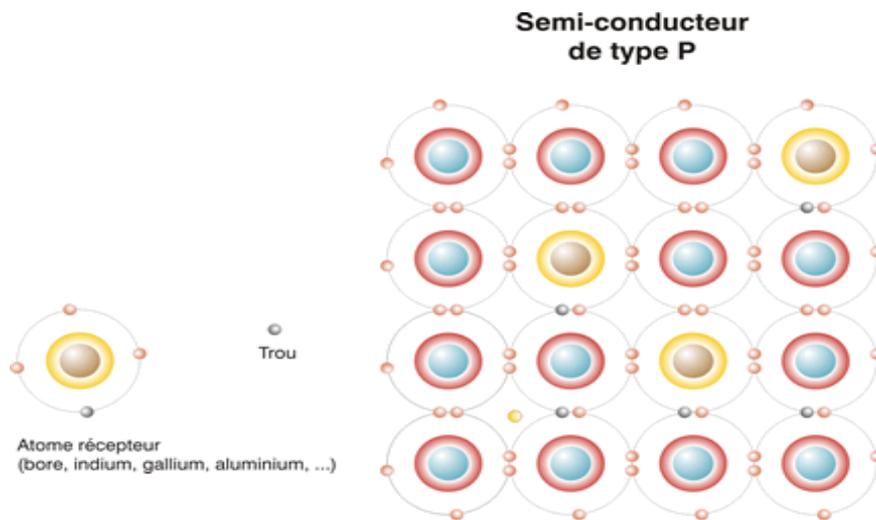


Figure (I-3): Semi-conducteur de type p [7]

Une diode électroluminescente ou une cellule solaire photovoltaïque est composée d'une jonction p-n, la couche supérieure étant un matériau de type n et la couche inférieure de type p. Pour fabriquer ces jonctions, on effectue un traitement de surface pour déposer un semi-conducteur de type n sur la surface externe d'un matériau de type p (figure I-4).

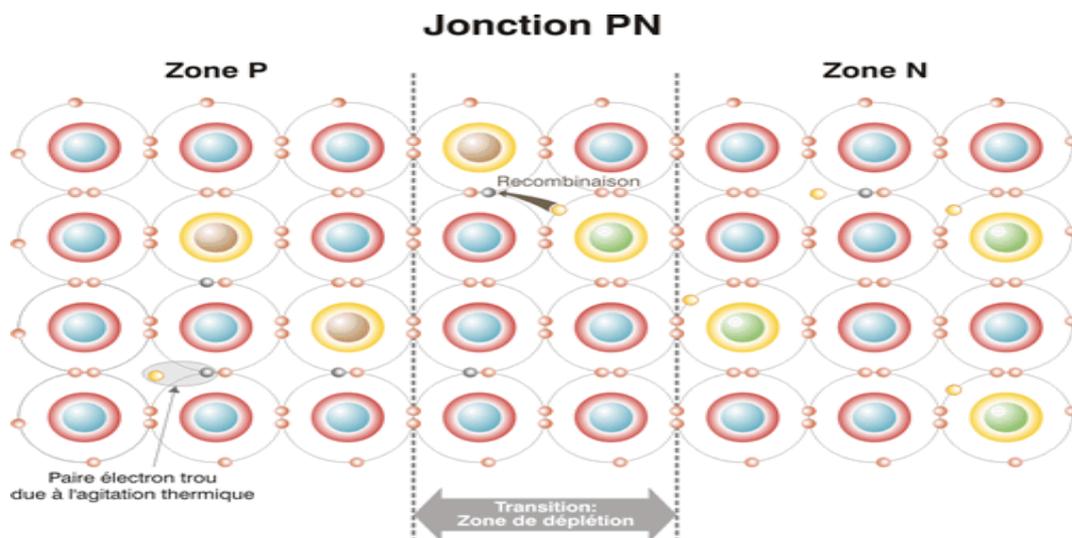


Figure (I-4) : Jonction p-n d'une cellule solaire [9]

La mise en contact de ces matériaux génère une barrière de potentiel à la base du champ électrique permanent. Cette barrière, appelée zone de déplétion, est formée par recombinaison du surplus de trous et d'électrons des zones p et n remise en contact. La figure I-5 suivant représente les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction :

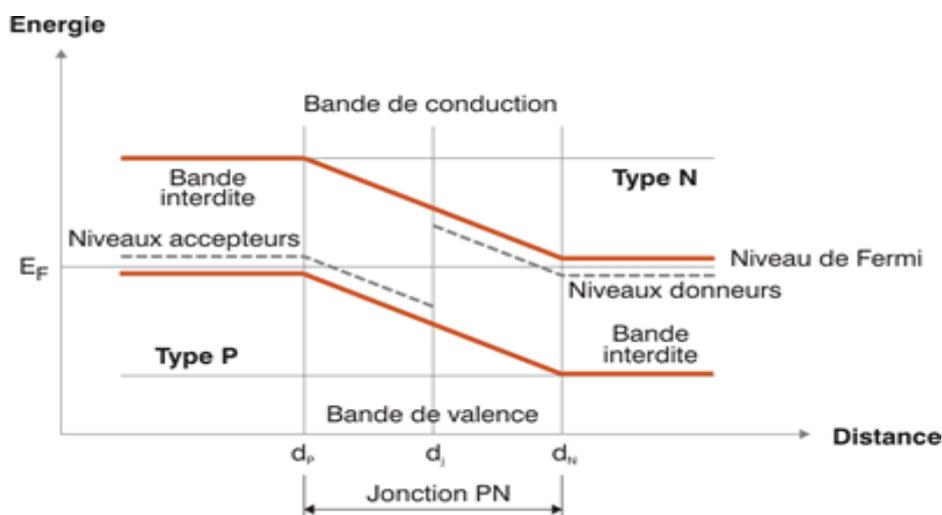


Figure (I-5) : Niveaux d'énergie au voisinage de la jonction [8]

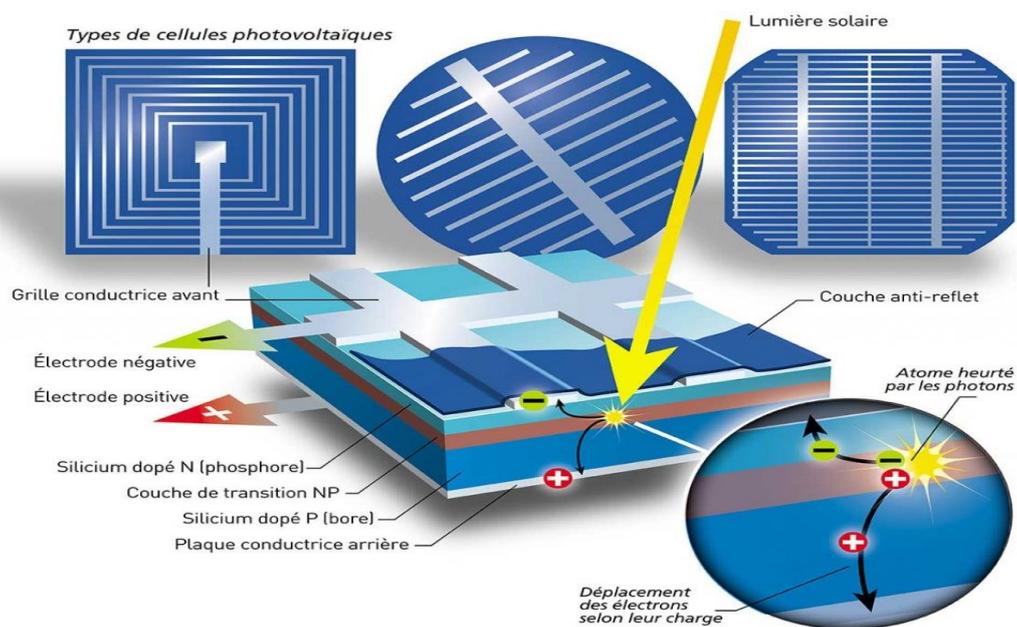
Si la température d'une telle jonction augmente, les électrons rempliront progressivement tous les états d'énergie, annulant la bande interdite et par là, l'effet de la jonction p-n.

I.2.3 Architecture d'une cellule solaire

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un

déplacement de charges, positives et négatives. La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu. De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux :

- La couche active ou l'absorbeur constituée d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur ;
- Les contacts métalliques avant et arrière constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré ;
- Des couches supplémentaires comme un anti-reflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans les matériaux etc. (figure I-6).



Figure(I-6): Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [6]

I.3 Définition des paramètres photovoltaïques :

Les principales grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc}

- La tension en circuit ouvert V_{co}
- Le facteur de forme FF
- Puissance maximale d'une cellule
- Le rendement de conversion d'énergie η
- La réponse spectrale

I.3.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

À l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place le photogénérateur en court-circuit, il débite son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre. On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit.

I.3.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite tension de circuit ouvert V_{co} ou tension à vide, on la mesure à l'aide d'un voltmètre Cette tension est de l'ordre de 0,7 V pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairement).

I.3.3 Facteur de forme, FF

Il peut être défini comme étant la puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée $P_m = P_{max}$) pour un point de fonctionnement P_m ($I_m = I_{max}$, $V_m = V_{max}$) de la courbe courant-tension[9].

Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I-1)$$

I.3.4 La puissance maximale d'une cellule

Une cellule PV possède un point pour lequel sa puissance débitée est maximum. Ce point est tangent à une courbe d'isopuissance. On la nomme P_{max} la puissance crête d'une cellule PV

Dans le cas d'utilisation de photopiles avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une photopile, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :

- ✓ Éclairement solaire de 1 kW / m²

- ✓ Température de la cellule PV égale à + 25 °C.
- ✓ Répartition spectrale du rayonnement dit AM.1,5

I.3.5 Rendement de conversion, η

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} [9] \quad (I-2)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert $P_m = 0, I = 0, V = V_{co}$ ou en court-circuit $R_c = 0, I = I_{cc}, V = 0$, aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée $P_m = P_{max}$.

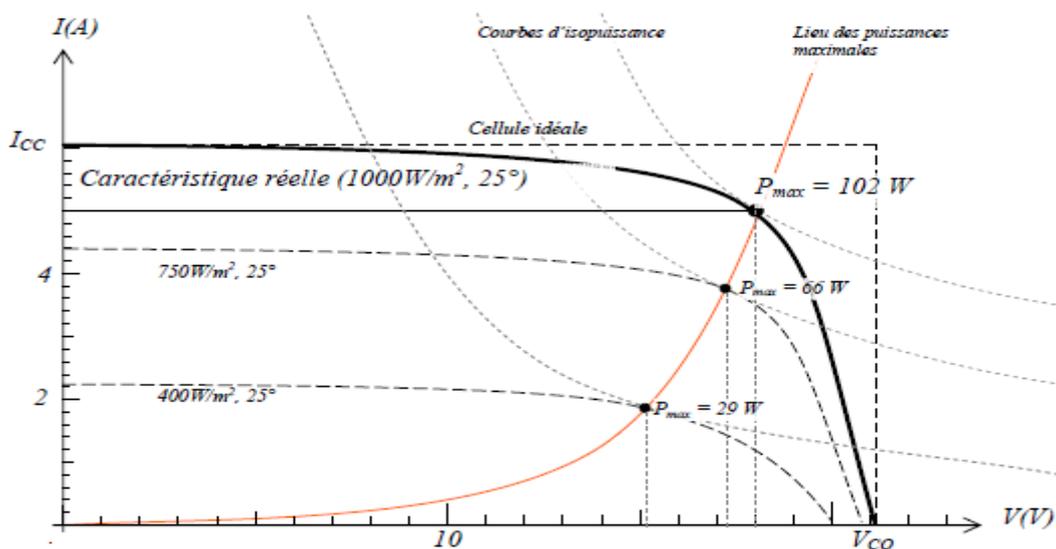


Figure (I-7): Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [8]

NB : La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule. Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données. En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement. Si par exemple la température de la surface évolue, la courbe n'est plus la même.

I.4 Le nitride de Gallium indium (InGaN) :

I.4.1 Les propriétés structurales :

La structure cristallographique :

Les nitrides-III cristallisent principalement dans la structure zinc-blende ou wurtzite. La structure zinc-blende est une structure cubique alors que la structure wurtzite est une structure hexagonale [10]. Ces deux types de structure sont constitués de deux sous réseaux interpénétrés, l'un étant formé par des cations d'éléments III (B^{3+} , Al^{3+} , Ga^{3+} , In^{3+}) et l'autre par les anions atomes d'azote (N^{3-}). D'un point de vue cristallin, ces deux structures sont donc relativement proches ; la phase hexagonale de direction cristallographique $[0001]$ diffère de la phase cubique de direction $[111]$ uniquement par la séquence d'empilement des plans cristallins (voir Figure I-8).

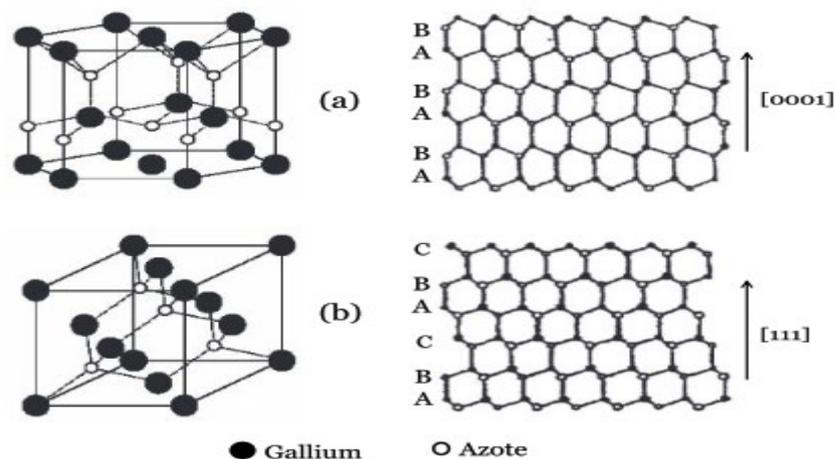


Figure (I-8): Structures cristallines et les séquences d'empilement des plans cristallins du GaN [11]

I.4.2 Les propriétés optiques du matériau :

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent les propriétés dues à l'interaction du matériau avec la lumière. Il s'agit essentiellement de l'indice de réfraction et du coefficient d'absorption du matériau, paramètres essentiels dans le cas de cellules solaires.

La définition de l'indice de réfraction d'un matériau est donnée par un nombre complexe qui s'écrit sous la forme [10] :

$$\bar{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda), \quad (\text{I-3})$$

Où n est la partie réelle de l'indice de réfraction, λ est la longueur d'onde et k le coefficient d'extinction qui traduit l'absorption.

L'indice de réfraction d'un matériau dépend de la longueur d'onde de la lumière d'excitation. Pour l'InGaN, il peut être estimé par une interpolation quadratique reliant les valeurs de l'indice de l'InN et du GaN avec un paramètre de courbure [10].

Le coefficient d'absorption est un paramètre important pour les cellules solaires décrit notamment par la partie imaginaire de l'indice de réfraction ($k(\lambda)$). Il permet de déterminer la profondeur de pénétration du rayonnement et l'épaisseur de matériau nécessaire.

L'absorption va ainsi déterminer la fraction de photons absorbés et donc la quantité de paires électron-trou photogénérés.

Si un faisceau de lumière d'intensité I_i tombe sur le matériau, une fraction de cette intensité (I_t) sera transmise à l'intérieur. Pour une couche de semi-conducteur d'épaisseur (d), l'intensité transmise (I_t) peut être décrite par la relation suivante (loi de BeerLambert) [10] :

$$I_t(\lambda) = I_i(\lambda) \times \exp(-\alpha(\lambda)d). \quad (\text{I-4})$$

Où λ est la longueur d'onde et α le coefficient d'absorption qui est lié au coefficient d'extinction (k) par la relation suivante[10] :

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}. \quad (\text{I-5})$$

Concernant l'alliage InGaN, Hori et al ont montré les variations des coefficients d'absorption dans InGaN pour différentes compositions d'indium (Figure I-9) [25]. Les études précédentes ont aussi montré que l'alliage InGaN a un coefficient d'absorption (de l'ordre de 10^5 cm^{-1}) dix

fois plus élevé que celui du silicium monocristallin. Ce qui fait de l'alliage l'InGaN un matériau de choix pour la fabrication de cellules photovoltaïques en couches minces (figure I-9).

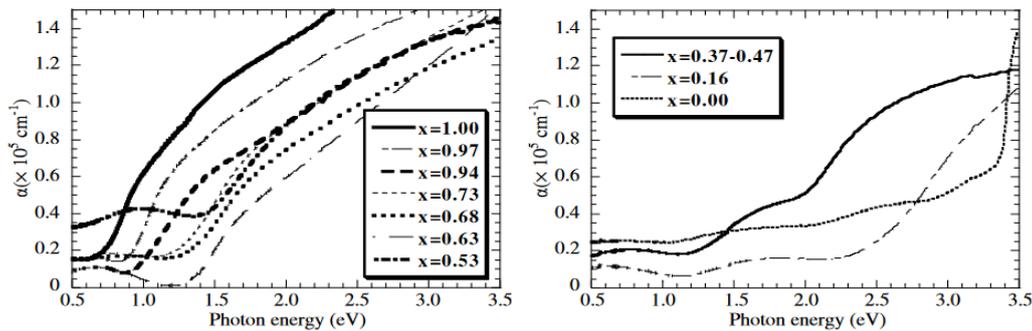


Figure (I-9): Courbes d'absorption de couches d'InGaN élaborées avec différentes compositions [11]

I.1.2 Les propriétés électriques :

L'expression du gap de l'In_xGa_(1-x)N :

Comme les autres nitrures, la principale caractéristique d'InGaN, pour laquelle il est largement étudié est sa bande d'énergie interdite (gap) directe [11]. Cette dernière peut être exprimée selon la loi de Vegard modifiée qui relie les valeurs des bandes interdites d'InN et du GaN. InN et GaN sont tous deux des matériaux à gap direct. On parle de semi-conducteur à gap direct lorsque le maximum de la bande de valence est aligné au minimum de la bande de conduction dans l'espace des vecteurs d'onde des électrons.

Inversement, on parle de semi-conducteur à gap indirect lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à des valeurs distinctes dans l'espace des vecteurs d'onde.

Après plusieurs années de controverse, la structure de bande de l'InN est maintenant bien établie avec une bande d'énergie interdite de 0,7 eV. Pour GaN, la bande d'énergie interdite est de 3,42 eV [12].

La loi de Vegard utilisée pour déterminer le gap d'InGaN est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (bande d'énergie interdite, paramètre de maille, constants élastiques, etc.) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants. Cependant, pour le gap d'InGaN, les valeurs mesurées ne sont pas en totale adéquation avec les valeurs obtenues avec l'interpolation linéaire, on introduit alors un paramètre de courbure dans l'expression afin de suivre les données expérimentales. Le gap d'InGaN est donc donné par une loi de Vegard avec un paramètre de courbure [13] :

$$E_g^{\text{InGaN}} = x.E_g^{\text{InN}} + (1-x)E_g^{\text{GaN}} - x.b.(1-x), \quad (\text{I-6})$$

Où E_{g}^{InGaN} est la bande d'énergie interdite d'InGaN, E_{g}^{InN} et E_{g}^{GaN} sont les bandes d'énergie interdites d'InN et GaN, x est la concentration d'indium dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ et b le paramètre de courbure.

Il faut noter que les mesures de la bande interdite d'InGaN n'ont été faites que pour des gammes limitées de composition en Indium et qu'il existe une disparité importante des valeurs du paramètre de courbure (b) reportées dans la littérature. Cette disparité peut être attribuée à plusieurs facteurs : la valeur du gap d'InN considérée, la méthode de mesure du gap d'InGaN, ou encore l'effet des contraintes.

I.4.3 Cellules solaires à base d'InGaN

Cellules solaires à base d'InGaN :

Depuis une dizaine d'années déjà, plusieurs études ont été menées sur différentes structures de cellules solaires à base d'InGaN. Ceci, comme nous l'avons déjà souligné, grâce à sa large couverture spectrale accordable couvrant une gamme d'énergie entre 0,7eV à 3,4 eV et un coefficient d'absorption élevé. Nous allons donc voir dans cette partie, l'état de l'art des cellules solaires à base d'InGaN, d'abord en présentant quelques structures simples de type PN et PIN qui ont été explorées.

Un tableau (I.1) résumera à la fin l'état de l'art des cellules solaires à base InGaN

I.4.3.1 Cellules solaires à simple jonction :

Les structures de cellules solaires PIN⁵ hétérojonctions à base d'InGaN ont été largement étudiées ces dernières années. L'un des premiers travaux sur les cellules solaires a été celui de Jani et al. [14] en 2007. Ils ont fabriqué par MOVPE et étudié une cellule solaire à jonction PIN en double hétérojonction avec une composition d'indium de la couche InGaN de 0,05. Ils ont rapporté un V_{CO} de 2,4 V, un I_{CC} de 3,7mA/cm² et un FF de 0,78.

Même si le rendement n'a pas été précisé et ne peut être calculé du fait d'un manque de données sur l'éclairement dans cet article, le V_{CO} élevé montre le potentiel de ce matériau.

Des simulations numériques sur des cellules InGaN homojonctions ont aussi été réalisées.

En 2014, Doolittle et al ont simulé une structure PIN sous éclairement AM1.5. [15]

Ils ont étudié l'effet de la concentration d'indium dans la couche intrinsèque. Le rendement optimal obtenu est de 17% pour une couche intrinsèque de 500 nm d'épaisseur avec une

Composition d'indium de 55%. Ceci montre que le rendement optimal des cellules solaires à base d'InGaN s'obtient avec de très fortes teneurs en indium dépassant les 50% (figure I-10).

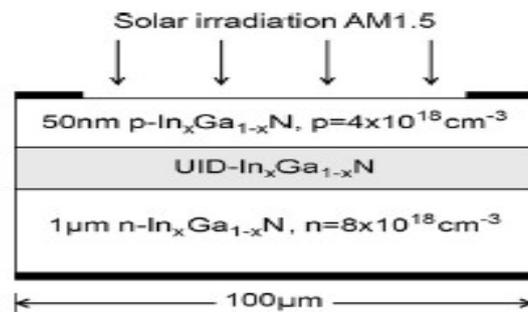


Figure (I-10): Schéma de la structure PIN homojonction étudiée par Doolittle et al. [11].

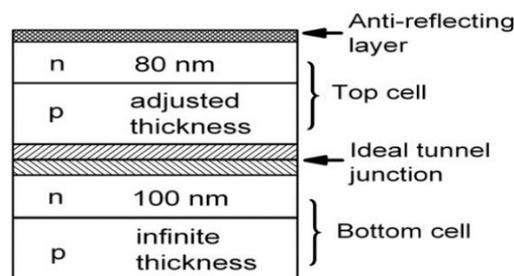
I.4.3.2 Cellules solaires à multi jonction :

Pour la technologie multi jonction à base d'InGaN, des études ont également été réalisées sur différentes structures de cellules solaires. En 2008, Zhang et al ont simulé une cellule solaire multi jonction à base d'InGaN. C'est une structure composée de deux jonctions : la première avec une composition d'indium de 0,48 et la seconde avec une composition d'indium de 0,73. Ils obtiennent un rendement de conversion de 35,1%. Cependant, la jonction tunnel qui devrait relier électriquement les deux sous-cellules n'a pas été considérée dans cette étude, ce qui expliquerait en grande partie ce très haut rendement. [16]

De plus, dans leur démarche de modélisation, le rendement quantique interne est égal au rendement quantique externe ; aucune perte de photons n'est donc considérée.

Les phénomènes de recombinaison, les phénomènes de polarisation et les défauts structuraux ne sont pas pris en compte non plus et le coefficient d'absorption est considéré constant en composition d'indium et en longueur d'onde dans toute la structure.

La modélisation utilisée par Zhang et al est donc peu réaliste, ce qui conduit à des performances surestimées. [16]



Hsu et al. ont montré par simulation, qu'il est possible d'atteindre les 31% de rendement avec Figure(I-11): Schéma de la cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al. [18].

La structure est une double jonction : une jonction PN à base d'InGaN connectée en série avec une autre jonction PN à base de silicium. L'étude ne tient pas compte de la jonction tunnel reliant les deux jonctions.

Dans le tableau 1, nous avons résumé l'état de l'art concernant les différentes structures de cellules solaires à base d'InGaN. Pour chaque type de structure, nous avons reporté les caractéristiques électriques de la cellule ou le rendement obtenu (Tableau I-1).

Tableau (I-1): Résumé de l'état de l'art de cellule solaire à base d'InGaN.[11]

Année	Structures	Performances	Réalisation	Références
-------	------------	--------------	-------------	------------

Cellules solaires à hétérojonction à base de d'InGaN

2007	InGaN/GaN(1soleil)	$V_{co}=2,4V$ $I_{cc}=3,8mA/cm^2$	MOVPE	[14]
2008	InGaN/GaN (AMO)	$V_{co}=1,81V$ $I_{cc}=4,2mA/cm^2$	MOVPE	[18]
2009	Schottky/InGaN/GaN	$V_{co}=0,91V$ $I_{cc}=7mA/cm^2$	MOVPE	[16]
2014	InGaN/GaN (AM 1.5G)	$V_{co}=0,25V$ $I_{cc}=6mA/cm^2$	MOVPE	[18]

Cellules solaires à homojonction à base d'InGaN

2009	InGaN homo (AM 1.5)	$V_{co}=2,24V$ $I_{cc}=1,40mA/cm^2$	MOVPE	[16]
2009	InGaN homo (AM 1.5)	$V_{co}=2,36V$ $I_{cc}=1,71mA/cm^2$	MOVPE	[13]
2013	InGaN homo (AM 1.5)	$V_{co}=1,5V$ $I_{cc}=0,5 mA/cm^2$	MOVPE	[19]
2014	InGaN homo (AM 1.5)	$\eta = 17\%$	Simulation	[15]

Cellules solaires multijonction à base d'InGaN

2008	InGaN/Si (AM 1.5)	$\eta = 31\%$	Simulation	[16]
2008	InGaN homo (AM 1.5)	$\eta = 35,1\%$	Simulation	[16]
2014	InGaN/GaN MQW (AM 1.5G)	$\eta = 3,33\%$	MOVPE	[20]

I.4.4 Quelques travaux sur la modélisation et la simulation des cellules solaires en régime dynamique fréquentiel :

I.4.4.1 Capacité de jonction parallèle verticale d'une cellule solaire au silicium sous éclairage monochromatique modulé :

Le but de cette étude est de montrer l'influence de la longueur d'onde sur les paramètres électriques d'une cellule solaire en silicium à jonction parallèle verticale en utilisant la technique de spectroscopie d'impédance.

Nous présentons sur la figure 1 une cellule unitaire d'une cellule solaire au silicium à jonction sous différentes longueurs d'onde verticale [12] [13] [21].

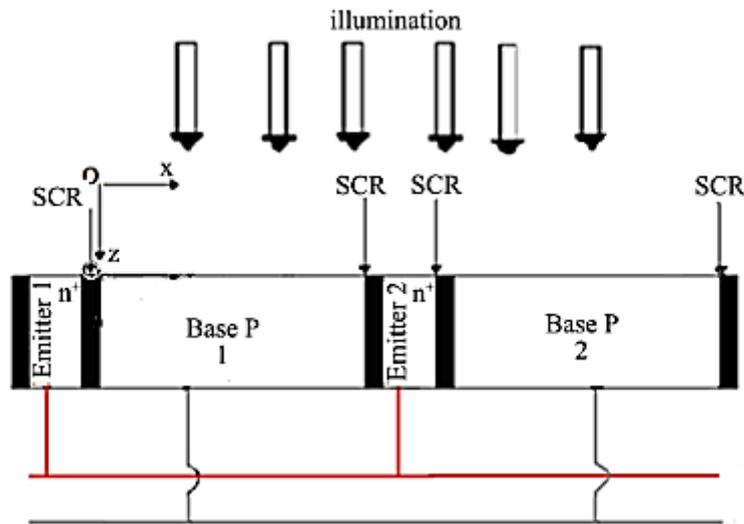


Figure (I-12): Schéma d'une cellule solaire au silicium à jonction verticale [21]

H est la largeur de la base.

Etant donné que la contribution de la base au photocourant est plus importante que celle de l'émetteur, notre analyse ne sera développée que dans la région de la base. [22]

En tenant compte des phénomènes de génération, recombinaison et diffusion dans la base, l'équation régissant la variation de la densité de porteurs minoritaires $\delta(x, t)$ sous la fréquence de modulation est [22] [23]:

$$D(\omega) \times \frac{\partial^2 \delta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x,t)}{\tau} = -G(z, \alpha, w, t) + \frac{\partial \delta(x,t)}{\partial t} \quad (I-7)$$

$D(\omega)$ et τ sont respectivement la constante de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaires excédentaires.

La densité des porteurs minoritaires excédentaires peut s'écrire comme :

$$\delta(x, t) = \delta(x) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} \quad (I-8)$$

Le taux de génération de porteuses $G(z, t)$ est donné par :

$$G(z, t) = g(z, \lambda) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} \quad (I-9)$$

$$\text{Où } g(z, \lambda) = \alpha(\lambda) \cdot I_0(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot x} \quad (\text{I-10})$$

x est la profondeur de base selon l'axe x , ω est la fréquence angulaire, z la profondeur de base selon l'axe vertical ; et λ la longueur d'onde.

Si nous remplaçons l'équation (I-8) dans l'équation (I-7), la partie temporaire est éliminée et nous obtenons :

$$\frac{\partial^2 \delta(z, t)}{\partial z^2} - \frac{\delta(z, t)}{L^2(\omega)} = - \frac{g(z, \omega)}{D(\omega)} \quad (\text{I-11})$$

La résolution de cette équation donne :

$$\delta(z, \omega) = A \cdot \cosh\left(\frac{z}{L(\omega)}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{z}{L(\omega)}\right) + K \cdot e^{-\alpha(\lambda, x) \cdot z} \quad (\text{I-12})$$

$$\text{Avec } K = \frac{\alpha(\lambda, x) \cdot I_0(\lambda, x) \cdot (1 - N(\lambda, x)) \cdot [L(\omega)]^2}{D(\omega) [L(\omega)^2 \cdot \alpha^2 - 1]} \text{ et } L(\omega)^2 \cdot \alpha^2 \neq 1$$

Les coefficients A et B sont déterminés par les conditions aux limites suivantes [16] [17] :

✚ à la jonction ($x = 0$) :

$$D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(x, \omega)}{\partial x} \Big|_{x=0} = S_f \cdot \delta(x, \omega) \Big|_{x=0} \quad (\text{I-13})$$

S_f est la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en excès à la jonction.

✚ au milieu de la base ($x = H/2$) :

$$D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(x, \omega)}{\partial x} \Big|_{x=H/2} = 0 \quad (\text{I-14})$$

Les porteurs minoritaires en excès dans la base vont s'écouler vers les deux jonctions par diffusion ; la densité de photocourant est donnée par l'expression suivante :

$$J_{ph} = 2 \cdot q \cdot D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(x, \omega)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (\text{I-15})$$

où q est la charge élémentaire.

De la densité de porteurs minoritaires en excès, on peut déduire la phototension aux bornes de la jonction, selon la relation de Boltzmann comme suit :

$$V_{ph} = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{N_b}{n_0^2} \cdot \delta(0, \omega) \Big|_{x=0} \right) \quad (\text{I-16})$$

Avec V_T la tension thermique, N_b la densité de dopage de la base, n_i la densité des porteurs intrinsèques.

La variation de la charge dans la base conduit à une variation correspondante de la phototension à travers la jonction ; ceci donne lieu à une capacité associée.

Cela donne lieu à une capacité associée. Cette capacité est principalement due à la charge ionisée fixe (capacité obscure) aux limites de la jonction et au processus de diffusion (capacité de diffusion) .

La capacité de la cellule solaire peut être définie à l'adresse par [18] [19] :

Étant donné l'expression de la tension photoélectrique (I-14), la capacité peut être réécrite comme suit(I-14) :

$$C_d = \frac{q \cdot \partial \delta(0, \omega) |_{x=0}}{V_T} \quad (I-17)$$

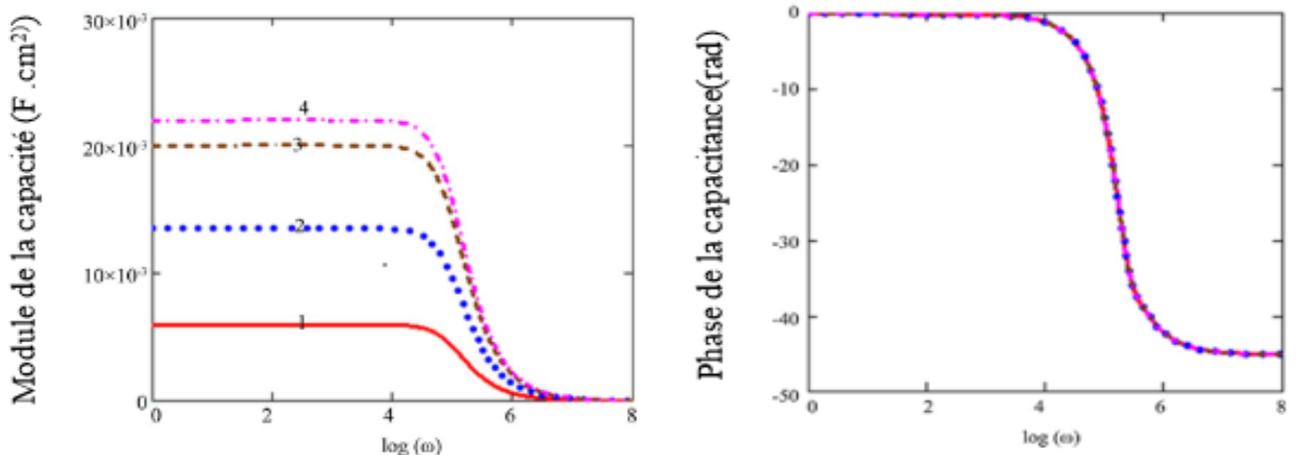


Figure (I-13): (a) Capacitance en fonction du logarithme de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde .(b) Phase de la capacitance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la longueur d'onde .

✚ Résultats et discussions:

Les profils du module et sa phase de capacité en fonction du logarithme de la fréquence pour différentes longueurs d'onde (courte et grande longueur d'onde), sont présentés dans les Figures (I-13) (a)-(b).

Dans la figure 2(a) et la figure 2(c), nous obtenons les mêmes allures du module de capacité avec le logarithme de la fréquence de modulation. Nous avons constaté que dans l'intervalle de

longueur d'onde (courte longueur d'onde) [0,44 μm ; 0,50 μm], l'ampleur de la capacité augmente.

L'amplitude de la capacité augmente, et que dans l'intervalle de longueur d'onde (grande longueur d'onde) [0,58 μm ; 0,7 μm], cette amplitude diminue car la base est plus ou moins transparente dans cet intervalle de longueur d'onde et la phase dans une situation de circuit ouvert, très peu avec la fréquence angulaire jusqu'à une certaine fréquence appelée fréquence de coupure $\omega_c = 2\pi/\tau$ [24].

Au-delà de cette fréquence de coupure, la capacité de la cellule solaire et sa phase diminuent très rapidement avec la fréquence angulaire. En effet, lorsque la fréquence est à l'intérieur de la fréquence de coupure, la cellule solaire fonctionne en régime quasi-statique et reste insensible à la fréquence. Pour les fréquences supérieures à la fréquence de coupure, la contrainte du matériau devient importante au point que les porteurs minoritaires photo-générés sont mal stockés au voisinage de la jonction : cela conduit à une capacité très faible. Jonction : cela conduit à une capacité très faible.

Conclusion :

Dans ce chapitre quelques notions de bases fondamentales sur le photovoltaïque ont été abordées comme le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, la jonction PN, le niveau d'énergie au niveau de cette jonction ainsi l'architecture des cellules. De même les paramètres électriques des cellules solaires ont été définis et expliqués.

Une étude bibliographique a été faite sur le nitrure de Gallium indium (InGaN). Ses propriétés structurales, optiques et électriques ont été développées dans ce chapitre, afin de mieux cerner ses avantages comparés aux autres matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques. Dans le but de mieux étudier les cellules à base d'InGaN, une modélisation sera faite dans le chapitre suivant afin d'extraire et d'analyser les paramètres électriques de ces cellules et de pouvoir les optimiser.

Chapitre II : Modélisation de la photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Introduction :

En général, la modélisation analytique basée sur l'utilisation d'équations pour estimer le comportement réel des photopiles, nécessite une description détaillée du dispositif à simuler et des matériaux qui sont utilisés dans sa construction. La sélection du type de matériau approprié et de sa composition ainsi que ses propriétés électriques et physiques sont très importantes et influent directement sur le rendement des photopiles[25].

Dans cette partie nous allons modéliser la photopile à base d'InGaN sous un rayonnement monochromatique en régime dynamique fréquentiel. A partir de l'équation de continuité régissant la dynamique des porteurs photogénérés dans la base, nous déterminerons l'expression de la densité des porteurs minoritaires. Cette quantité (densité des porteurs minoritaires) nous permettra de déterminer la densité de photocourant, le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, la phototension, les résistance série, shunt et la capacité de diffusion.

II.1 Photopile à base d'In_xGa_{1-x}N

Présentation de la photopile :

Dans cette étude, nous considérons une photopile comme représenté sur la Figure (II-1).

La quantité H désigne la profondeur de la cellule solaire. En pratique, les dimensions de la base le long des axes x et y sont très larges par rapport à la profondeur de la photopile. Ainsi, le courant est négligé par ces directions. Par hypothèse, le coefficient de diffusion des transporteurs minoritaires dans l'émetteur est considéré négligeable par rapport à celui de la base. Ainsi, notre analyse n'est développée que sur la base de la cellule solaire photovoltaïque. On prend également l'origine de notre repère à partir de l'émetteur de la photopile. [26]

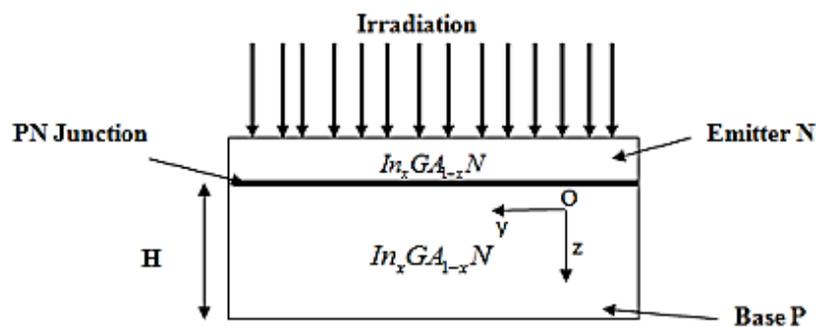


Figure (II-1): Présentation de la photopile à base In_xGa_{1-x}N soumise à un éclairage uniforme [27]

II.2 Détermination des paramètres :

II.2.1 Les paramètres optiques :

La cellule solaire utilisée dans toute notre étude est basée sur ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$), dans laquelle le grandeur x représente la fraction d'indium. La bande interdite de l'énergie solaire est liée à la fraction de l'indium comme suit [27].

$$E_g = x \cdot E_g^{\text{InN}} + (1 - x) \cdot E_g^{\text{GaN}} - b \cdot x \cdot (1 - x) \quad (\text{II-1})$$

Où l'énergie de la bande interdite de l'InN (E_g^{InN}) et GaN (E_g^{GaN}) sont respectivement 0,7 eV et 3,42 eV et $b=1,43$ eV. Le coefficient d'absorption est aussi donné en fonction de la fraction d'indium et du photon incident comme suit [28]:

$$\alpha(\lambda, x) = 10^5 \sqrt{C(x) (E_{ph} - E_g(x)) + D(x)(E_{ph} - E_g(x))^2} \quad (\text{II-2})$$

Où $E_{ph}=1,24/\lambda$ représente l'énergie du photon et λ la longueur d'onde.

$$c = 3,525 - 18,29 \cdot x + 40,22 \cdot x^2 - 37,52 \cdot x^3 + 12,77 \cdot x^4 \quad (\text{II-3})$$

$$D = -0,6651 + 3,616 \cdot x - 2,46 \cdot x^2 \quad (\text{II-4})$$

L'indice de réfraction de la cellule solaire est donné en fonction de l'énergie du photon et de la fraction d'indium comme suit [29]:

$$N(\lambda, x) = \sqrt{A(x) \cdot \left(\frac{E_g}{E_{ph}}\right)^2 \cdot \left[2 - \sqrt{1 + \frac{E_{ph}}{E_g}} - \sqrt{1 - \frac{E_{ph}}{E_g}}\right] + B(x)} \quad (\text{II-5})$$

$$\text{Où } A = 13,55 \cdot x + 9,31 \cdot (1 - x); B = 2,05 \cdot x + 3,03 \cdot (1 - x) \quad (\text{II-6})$$

II.2.2 Paramètres électroniques :

La concentration des porteurs intrinsèques est également données par la fraction d'indium et prend en compte la forme suivante[25] :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{\frac{-E_g}{2 \cdot K_b \cdot T}} \quad (\text{II-7})$$

Avec N_c et N_v étant respectivement la densité d'état dans la bande de conduction et la bande de valence. Leurs expressions sont données respectivement sous la forme :

$$N_c = (0,9 \cdot x + 2,3 \cdot (1 - x)) \cdot 10^9 \quad (\text{IV - 8}) \text{ et } N_v = (5,3 \cdot x + 1,8 \cdot (1 - x)) \cdot 10^{19} \quad (\text{II-8})$$

La masse effective des porteurs s'exprime comme suit [28]:

$$m_n = (0,12 \cdot x + 0,2 \cdot (1 - x)) \cdot m_0 \quad (\text{II-10})$$

Le coefficient de diffusion intrinsèque utilisé dans la simulation est [25] :

$$D_0 = \frac{k_B \cdot \tau \cdot T}{(0,12 \cdot x + 0,2 \cdot (1 - x)) \cdot m_0} \quad (\text{II-11})$$

Détermination de la densité des porteurs de charge minoritaires dans la base

II.3 Modèle Mathématique :

II.3.1 Equation de continuité

L'équation régissant la variation de la densité des porteurs de charge minoritaires photogénérés dans la base d'une photopile est [21] :

$$D(\omega) \times \frac{\partial^2 \delta(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\delta(z,t)}{\tau} = -G(z, \alpha, \omega, t) + \frac{\partial \delta(z,t)}{\partial t} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

$\delta(z, t)$ est la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'espace z et du temps.

$$\delta(z, t) = \delta(z) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t}$$

$G(z, \alpha, \omega, t)$ est le taux de génération des porteurs

II.3.2 Le taux de génération :

Lorsqu'une photopile est éclairée par la face avant, elle absorbe les photons incidents d'énergie supérieure à celle du « gap » du matériau semiconducteur qui la constitue. Si la photopile se trouve dans un circuit fermé, l'électron ainsi excité peut passer dans un état énergétique correspondant à la bande de conduction et pourra contribuer à la génération d'un photocourant dès que la paire électron-trou sera séparée à la rencontre du champ électrique qui règne au niveau de la jonction [30].

L'expression globale du taux de génération sous illumination monochromatique en régime dynamique fréquentiel est donnée par la relation suivante [31]:

$$G(z, \alpha, \omega, t) = g(z, \omega) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Où } g(z, \omega) = \alpha(\lambda, x) \cdot I_0(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda, x)) \cdot e^{-\alpha(\lambda, x) \cdot z} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$I_0(\lambda)$ est l'intensité de la lumière incidente monochromatique.

$R(\lambda, x)$ et $\alpha(\lambda, x)$ sont respectivement le coefficient de réflexion et d'absorption.

II.3.3 Le coefficient de diffusion :

$D(\omega)$ est le complexe de diffusion des porteurs minoritaires dans la base. Elle donne l'expression du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de la photopile en régime dynamique fréquentiel[27].

$$D(\omega) = D_0 \times \left(\frac{1-j\omega\tau^2}{1+(\omega\tau)^2} \right) \quad (\text{II.15})$$

II.3.4 Solution de l'équation de continuité :

L'équation de continuité devient en remplaçant l'équation (II.13) et (II.14) dans (II.12) :

$$\frac{\partial^2 \delta(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\delta(z,t)}{L^2(\omega)} = -\frac{g(z,\omega)}{D(\omega)} \quad (\text{I.11})$$

$L(\omega)$ est le complexe de la longueur de diffusion dans la base [27] :

$$L(\omega) = \sqrt{\frac{D(\omega)\tau}{1+j\omega\tau}} \quad (\text{II.17})$$

La résolution de cette équation donne :

$$\delta(z, \omega) = A \cdot \cosh\left(\frac{z}{L(\omega)}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{z}{L(\omega)}\right) + K \cdot e^{-\alpha(\lambda,x)z} \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Avec } K = \frac{\alpha(\lambda,x) \cdot I_0(\lambda,x) \cdot (1-N(\lambda,x)) \cdot |L(\omega)|^2}{D(\omega) \cdot |L(\omega)|^2 \cdot \alpha^2 - 1} \text{ et } L(\omega)^2 \cdot \alpha^2 \neq 1$$

II.3.5 Détermination des coefficients A et B

Les coefficients A et B sont déterminés à travers les conditions aux limites[32] :

✚ Au niveau de la jonction :

$$D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(z,\omega)}{\partial z} \Big|_{z=0} = S_f \cdot \delta(z,\omega) \Big|_{z=0} \quad (\text{II.18})$$

$$\frac{\partial \delta(z,\omega)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(A \cosh\left[\frac{z}{L(\omega)}\right] + B \sinh\left[\frac{z}{L(\omega)}\right] + K \cdot e^{-\alpha(\lambda,x)z} \right) \quad (\text{II.19})$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \delta(z,\omega)}{\partial z} = \frac{A}{L(\omega)} \sinh\left(\frac{z}{L(\omega)}\right) + \frac{B}{L(\omega)} \cosh\left(\frac{z}{L(\omega)}\right) - \alpha \cdot K \cdot e^{-\alpha z} \quad (\text{II.20})$$

$$\text{D'où } D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(z,\omega)}{\partial z} \Big|_{z=0} = D(\omega) \cdot \left(\frac{B}{L(\omega)} - \alpha \cdot K \right) \quad (\text{II.21})$$

$$S_f \cdot \delta(z, \omega)|_{z=0} = (A + K) \cdot S_f \quad (\text{II-22})$$

$$\text{Donc } D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=0} = S_f \cdot \delta(z, \omega)|_{z=0} \Leftrightarrow D(\omega) \cdot \left(\frac{B}{L(\omega)} - \alpha \cdot K \right) = (A + K) \cdot S_f \quad (\text{II-23})$$

✚ Au niveau de la face arrière :

$$D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=H} = -S_b \cdot \delta(z, \omega)|_{z=H} \quad (\text{II-24})$$

$$\text{Soit } \frac{\partial \delta(z, \omega)}{\partial z} = \frac{A}{L(\omega)} \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + \frac{B}{L(\omega)} \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) - \alpha \cdot K \cdot e^{-\alpha \cdot H} \quad (\text{II-25})$$

$$\text{Donc } D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=H} = D(\omega) \cdot \left(\frac{A}{L(\omega)} \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + \frac{B}{L(\omega)} \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) - \alpha \cdot K \cdot e^{-\alpha \cdot H} \right) \quad (\text{II-26})$$

$$\text{Soit } S_b \cdot \delta(z, \omega)|_{z=0} = S_b \cdot \left(A \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + B \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + K \cdot e^{-\alpha \cdot H} \right) \quad (\text{II-29})$$

$$\text{Donc } D(\omega) \cdot \frac{\partial \delta(z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=H} = S_b \cdot \delta(z, \omega)|_{z=H} \Leftrightarrow \varphi = \zeta \quad (\text{II-37})$$

$$\text{Avec } \varphi = D(\omega) \cdot \left(\frac{A}{L(\omega)} \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + \frac{B}{L(\omega)} \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) - \alpha \cdot K \cdot e^{-\alpha \cdot H} \right) \text{ et}$$

$$\zeta = S_b \cdot \left(A \cosh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + B \sinh\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + K \cdot e^{-\alpha \cdot H} \right)$$

En somme :

$$\begin{cases} D(\omega) \cdot \left(\frac{B}{L(\omega)} - \alpha \cdot K \right) = (A + K) \cdot S_f & (\text{II-28}) \\ \varphi = \zeta & (\text{II-29}) \end{cases}$$

Exprimons B en fonction de A dans (II-26)

$$B = S_f \cdot \frac{L(\omega)}{D(\omega)} (A + K) + \alpha \cdot K \cdot L(\omega) \quad (\text{II-31})$$

En remplaçant la valeur de B dans l'équation (II-30) on obtient l'expression de A :

$$A = -K \cdot \frac{\left(\frac{L(\omega)}{D(\omega)} S_f + \alpha \cdot L(\omega) \right) S_b \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + \left(S_f + \alpha \cdot D(\omega) \right) \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + \left(S_b - \alpha \cdot D(\omega) \right) \cdot e^{-\alpha \cdot H}}{\left(S_f + S_b \right) \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + \left(\frac{D(\omega)}{L(\omega)} + \frac{L(\omega)}{D(\omega)} S_b S_f \right) \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right]} \quad (\text{II-32})$$

Après avoir obtenu l'expression de A on en déduit celle de B en remplaçant l'expression de A dans (II-26)

On obtient :

$$B = K \cdot \frac{\left(2 \cdot \alpha \cdot S_b S_f \frac{L(\omega)^2}{D(\omega)} - \alpha \cdot D(\omega) + S_f \right) \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] - \left(\frac{L(\omega)}{D(\omega)} + \alpha \cdot L(\omega) \right) S_b \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + S_f \left(\frac{L(\omega)}{D(\omega)} S_b + \alpha \cdot L(\omega) \right) \cdot e^{-\alpha \cdot H}}{\left(S_f + S_b \right) \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + \left(\frac{D(\omega)}{L(\omega)} + \frac{L(\omega)}{D(\omega)} S_b S_f \right) \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right]} \quad (\text{II-30})$$

II.4 La densité de photocourant et la phototension :

II.4.1 La densité de photocourant :

En fonction de la densité des porteurs minoritaires dans la base, la densité de photocourant est donnée par l'expression [33]:

$$J_{ph} = q \cdot D(\omega) \cdot \left. \frac{\partial \delta(z, \omega)}{\partial z} \right|_{z=0} \Leftrightarrow J_{ph} = q \cdot D(\omega) \cdot \left(\frac{B}{L(\omega)} - \alpha \cdot K \right) \quad (\text{II-31})$$

Ce qui donne :

$$J_{ph} = q \cdot K \cdot \frac{(3\alpha \cdot S_b S_f L(\omega)^2 + D(\omega) S_f) \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] - \left(\frac{D(\omega)^2}{L(\omega)} + \alpha \cdot L(\omega) \cdot S_f\right) \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + S_f L(\omega) (S_b + \alpha) \cdot e^{-\alpha H}}{L(\omega) (S_f - S_b) \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] - \left(D(\omega) - \frac{L(\omega)^2}{D(\omega)} S_b S_f\right) \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right]} \quad (\text{II-32})$$

II.4.2 La phototension :

Lorsque la photopile est éclairée, il apparaît une phototension dont l'expression est donnée par la relation de Boltzmann[34] :

$$V_{ph} = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{N_b}{n_0^2} \cdot \left. \partial \delta(z, \omega) \right|_{z=0} \right) \Leftrightarrow V_{ph} = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{N_b}{n_0^2} (A + K) \right) \quad (\text{II-33})$$

$$D'où V_{ph} = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{N_b}{n_0^2} (A + K) \right) \quad (\text{II-34})$$

II.4.3 Photocourant de court-circuit :

Le photo-courant de court-circuit est déterminé par la limite de la densité de photo courant lorsque la vitesse de recombinaison tend vers une grande valeur[23].

$$J_{cc} = \lim_{S_f \rightarrow \infty} J_{ph} \quad (\text{II-35})$$

Ce qui donne :

$$J_{cc} = q \cdot K \cdot \frac{(3\alpha \cdot S_b L(\omega) + \frac{D(\omega)}{L(\omega)}) \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] - \alpha \cdot \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + (S_b + \alpha) \cdot e^{-\alpha H}}{\cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + \frac{L(\omega)}{D(\omega)} \cdot S_b \cdot \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right]} \quad (\text{II-36})$$

II.4.4 Tension en circuit ouvert :

La Phototension en circuit ouvert est obtenue en faisant tendre la vitesse de recombinaison à la jonction vers zéro. Elle est déterminée par la relation[31] :

$$V_{co} = \lim_{S_f \rightarrow 0} V_{ph} \quad (\text{II-37})$$

On obtient :

$$V_{co} = \frac{V_T}{n_0^2} (n_0^2 + N_b \cdot K \cdot \left(\frac{\alpha \cdot S_b L(\omega) \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] - \alpha \cdot D(\omega) \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] + (S_b + \alpha \cdot D(\omega)) \cdot e^{-\alpha H}}{\frac{D(\omega)}{L(\omega)} \sinh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right] - S_b \cdot \cosh\left[\frac{H}{L(\omega)}\right]} + 1 \right)) \quad (\text{II-38})$$

II.4.5 Le courant de diode et la puissance :

II.4.5.1 Le courant de diode :

Le courant de diode est un courant de fuite qui caractérise les pertes de porteurs de charge

Photogénérés. Elle est donnée par la relation suivante[35] :

$$I_d(S_f, \omega) = q \cdot S_f \cdot \frac{n_0^2}{N_b} \left(e^{\frac{V_{ph}(S_f, \omega)}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{II-39})$$

II.4.5.2 La puissance :

La puissance est un paramètre important pour la photopile car elle permet sa caractérisation. Elle est à l'origine de la capacité de la photopile à fournir de l'électricité. Plus la puissance est élevée plus la qualité de la photopile est meilleure[35].

La puissance électrique fournie par la photopile pour un éclairage polychromatique :

$$P(S_f, \omega) = (J_{ph}(S_f, \omega) - I_d(S_f, \omega)) \times V_{ph}(S_f, \omega) \quad (\text{II-40})$$

II.4.6 La résistance Série et Shunt :

II.4.6.1 La résistance série :

Les caractéristiques courant-tension présentent un palier presque vertical où la photo tension varie faiblement avec le photocourant. Cela correspond à une source de tension constante quel que soit le courant débité. Cette tension est assimilable à la photo tension de circuit ouvert. Comme la photopile n'est pas idéale, elle présente des fuites. Ces dernières sont caractérisées par la présence dans le circuit équivalent d'une résistance R_s , montée en série avec la source de tension[36]. La résistance série, l'un des paramètres électriques fondamentaux dépendant de la nature du substrat et de la température, elle joue un rôle déterminant sur la qualité d'une photopile. Nous proposons un circuit électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne en circuit ouvert pour la figure suivante :

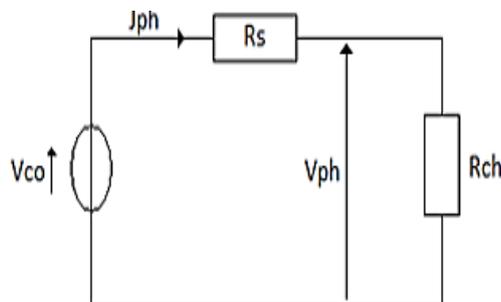


Figure (II-2): Circuit électriques équivalent d'une photopile fonctionnant en circuit ouvert [25]

Avec

V_{co} : la phototension de circuit ouvert, R_s : la résistance série, V_{ph} : la photo-tension, J_{ph} : le photocourant,

R_{ch} : la résistance de charge variable.

Nous déterminons l'expression de la résistance série en appliquant la loi des mailles sur ce circuit, on a :

$$R_s \cdot J_{ph}(Sf, \omega) = V_{co} - V_{ph}(Sf, \omega) \quad (II-41)$$

$$R_s = \frac{V_{co} - V_{ph}(Sf, \omega)}{J_{ph}(Sf, \omega)} \quad (II-42)$$

II.4.6.2 La résistance shunt :

La résistance shunt provient de la recombinaison des porteurs de charge en volume, en surface et aux interfaces (émetteur-base, contact-émetteur, contact-base) d'une photopile. Elle est indicatrice de la bonne qualité d'une photopile car lorsqu'elle est grande ou faible, le courant de fuite à travers la photopile est faible ou grand respectivement. Nous pouvons proposer un circuit électrique équivalent d'une photopile qui fonctionne en situation de court-circuit. La loi des mailles (R_{sh} , V_{ph} , J_{ph}) appliquée à ce circuit permet d'écrire[35] :

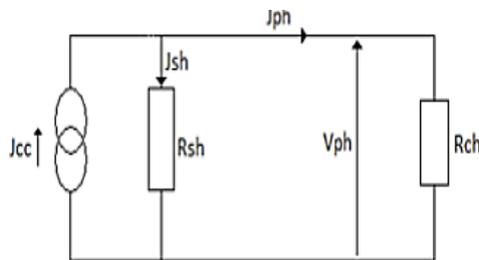


Figure (II-3): Circuit électriques équivalent d'une photopile fonctionnant en court-circuit[25]

$$V_{ph}(Sf, \omega) = R_{sh} \cdot (V_{cc} - J_{ph}) \quad (II-43)$$

$$R_{sh}(Sf, \omega) = \frac{V_{ph}}{(V_{cc} - J_{ph})} \quad (II-44)$$

Avec :

R_{sh} la résistance shunt ; V_{ph} la photo-tension ; J_{ph} la densité de photocourant ; J_{cc} le courant de court-circuit ; R_{ch} : la résistance de charge variable.

II.4.7 Détermination de la Capacité de diffusion :

Lorsque la photopile est illuminée, les porteurs de charges photo générées diffusent dans la base. La capacité qui apparait est alors assimilées à une capacité de diffusion. L'équation de la capacité totale est alors données par [34]:

$$C(\omega, N_b, S_f) = q \cdot \frac{\partial \delta(z, \omega)|_{z=0}}{V_{ph}} \quad (\text{II-45})$$

Le développement de cette expression fait apparaitre deux termes :

$$C(\omega, N_b, S_f) = \frac{q \cdot n_0^2}{N_b \cdot V_T} + \frac{q \cdot \partial \delta(z, \omega)|_{z=0}}{V_T} \quad (\text{II-47})$$

On pose :

$$C(\omega, N_b, S_f) = C_0(N_b) + C_d(\omega, N_b, S_f) \quad (\text{II-48})$$

Avec $C_0(N_b) = \frac{q \cdot n_0^2}{N_b \cdot V_T}$ étant la capacité de transition et $C_d(\omega, N_b, S_f) = \frac{q \cdot \partial \delta(z, \omega)|_{z=0}}{V_T}$ étant la capacité de diffusion.

Conclusion :

Dans ce chapitre, une modélisation de la photopile à base $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sous éclairage monochromatique en régime dynamique fréquentiel a été faite. Grâce à ce modèle, nous avons déterminé l'expressions de la densité des porteurs des charges minoritaires dans la base de la photopile, son coefficient de diffusion ainsi que ces paramètres électriques (densité de photocourant, la phototension, le courant de court-circuit, sa tension en circuit ouvert, son courant de diode, sa puissance électrique, ses résistances série et shunt et sa capacité de diffusion). Grâce au logiciel de simulation les différents paramètres de la photopile peuvent être simulé et voir ainsi leurs comportements en régimes dynamique fréquentiel.

Chapitre III : Simulation et discussion des résultats

Introduction :

Après avoir obtenu un modèle mathématique et déterminer les différents paramètres de la photopile il est important de les simuler pour étudier ces derniers. A l'aide d'un logiciel de simulation nous allons simuler et étudier les paramètres électriques de la photopile lorsqu'elle est illuminée, en fonction de la profondeur de la base, de la vitesse de recombinaison de la face avant, du logarithme de la fréquence, pour différentes valeurs de la fréquence, de la longueur d'onde et de la fraction d'indium.

Nous allons en premier lieu étudier le coefficient de diffusion suivant différentes valeurs de la fraction d'indium en fonction de la fréquence.

Ensuite s'en suit une étude de la densité de photocourant, de la phototension, de la caractéristique courant tension de la photopile et de sa puissance en fonction de la vitesse de recombinaison de la face avant et du logarithme de la fréquence en variant la pulsation, la fraction d'indium et la longueur d'onde. Également le photocourant de court-circuit ainsi que la tension en circuit ouvert seront étudiés en fonction de la profondeur de la base en variant la pulsation, la fraction d'indium et la longueur d'onde.

Et enfin la résistance série et shunt de même que la capacité de diffusion seront également étudiées en fonction de la vitesse de recombinaison de la face avant et le logarithme de la pulsation en variant la pulsation, la fraction d'indium et la longueur d'onde.

Enfin nous ferons une optimisation dans le but d'obtenir les paramètres optimums de notre photopile en simulant le rendement en fonction de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence.

III.1 Présentation du logiciel Mathcad :

PTC Mathcad est une application qui peut facilement résoudre des problèmes d'ingénierie complexes avec plusieurs fonctions de probabilités, de statistiques et d'analyse de données. Il peut facilement afficher des formules et des calculs à l'aide d'illustrations, de tableaux d'informations, de graphiques et de divers textes dans le document pour expliquer et présenter ces informations aux personnes qui ne sont pas très familières avec les mathématiques. Il comprend également une fonction de notation mathématique sensible à l'unité qui vous permet de créer et de documenter des calculs complexes qui peuvent être vérifiés et partagés. Avec cet outil, vous pouvez obtenir une puissance de calcul améliorée avec des solutions plus rapides et plus précises et des feuilles de travail complètes [37].

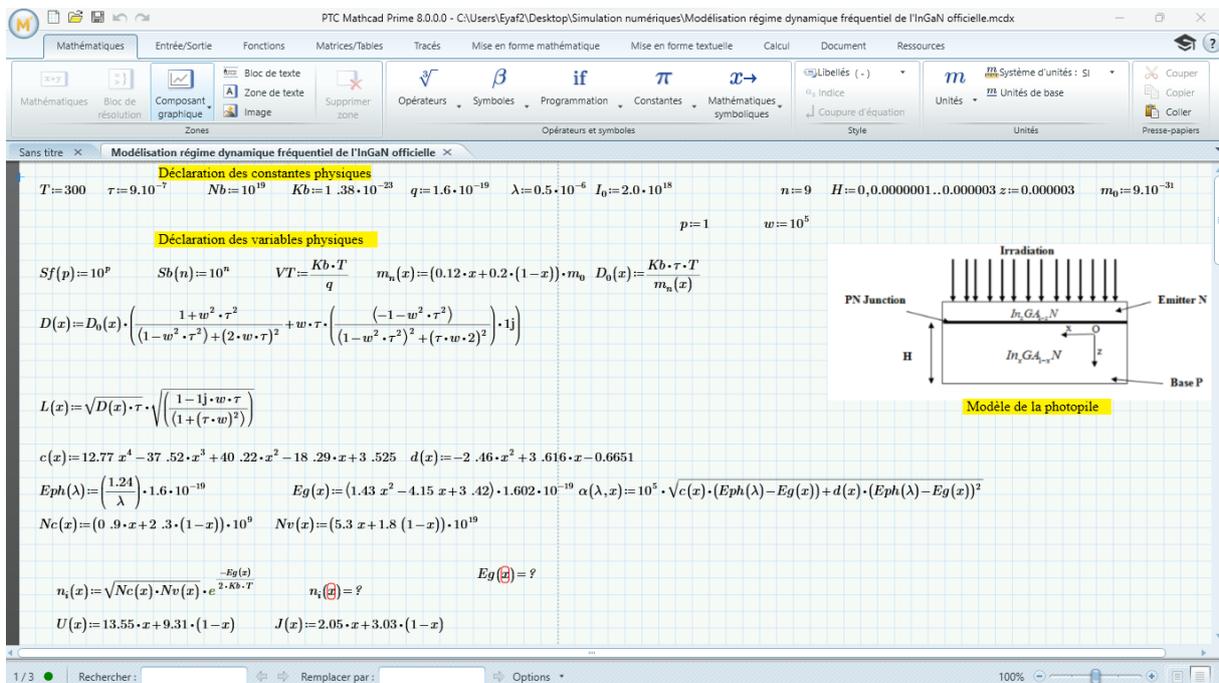


Figure (III-1): Interface du logiciel Mathcad [37]

III.2 Profil du coefficient de diffusion en fonction du logarithme de la fréquence :

Les figures (III-2) et (III-3) représentent la variation du coefficient de diffusion en fonction de la fréquence pour différente valeur de la fraction d'indium x et pour une longueur d'onde λ égal à $0,5 \mu\text{m}$ et $0,9 \mu\text{m}$.

✚ Pour une longueur d'onde $\lambda=0,5 \mu\text{m}$.

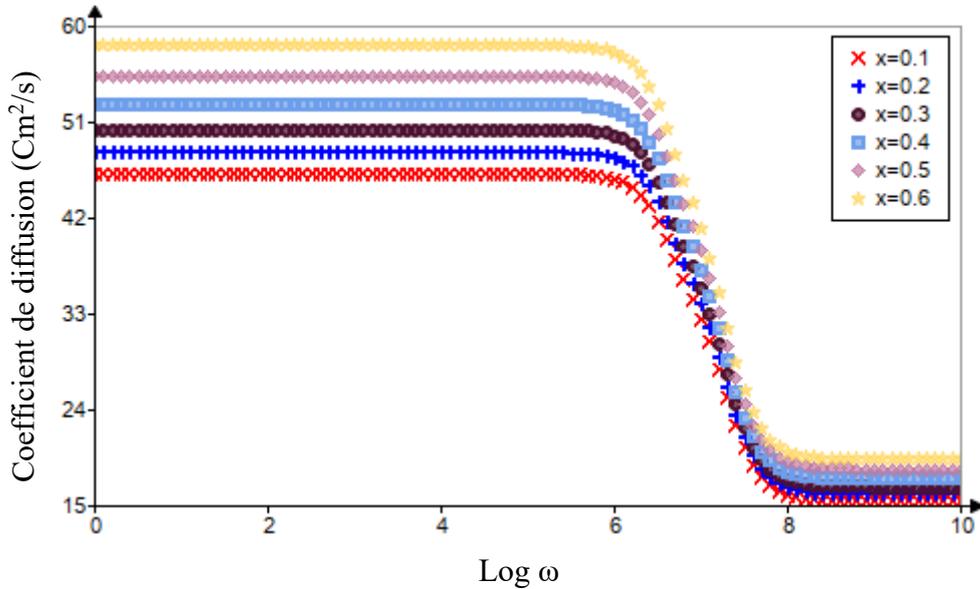


Figure (III-2): Coefficient de diffusion en fonction du logarithme de la fréquence de modulation pour différente valeur de la fraction d'indium(x).

✚ Pour une longueur d'onde $\lambda=0,9 \mu\text{m}$

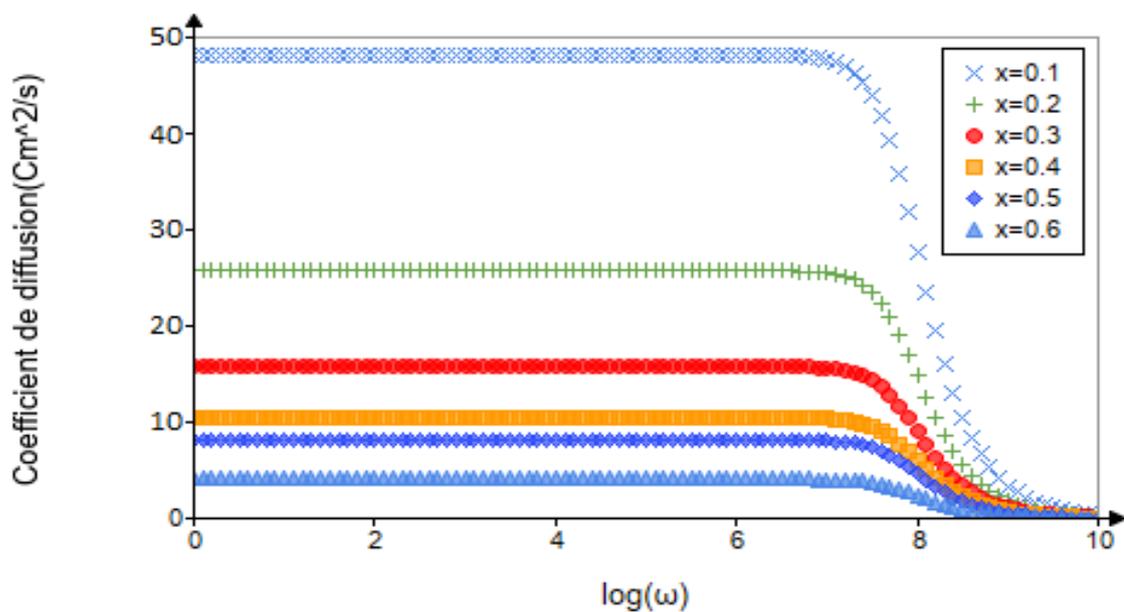


Figure (III-3): Coefficient de diffusion en fonction du logarithme de la fréquence de modulation pour différente valeur de la fraction d'indium(x).

Les figures (III-2) et (III-3) montrent que le coefficient de diffusion reste quasi-statique et est maximal pour des petites valeurs de la fréquence. A partir d'une certaine valeur de la fréquence supérieur ou égale à 10^6 rad/s, le coefficient de diffusion subit une forte diminution jusqu'à atteindre une certaine valeur $15 \text{ cm}^2/\text{s}$ et devient constant pour une longueur d'onde λ égale $0,5 \mu\text{m}$ et nulle dans le cas où la longueur d'onde λ égale $0,9 \mu\text{m}$

En effet les grandes fréquences ne permettent pas aux porteurs minoritaires de diffuser car beaucoup d'entre eux seront recombinés soit dans la masse, soit en surface de la photopile. C'est ce qui explique la diminution drastique du coefficient de diffusion [34].

L'effet de la fraction d'indium est plus marqué pour de petites valeurs de la fréquence.

Dans le cas des courtes longueurs d'onde on note que plus la fraction d'indium augmente, plus la valeur maximale du coefficient de diffusion augmente Par contre avec les grandes longueurs d'onde plus la fraction d'indium augmente, plus le coefficient de diffusion diminue.

III.3 Etude des paramètres électriques :

III.3.1 Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f :

Les figures (III-4), (III-5), (III-6) représentent la variation de la densité de photocourant en fonction de vitesse de recombinaison S_f pour différente valeur de la fréquence, de la fraction d'indium et de la longueur d'onde.

✦ Pour différentes valeurs de la fréquence

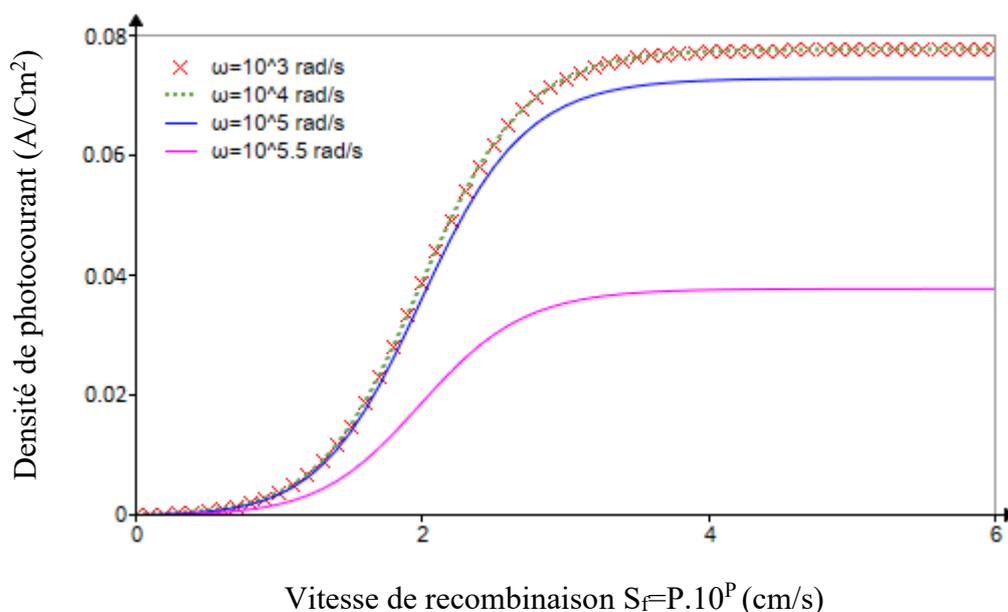


Figure (III-4): Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la pulsation w (rad/s) ($S_b = 2 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$, $x = 0,3$ $H = 3 \mu\text{m}$, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$).

✦ Pour différentes valeurs de la fraction d'indium x

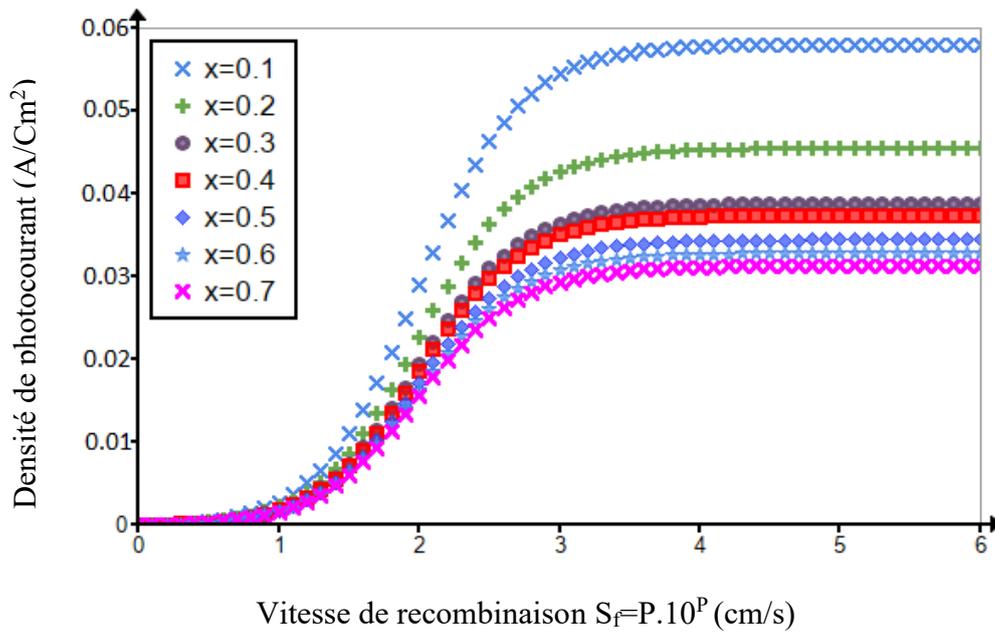


Figure (III-5) : Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($\omega = 10^5$ rad/s $H = 3 \mu\text{m}$, $S_b = 2 \cdot 10^2$ cm/s, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$).

✦ Pour différentes valeurs de la longueur d'ondes

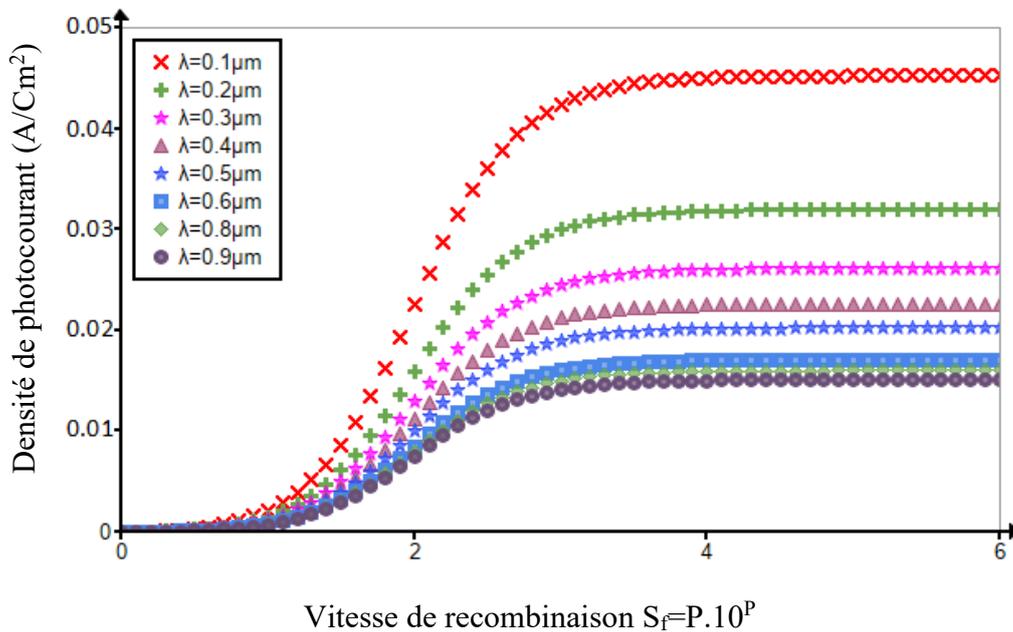


Figure (III-6): Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($\omega = 10^5$ rad/s $H = 3 \mu\text{m}$, $S_b = 2 \cdot 10^2$ cm/s $x = 0,3$).

Pour les figures (III-4),(III-5) et (III-6), trois parties différentes sont observées :

- ✓ La première partie correspond à des faibles valeurs de la vitesse de recombinaison où la densité de photocourant est quasi-nulle. Autrement dit qu'il n'y a pas de génération de courant dû au déplacement des porteurs, lorsqu'on a de faible vitesse de recombinaison. Donc on est en situation de circuit ouvert.
- ✓ La deuxième partie correspond à des valeurs de vitesse de recombinaison intermédiaire (S_f au point de fonctionnement de 1 à 3 cm/s). Sur cette plage de la vitesse de recombinaison, la densité augmente rapidement jusqu'à atteindre une certaine valeur correspondant au maximum pour chaque valeur de la fréquence de modulation.
- ✓ La troisième partie correspond à des grandes vitesses de recombinaison, la densité de photocourant atteint sa valeur maximale et demeure constante. Donc on peut dire qu'on est en situation de court-circuit et que la valeur maximale de la densité de photocourant correspond au courant de court-circuit.

Et pour finir on constate que la densité de photocourant diminue avec l'augmentation de la fréquence, de la fraction d'indium et de la longueur d'onde.

III.3.1.1 Effet de la fraction d'indium sur la densité de photocourant en fonction du logarithme de la fréquence :

Les figures (III-7) et (III-8) représentent l'évolution de la densité de photocourant pour différentes valeurs de la fraction d'indium et de la longueur d'onde en fonction de la fréquence.

✚ Pour différentes valeurs de la fraction x

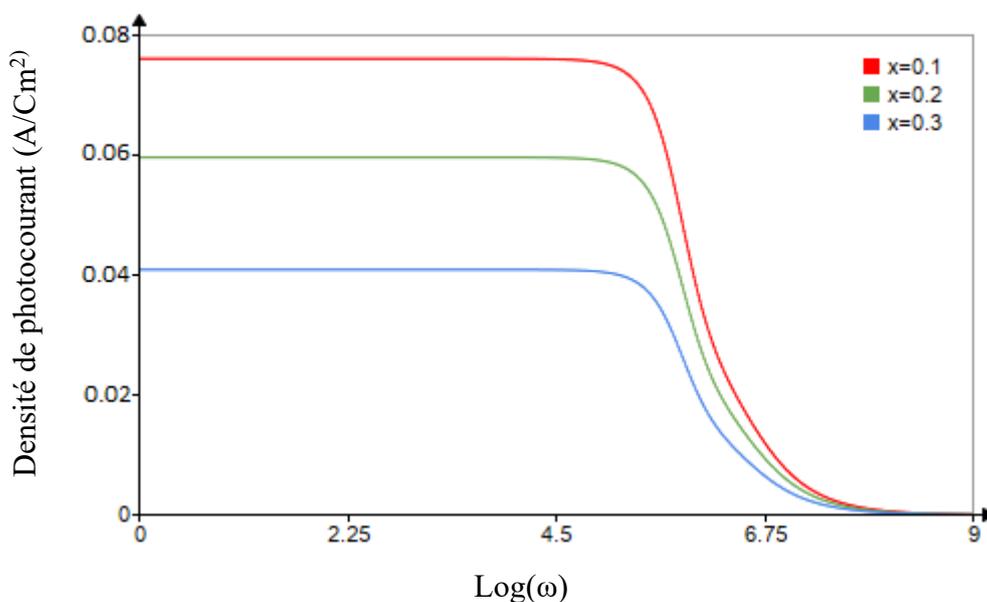


Figure (III-7) : Densité de photocourant en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la fraction d'indium x ($H = 3 \mu\text{m}$, $S_b = S_f = 2.10^2 \text{cm/s}$, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$).

✚ Pour différentes valeurs de la longueur d'onde

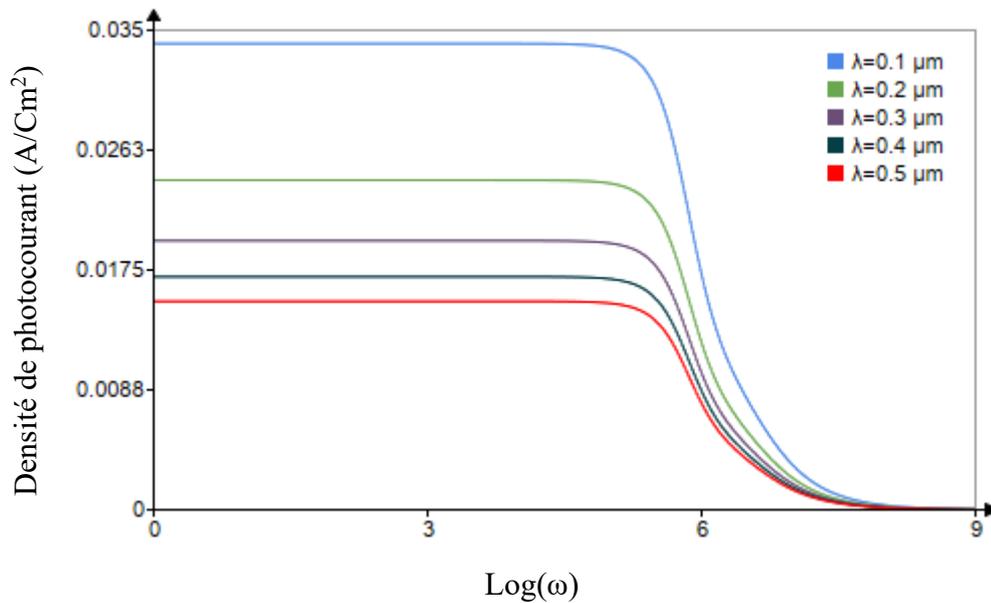


Figure (III-8): Densité de photocourant en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la longueur d'onde λ ($H=3\mu\text{m}$, $S_b=S_f=2.10^2\text{ cm/s}$, $x=0,3$).

Les figures (III-7) et (III-8) ci-dessus montrent que la densité de photocourant atteint sa valeur maximale et reste constante pour les faibles valeurs de la fréquence (de 0 à 5,5 cm/s), ce qui est assimilable à l'état statique. Pour les grandes valeurs de la fréquence (au-delà de 5,5 cm/s), la densité de photocourant diminue progressivement jusqu'à s'annuler. On note également que la valeur maximale de la densité de photocourant est plus considérable avec les petites valeurs de la fraction d'indium et de la longueur d'onde. En somme une augmentation de la fraction d'indium ainsi que la longueur d'onde entraînent une diminution de la valeur maximale du photocourant.

III.3.2 Etude de photocourant de court-circuit

Les figures (III-9), (III-10) et (III-11) représentent le courant de court en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de la fréquence, de la fraction d'indium et de la longueur d'onde.

III.3.2.1 Effet de la fréquence de modulation sur le photocourant de court-circuit :

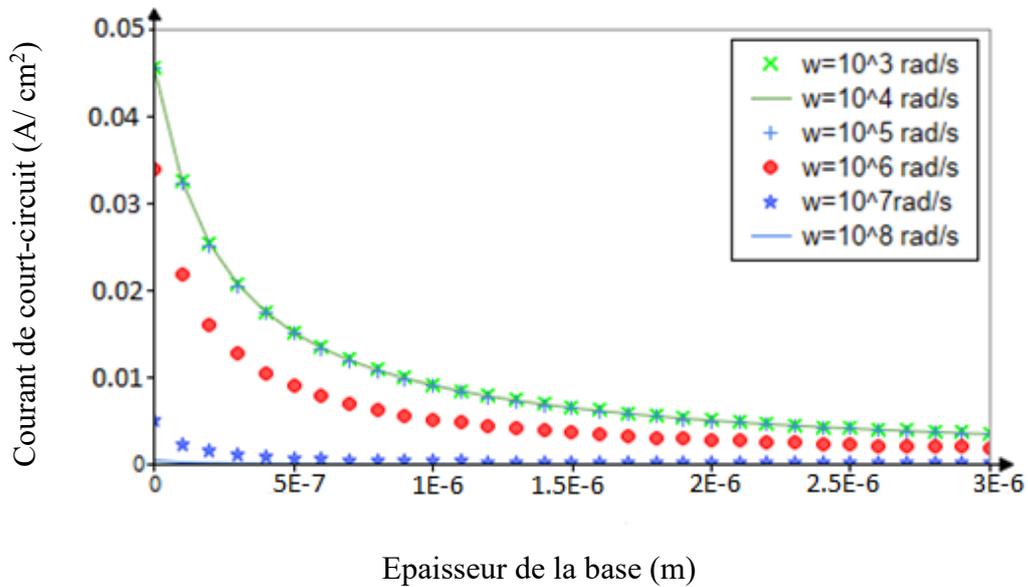


Figure (III-9) : Courant de court-circuit en fonction de la profondeur H pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($S_b = 2.10^2$ cm/s, $S_f = 3.10^3$ cm/s $x = 0,3$ $\lambda = 0,5\mu\text{m}$).

III.3.2.2 Effet de la fraction d'indium sur le courant de court-circuit :

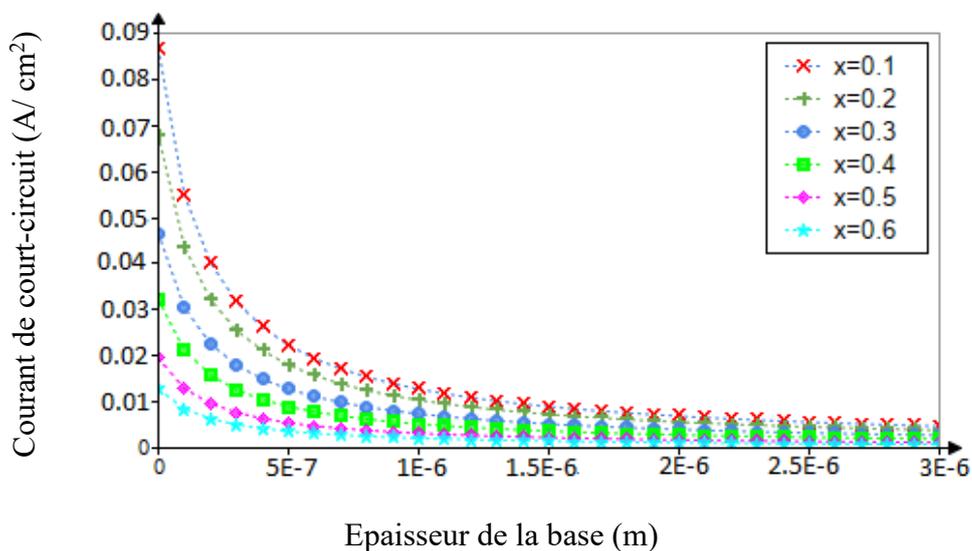


Figure (III-10) : Courant de court-circuit en fonction de la profondeur H pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($S_f = 3.10^3$ cm/s, $S_b = 2.10^2$ cm/s, $\lambda = 0,5\mu\text{m}$, $\omega = 10^5$ rad/s)

Effet de la longueur d'onde sur le courant de court-circuit :

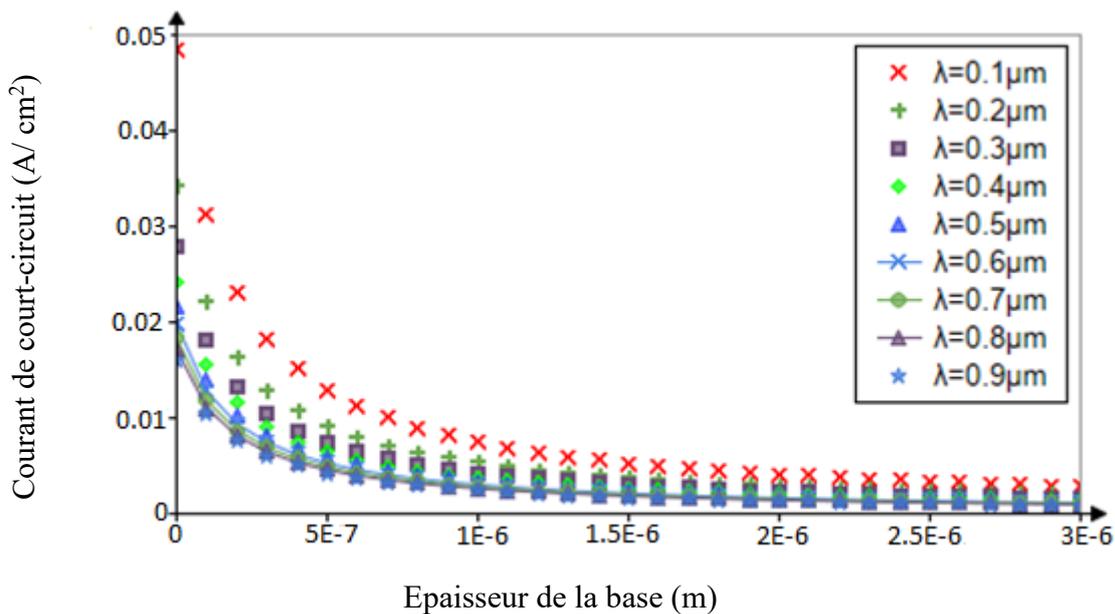


Figure (III-11) : Courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f = 3.10^3\text{cm/s}$, $S_b = 2.10^2\text{cm/s}$, $x = 0,3$, $\omega = 10^5\text{ rad/s}$).

On note sur les figures (III-9) , (III-10) et (III-11) que le courant de court-circuit diminue avec des petites valeurs de l'épaisseur de la base jusqu'à atteindre une certaine valeur, puis deviennent constante avec les grandes valeurs de l'épaisseur. Nous remarquons également que le courant de court-circuit diminue considérablement avec l'augmentation de la fréquence, de la fraction d'indium et de la longueur d'onde. Et cette diminution est beaucoup plus remarquable avec les petites valeurs de l'épaisseur.

III.3.3 Etude de la phototension en circuit-ouvert

Les figures (III-12), (III-13) et (III-14) représentent l'évolution de la phototension de circuit-ouvert en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs de la fréquence, de la fraction et de la longueur d'onde.

III.3.3.1 Effet de la fréquence de modulation sur la phototension en circuit ouvert :

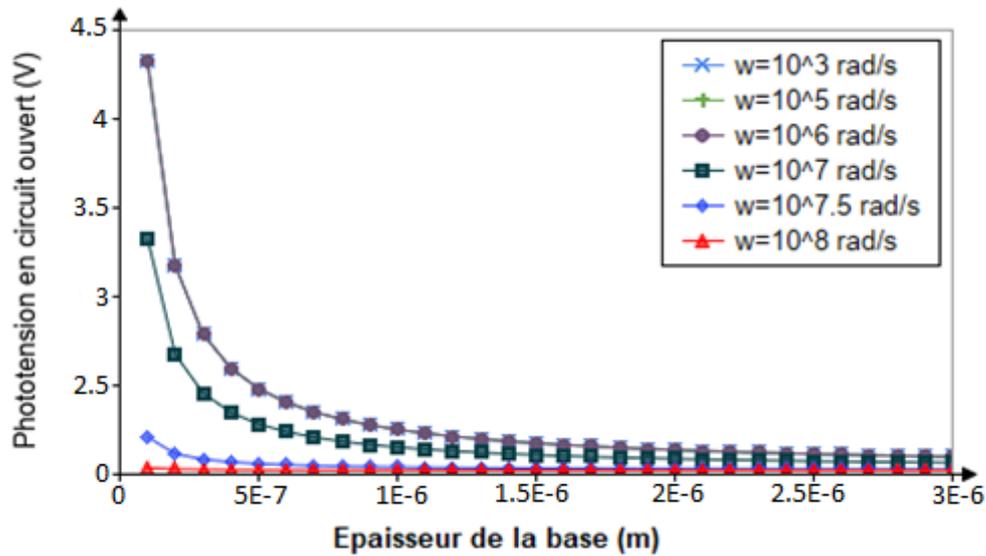


Figure (III-12) : Phototension en circuit-ouvert en fonction de la profondeur z pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($S_f = 3.10^3 \text{ cm/s}$, $S_b = 2.10^2 \text{ cm/s}$, $x = 0,3$, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$)

III.3.3.2 Effet de la fraction d'indium sur la phototension en circuit ouvert :

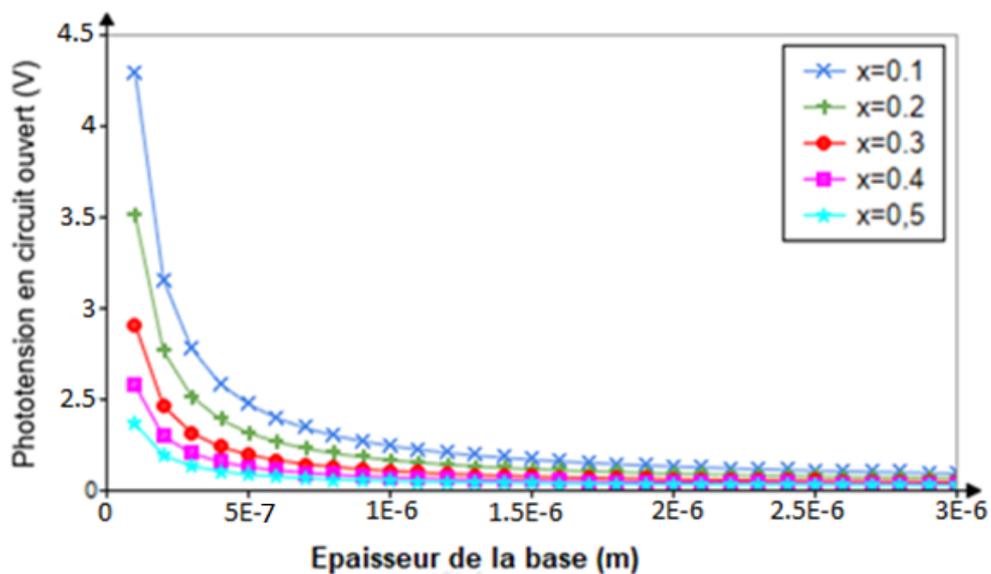


Figure (III-13): Phototension en circuit ouvert en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($S_f = 3.10^3 \text{ cm/s}$, $S_b = 2.10^2 \text{ cm/s}$, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, $\omega = 10^5 \text{ rad/s}$) .

III.3.3.3 Effet de la longueur d'onde sur la phototension en circuit ouvert :

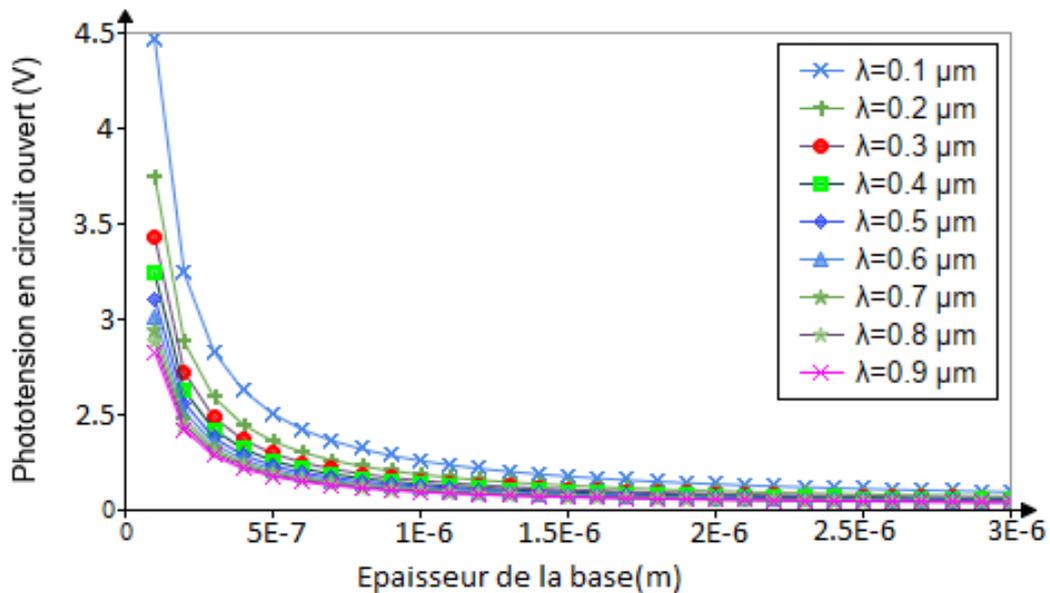


Figure (III-14): Phototension en circuit ouvert en fonction de l'épaisseur pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_f=3.10^3$ cm/s, $S_b = 2.10^2$ cm/s, $x = 0,3$, $\omega = 10^5$ rad/s).

Nous pouvons remarquer sur les figures (III-13), (III-4) et (III-5) que la tension en circuit ouvert décroît avec l'épaisseur et cette décroissance est très sensible pour les petites valeurs de l'épaisseur. Ici on peut noter sur la figure (III-12) que les petites fréquences influent très peu sur la tension en circuit ouvert car pour une fréquence de 10^3 rad/s, 10^4 rad/s et 10^5 rad/s on a des courbes confondues.

Par contre au-delà des grandes fréquences (fréquences supérieures ou égale à 10^7 rad/s) la phototension diminue drastiquement jusqu'à s'annuler.

On remarque également sur la figure (III-13) que plus la fraction d'indium augmente, plus la diminution de la phototension en circuit ouvert devient remarquable. Donc la croissance de la fraction d'indium entraîne une diminution de la phototension en circuit ouvert.

Et pour finir la figure (III-14) on peut voir qu'une augmentation de la longueur d'onde entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert.

III.3.4 Etude de la Caractéristique Courant-tension :

La caractéristique courant-tension est obtenue par la représentation de la densité de photocourant en fonction de la phototension. La photopile idéale fonctionne en situation de court-circuit et le photocourant de court-circuit est un palier horizontal constant pour les faibles valeurs de la tension.

En situation de circuit ouvert, ce photocourant tend vers zéro, ce qui se traduit par une phototension de circuit ouvert qui se présente comme un palier vertical pour les faibles valeurs du photocourant.

III.3.4.1 Effet de la fréquence, de la fraction d'indium sur la caractéristique courant tension :

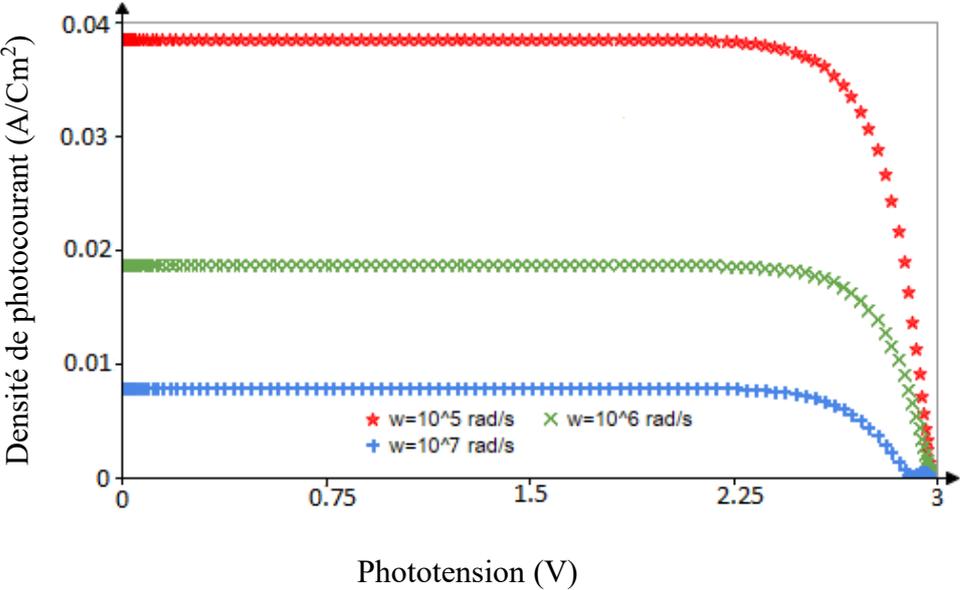


Figure (III-15): Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la fréquence ($S_b = 2.10^2$ cm/s, $\lambda = 0,5\mu\text{m}$, $\omega = 10^5$ rad/s, $x = 0,3$)

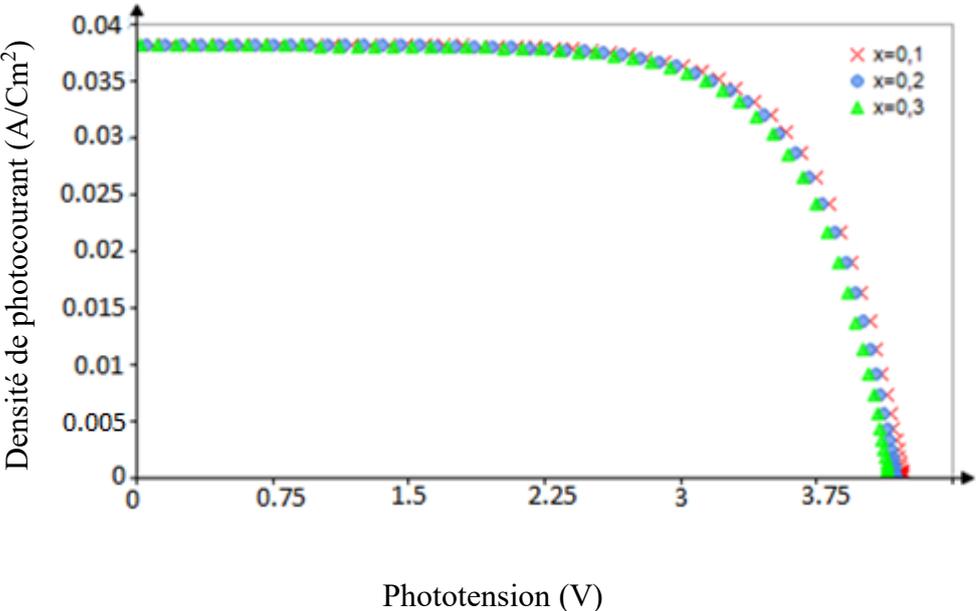


Figure (III-16): Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($S = 2.10^2$ cm/s, $\lambda=0,5\mu\text{m}$, $\omega=10^5$ rad/s).

Effet de la longueur d'onde sur la caractéristique courant tension :

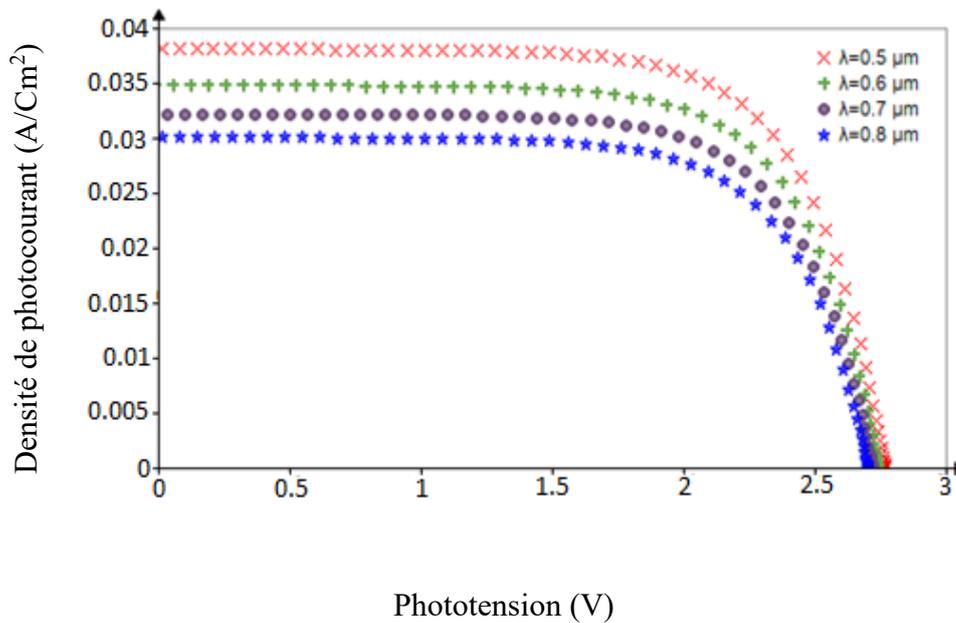


Figure (III-17): Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($S_b = 2.10^2$ cm/s, $x = 0,3$, $\omega = 10^5$ rad/s).

Sur la caractéristique courant-tension, on remarque que le module du photocourant est maximal et presque constant pour les faibles valeurs du module de la phototension, ce qui correspond au courant de court-circuit. Ce module commence à diminuer sensiblement à partir d'une certaine valeur de la tension. Le module de la phototension est maximal pour les plus faibles valeurs du photocourant ce qui correspond à la tension de circuit ouvert.

De ces courbes on voit que le courant de court-circuit varie avec la fréquence, la fraction d'indium et la longueur d'onde : le module du photocourant ainsi que la phototension diminue quand la fréquence, la fraction d'indium, et la longueur d'onde augmente. On remarque aussi une région de courbure sur ces figures qui correspond à la puissance maximale fournie par la photopile.

III.3.5 Effet de la fréquence de modulation sur la Puissance :

La figure (III-18) représente la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence.

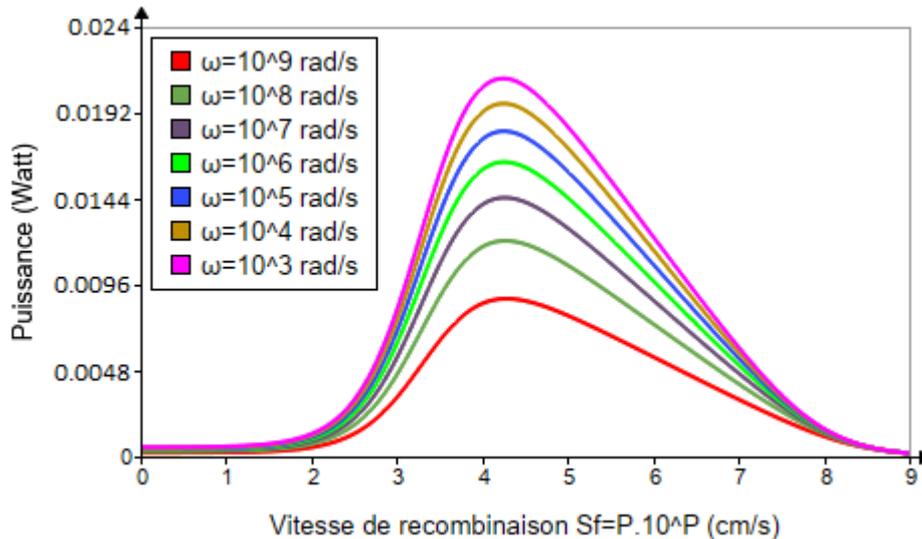


Figure (III-18): La puissance en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($H = 3\mu\text{m}$, $\lambda = 0,5\mu\text{m}$, $x = 0,3$, $S_b = 2.10^2\text{cm/s}$).

Ces profils de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison S_f peut être analysé suivant trois axes :

- ✚ Pour des valeurs de S_f compris entre 0 et 2.10^2 cm/s la puissance est quasi-nulle cela peut être expliqué par le fait qu'à cette plage de vitesse, la densité de photocourant est faible voire nulle en raison de la proximité avec le circuit-ouvert. [26]
- ✚ De 3.10^2 à 4.10^4 cm/s la puissance croit progressivement jusqu'à atteindre sa valeur maximale qui correspond à la puissance maximale de la photopile.
- ✚ Et au-delà 4.10^4 cm/s la puissance subit une forte diminution jusqu'à s'annuler complètement. Cela peut être expliqué par le fait que lorsque la photopile est en point de fonctionnement de court-circuit, la tension aura tendance à tendre vers une valeur nulle. [34]

On remarque également que la valeur maximale de la puissance diminue avec la fréquence. Donc on peut affirmer qu'une augmentation de la fréquence entraîne une diminution de la puissance.

III.3.6 La puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la fraction d'indium

La figure (III-19) représente la variation de la puissance en fonction de la phototension pour différentes valeurs de x .

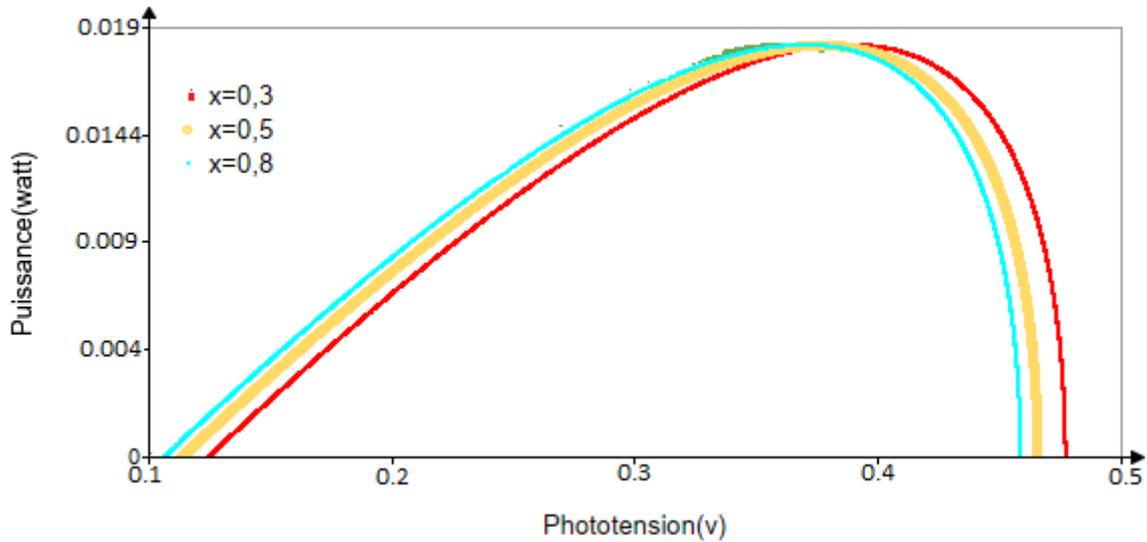


Figure (III-19) : La puissance en fonction de phototension pour différentes valeurs de la fraction d'indium ($H = 3\mu\text{m}$, $\lambda = 0,5\mu\text{m}$, $S_b = 2.10^2\text{cm/s}$).

La figure (III-19) montre que la puissance varie linéairement avec la phototension jusqu'au voisinage de la valeur maximale de la puissance. Cette dernière diminue jusqu'à s'annuler lorsque la phototension tend vers son circuit ouvert.

On note également que la puissance qui est fonction de la phototension décroît avec l'augmentation de la fraction d'indium entraînant ainsi une régression de la qualité de la photopile.

III.3.7 Profil de la résistance série et la résistance shunt :

Les figures (III-20) et (III-21) représentent la variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence.

III.3.7.1 Effet de la modulation de fréquence sur la résistance série :

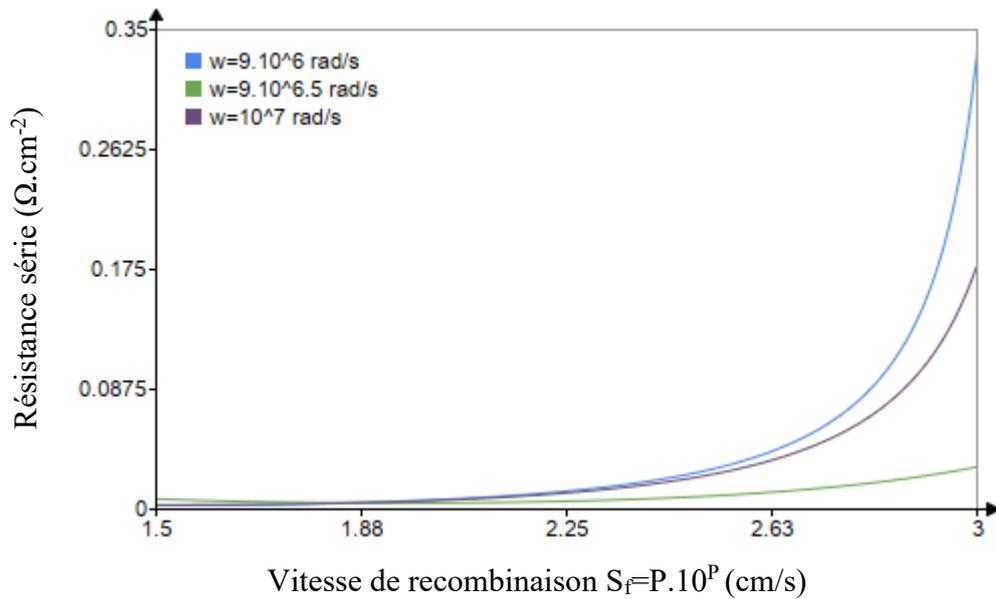


Figure (III-20): Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ($H = 3\mu\text{m}$, $x = 0,3$, $\lambda = 0,5\mu\text{m}$).

III.3.7.2 Effet de la longueur d'onde sur la résistance série :

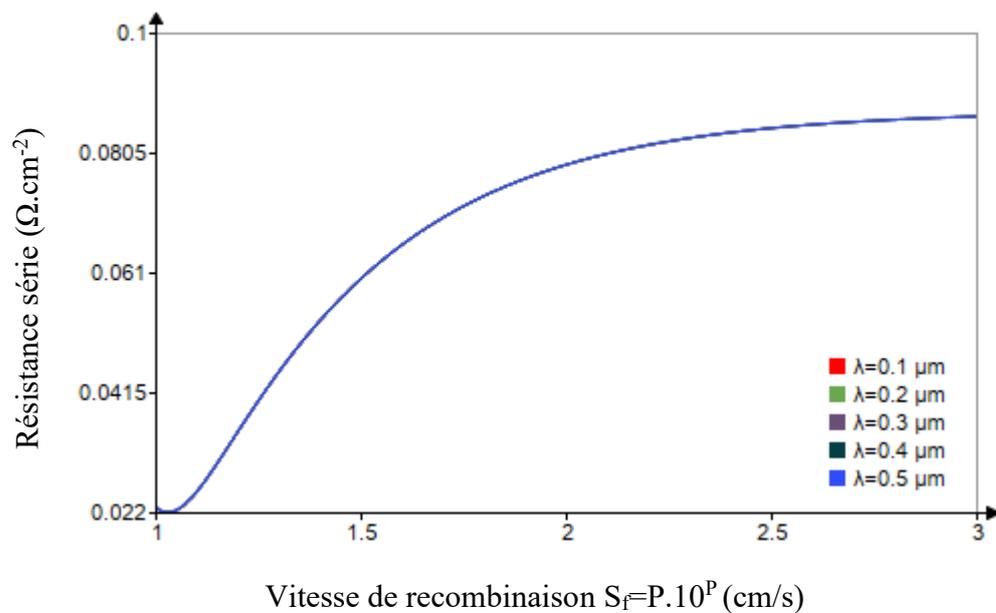


Figure (III-21): Résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($H = 3\mu\text{m}$, $x = 0,3$, $\omega = 10^5$ rad/s).

Nous remarquons que la résistance Série est une fonction croissante de la vitesse de recombinaison et une fonction décroissante de la fréquence. Cette décroissance de la résistance série a pour conséquence une diminution de la chute de tension ohmique donc une augmentation de la phototension délivrée à la charge extérieure [35].

Pour la figure (III-21) on note que la résistance Série augmente progressivement avec la vitesse de la recombinaison. On note également que l'augmentation de la longueur d'onde n'a aucun effet sur la résistance série car même pour différente valeur de la longueur d'onde les courbes restent toujours confondues.

III.3.8 Etude de la résistance shunt

Les figures (III-22), (III-23) et (III-24) représentent la variation de la résistance shunt pour différentes valeurs de la fréquence, de la longueur d'onde et de la fraction en fonction de la vitesse de recombinaison.

III.3.8.1 Effet de la fréquence de modulation sur la résistance shunt :

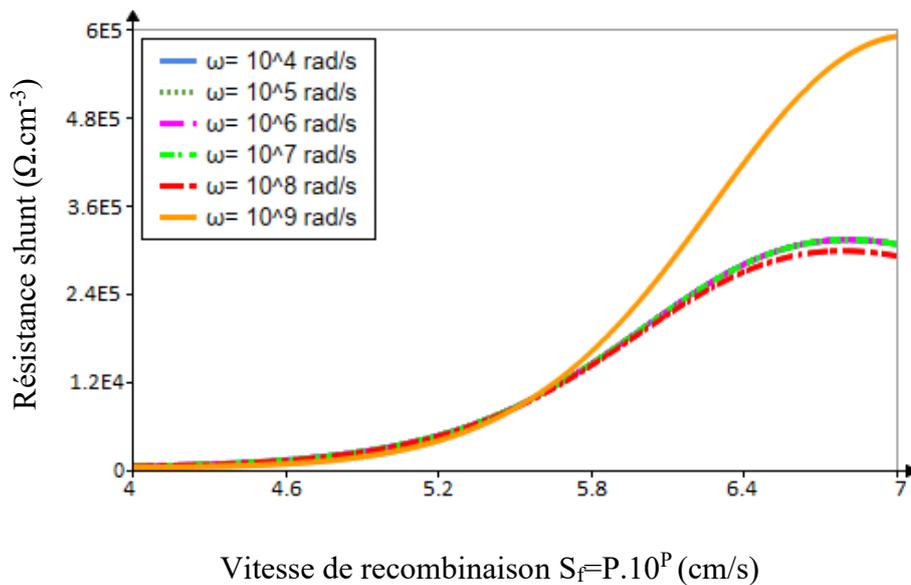


Figure (III-22): Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence de modulation($H = 3\mu\text{m}$, $x = 0,3$, $\lambda = 0,5\mu\text{m}$)

L'analyse de cette figure montre que la résistance shunt est une fonction croissante de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la fréquence. Cette croissance est visible avec des vitesses de recombinaison supérieure à 5.10^5 cm/s. L'augmentation de la résistance shunt avec la vitesse

de recombinaison à la jonction et la fréquence aura pour conséquence une augmentation de la densité de photocourant délivrée par la photopile à une charge extérieure.

L'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction entraîne une croissance des porteurs (électrons) traversant la jonction pour participer au photocourant.

On note également du circuit équivalent de la photopile qu'une augmentation de la résistance shunt permet de réduire le courant de fuite et permet donc d'obtenir un photocourant important.

III.3.8.2 Effet de la fraction d'indium sur la résistance shunt :

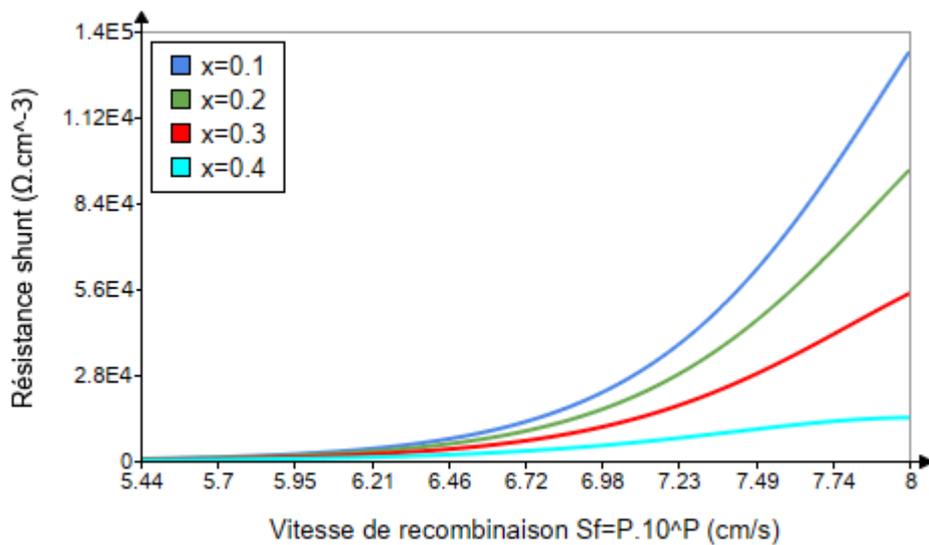


Figure (III-23): Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison Sf pour différentes valeurs de la fraction d'indium x ($H = 3 \mu\text{m}$, $x = 0,3$, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, $\omega = 10^5 \text{rad/s}$)

Pour la figure (III-23), on constate que la résistance shunt est quasi nulle pour des faibles vitesses de recombinaison ($Sf < 6 \cdot 10^6$ cm/s). Au-delà de $6 \cdot 10^6$ cm/s , la résistance shunt subit une forte croissance. La croissance de la résistance shunt est plus remarquable avec les petites valeurs de la fraction d'indium. En somme quand la fraction d'indium augmente, la résistance shunt diminue.

III.3.8.3 Effet de la longueur d'onde sur la résistance shunt :

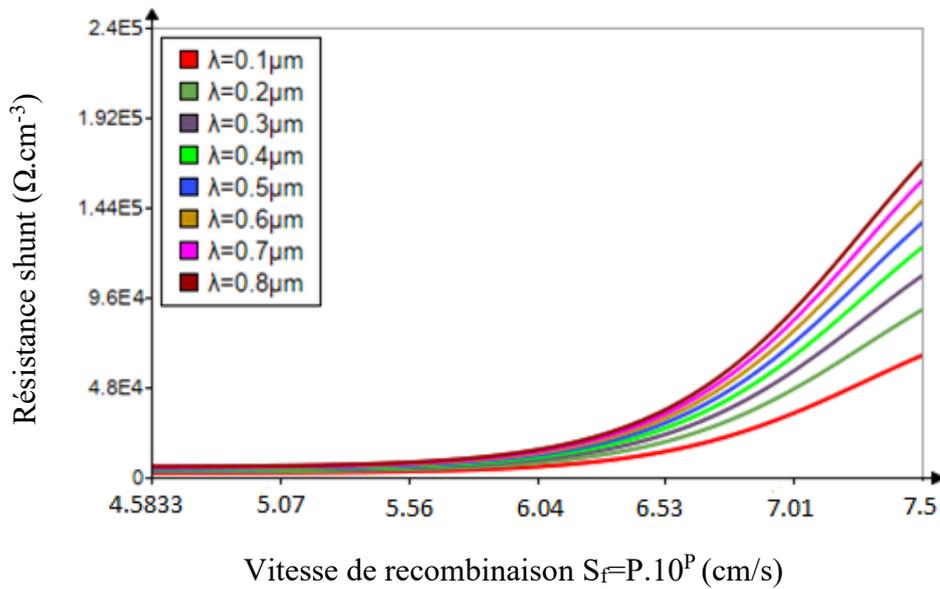


Figure (III-24): Résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la longueur d'onde ($H = 3 \mu\text{m}$, $x = 0,3$, $\omega = 10^5 \text{ rad/s}$, $S_b = 2 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$)

Pour la figure (III-24), on constate que la résistance shunt est constante à une valeur pour des faibles vitesses de recombinaison ($S_f < 5 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$). Au-delà de $6 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ la résistance shunt subit une forte croissance. Cette croissance est beaucoup plus marquée avec les grandes valeurs de la longueur d'onde. En somme, quand la longueur d'onde augmente, la résistance shunt augmente également.

III.3.9 Effet de la fréquence de modulation sur la capacité de diffusion :

La figure (III-25) montre l'évolution de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de la fréquence.

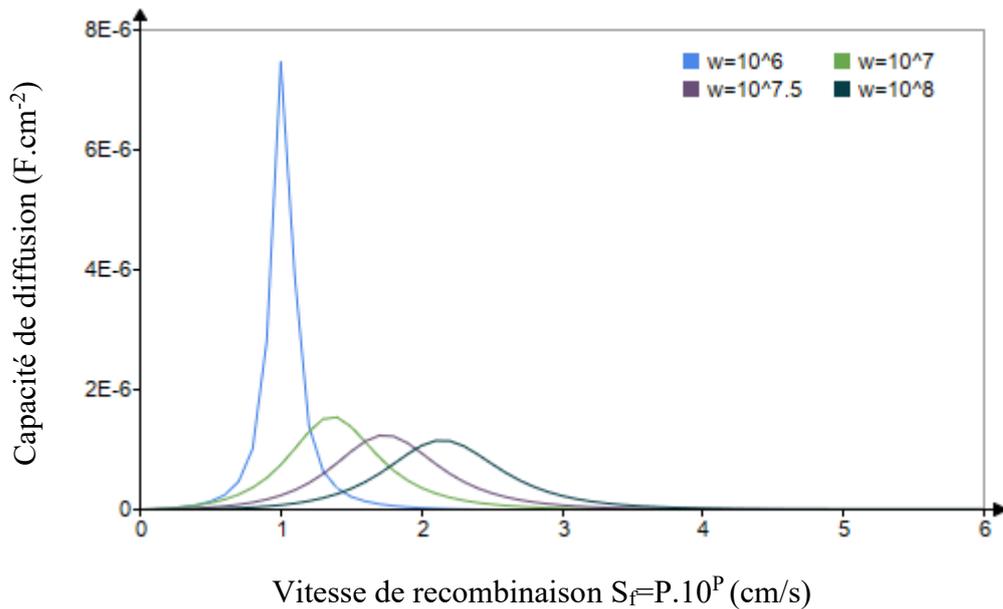


Figure (III-25): Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la fréquence de modulation

Sur ces profils représentant la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison, on remarque que la capacité est nulle pour les faibles vitesses de recombinaison. Pour des vitesses de recombinaison intermédiaire de [1 à $3 \cdot 10^3$] cm/s, la capacité subit une forte croissance jusqu'à atteindre une valeur maximale et diminue jusqu'à s'annuler complètement au-delà de cet intervalle de vitesse. Cette dernière est également sensible à la fréquence de modulation car elle diminue quand la fréquence augmente.

III.3.10 Etude de la capacité de diffusion :

III.3.10.1 Effet de la fraction d'indium sur la capacité de diffusion :

La figure (III-26) ci-après illustre l'évolution de la capacité de la photopile en fonction du logarithme de la fréquence pour différentes valeurs de la fraction d'indium.

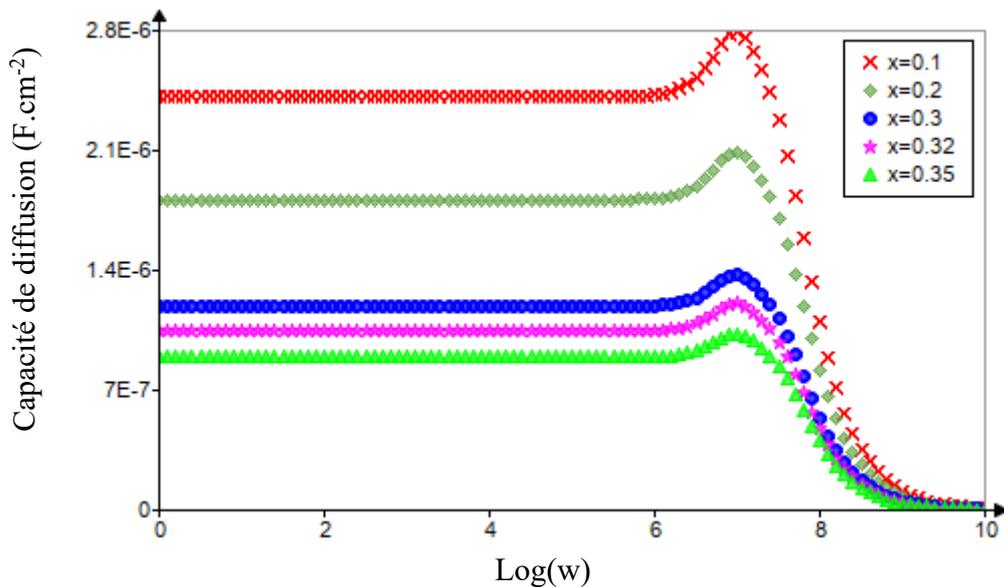


Figure (III-26): La capacité de diffusion en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la fraction d'indium x ($\lambda = 0.5 \mu m$, $H = 3 \mu m$, $S_b = S_f = 2.10^2 cm/s$, $x = 0,3$)

III.3.10.2 Effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion :

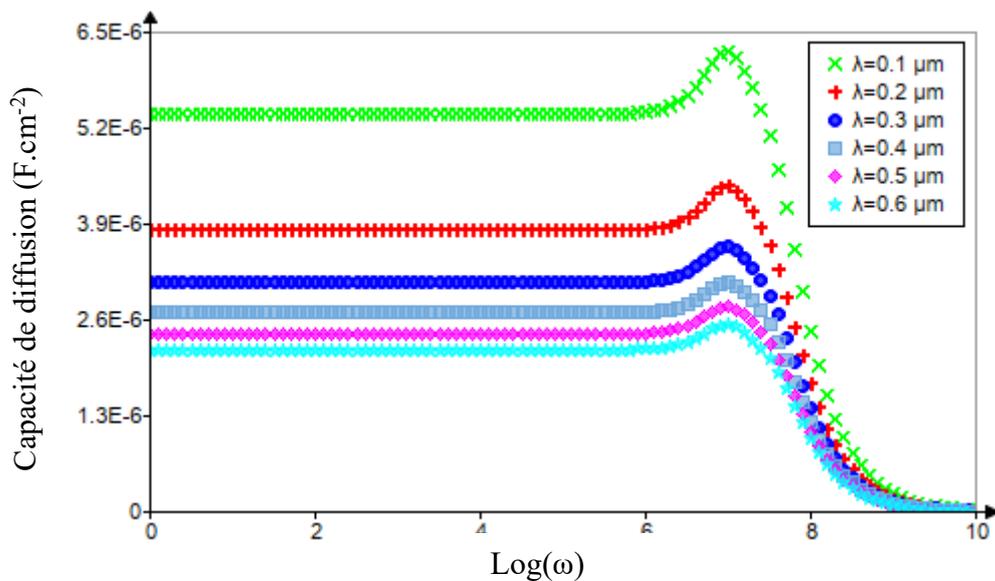


Figure (III-27) : La capacité de diffusion en fonction du logarithme de la pulsation pour différentes valeurs de la Longueur d'onde λ ($H = 3 \mu m$, $S_f = 6.10^6 cm/s$, $S_b = 2.10^2 cm/s$, $x = 0,3$)

Pour les figures (III-26) et (III-27) nous pouvons remarquer que la capacité de diffusion présente un palier pour les faibles valeurs de la fréquence (circuit-ouvert) de $[0 \text{ à } 10^5]$ cm/s et décroît progressivement jusqu'à s'annuler au-delà de cet intervalle pour les grandes valeurs de la fréquence (court-circuit).

Toutefois, nous constatons que l'amplitude de la capacité de la photopile, pour un point de fonctionnement différent du court-circuit, diminue lorsque la longueur d'onde augmente.

Également plus la longueur d'onde augmente, plus la situation en circuit ouvert persiste.

On note également que la valeur maximale de la capacité est sensible à l'augmentation de la fraction et de la longueur d'onde. Une augmentation de ces dernières entraîne la diminution de la valeur maximale de la capacité.

III.4 La méthodologie d'optimisation :

L'objectif de la simulation numérique dans notre travail, est l'optimisation des différentes paramètres électriques de notre photopile. Optimiser un dispositif consiste à identifier une configuration optimale, ou un optimum de fonctionnement de ce dispositif. Dans notre cas, il s'agit de déterminer les performances optimales de notre photopile et de mettre en évidence les paramètres qui impactent le plus fortement ces performances. Notre démarche d'optimisation consiste en deux étapes :

- 1) Identifier les variables d'optimisation, c'est-à-dire les paramètres de la photopile sur lesquels il est possible d'agir afin d'améliorer ces performances.
- 2) Trouver une méthode d'optimisation adaptées à notre problème.

III.4.1 Optimisation de la photopile à base $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$:

Notre approche consiste à simuler le rendement de notre photopile pour une longueur d'onde λ égale à $0,5 \mu\text{m}$ et $0,9 \mu\text{m}$ en fonction de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence. Cette méthode va nous permettre d'avoir les valeurs de la fraction d'indium et de la fréquence où le rendement est maximal. Ainsi nous allons utiliser ces valeurs pour pouvoir déterminer les paramètres optimaux de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence et pour différentes longueurs d'onde, puis nous en déduisons les paramètres optimaux du photocourant de court-circuit, de tension en circuit ouvert, des résistances shunt et série de notre photopile.

III.4.1.1 Profils du rendement en fonction de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence

Les figure (III-28) et (III-29) représente la variation du rendement de la photopile pour différentes valeurs de la fréquence :

✦ Pour une longueur d'onde $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$:

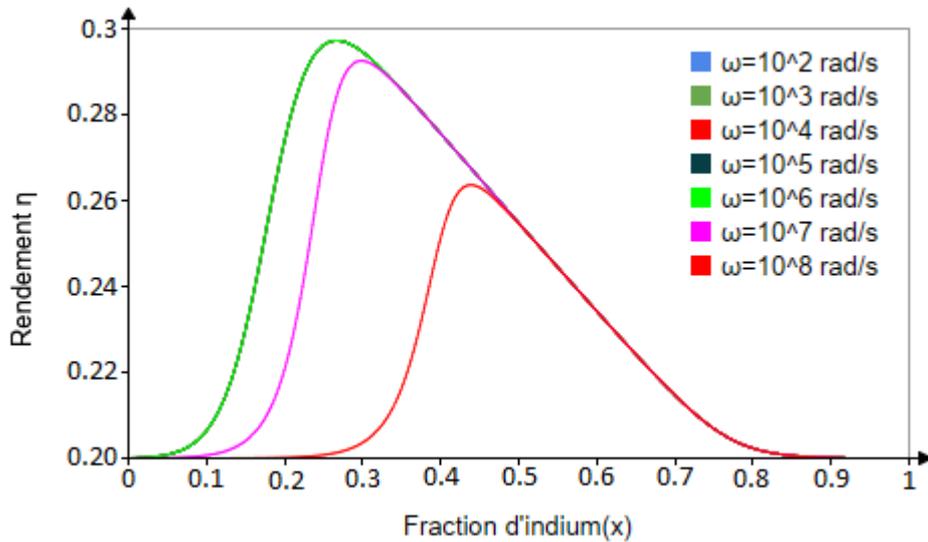


Figure (III-28) : Le rendement de la photopile en fonction de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence ($\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, $H = 3 \mu\text{m}$, $S_f = 6.10^6 \text{cm/s}$, $S_b = 2.10^2 \text{cm/s}$.)

✦ Pour une longueur d'onde $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$

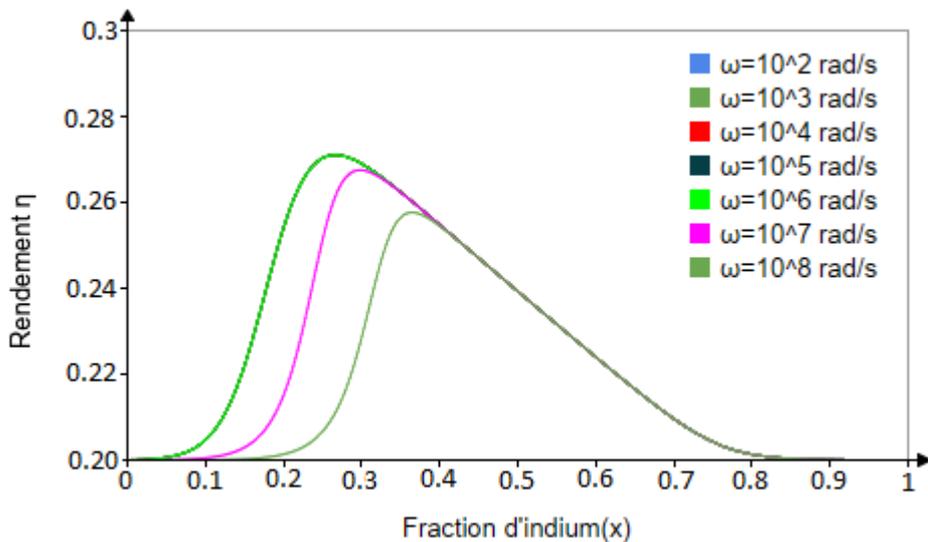


Figure (III-29) : Le rendement de la photopile en fonction de la fraction d'indium pour différentes valeurs de la fréquence ($\lambda = 0,9 \mu\text{m}$, $H = 3 \mu\text{m}$, $S_f = 6.10^6 \text{cm/s}$, $S_b = 2.10^2 \text{cm/s}$.)

Les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux III-2 et III-3 suivants.

Tableau (III-2) : Valeurs optimales de la photopile pour $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$

$\omega(\text{rad/s})$	X_{opt}	$J_{\text{ccopt}}(\text{A/cm}^2)$	$V_{\text{c0opt}}(\text{V})$	$R_{\text{shopt}}(\Omega.\text{cm}^3)$	$R_{\text{Sopt}}(\Omega.\text{cm}^2)$	$\eta(\%)$
De 10^2 à 10^6	0,28	0,071	3,8	$8,5.10^4$	0,3	28,7
10^7	0,30	0,048	3,6	$5,5.10^4$	0,26	28,6
10^8	0,44	0,033	2,7	$2,6.10^4$	0,18	26,3

Tableau (III-3) : Valeurs optimales de la photopile pour $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$

$\omega(\text{rad/s})$	X_{opt}	$J_{\text{ccopt}}(\text{A/cm}^2)$	$V_{\text{c0opt}}(\text{V})$	$R_{\text{shopt}}(\Omega.\text{cm}^3)$	$R_{\text{Sopt}}(\Omega.\text{cm}^2)$	$\eta(\%)$
De 10^2 à 10^6	0,26	0,061	3,1	$4,5.10^4$	0,28	26,6
10^7	0,31	0,035	2,8	$2,7.10^4$	0,20	26,4
10^8	0,36	0,022	1,7	$1,6.10^4$	0,10	26,3

Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons simulé l'effet de la fréquence de modulation, de la fraction d'indium et de la longueur d'onde sur les différents paramètres électriques de la photopile. Et on s'est rendu compte que ces dernières impactent positivement pour certains les performances de la photopile comme le coefficient de diffusion pour la fraction d'indium x , la résistance série pour la fréquence et la résistance shunt pour la longueur d'onde et négativement pour d'autres.

Dans le but d'optimiser les paramètres électriques de la photopile, nous avons simulé le rendement de cette dernière en fonction de la fraction pour différentes valeurs de la fréquence et longueurs d'onde.

Ainsi pour des longueurs d'ondes égales à $0,5\mu\text{m}$ et $0,9 \mu\text{m}$ nous avons obtenu respectivement des valeurs optimales de la fraction d'indium x_{opt} égale à 0,28 et 0,26 qui correspondent à des rendements respectives $\eta(\%)$ égale à 28,6 et 26,6, pour des fréquence comprise entre 10^2 et 10^6 rad.s^{-1}

Au-delà de cette fréquence de 10^6 rad.s^{-1} , la fraction d'indium optimale augmente correspondant à une diminution du rendement optimal.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté dans ce travail une modélisation et une optimisation d'une photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en régime dynamique fréquentiel.

Nous avons commencé par présenter une étude bibliographique sur la généralité, la physique des cellules photovoltaïques et une étude détaillée sur le nitrure de Gallium indium (InGaN) dans l'optique de mieux comprendre le principe de fonctionnement et l'architecture des cellules photovoltaïques. Cette étude bibliographique permet également de comprendre la particularité des matériaux de type III-V comme le nitrure de gallium indium et leur utilisation dans le domaine du photovoltaïque.

Le travail que nous avons réalisé a permis d'établir une nouvelle expression de la longueur et du coefficient de diffusion complexe qui dépend à la fois de la fraction d'indium et de la modulation de fréquence. Ainsi à partir de la résolution analytique de l'équation de continuité et des résultats de la simulation nous avons présenté l'influence de la modulation de fréquence, de la fraction d'indium et de la longueur d'onde sur le coefficient de diffusion, la densité de photocourant, la phototension, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert etc...

Il ressort, des résultats de la simulation que l'augmentation de la fraction d'indium impacte positivement le coefficient de diffusion en augmentant sa valeur maximale dans le cas où la photopile est illuminée avec une lumière de courte longueur d'onde. Dans le cas contraire le coefficient de diffusion diminue quand la fraction d'indium augmente.

L'augmentation de la fraction d'indium, de la fréquence et de la longueur d'onde ont un effet négatif sur la densité de photocourant, la phototension, le photocourant de court-circuit, la tension en circuit-ouvert, la caractéristique courant-tension et la résistance shunt. Elle contribue à la diminution des valeurs maximale de ces dernières.

Enfin l'optimisation que nous avons réalisée, a permis de déterminer l'ensemble des valeurs optimales de la fraction d'indium dans le but de pouvoir déduire les paramètres électriques optimums de la photopile. Ainsi pour des fréquence comprise entre 10^2 et 10^6 rad.s^{-1} nous avons respectivement pour des longueurs d'ondes égales à $0,5\mu\text{m}$ et $0,9\mu\text{m}$ des valeurs optimales de la fraction d'indium x_{opt} égale à 0,28 et 0,26 qui correspondent à des rendements respectives $\eta(\%)$ égale à 28,6 et 26,6.

Pour la fraction optimale d'indium de 0,28 et un rendement $\eta(\%) = 28,6$, on a les paramètres optimaux de la photopile suivant : $J_{cc_{opt}}(\text{A/cm}^2) = 0,071$, $V_{co_{opt}}(\text{V}) = 3,8$, $R_{sh_{opt}} (\Omega.\text{cm}^3) = 8,5.10^4$ et $R_{s_{opt}} (\Omega.\text{cm}^2) = 0,30$.

Et pour la fraction optimale d'indium de 0,26 et un rendement $\eta (\%) = 26,6$, nous avons les différents paramètres optimaux de la photopile suivant : $J_{cc_{opt}}(\text{A/cm}^2) = 0,061$, $V_{co_{opt}}(\text{V}) = 3,1$, $R_{sh_{opt}} (\Omega.\text{cm}^3) = 4,5.10^4$ et $R_{s_{opt}} (\Omega.\text{cm}^2) = 0,28$.

De ces résultats, on note que les paramètres électriques optimaux de la photopile sont plus intéressants avec une longueur d'onde égale à $0,5 \mu\text{m}$ qu'avec une longueur d'onde égale à $0,9 \mu\text{m}$.

Pour la suite de ce travail, il serait intéressant de :

- ✚ De reprendre ce travail en faisant une modélisation en trois dimensions de la photopile en régime dynamique fréquentiel.
- ✚ De faire une modélisation qui tiendra compte de la présence d'un champ (électrique ou magnétique).
- ✚ De faire une étude similaire sur l'influence de la température et du taux de dopage sur une photopile à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

Bibliographies:

- [1] « British Petroleum. BP statistical review of world energy. London: British Petroleum, 2017. 1 ».
- [2] « I. S. E. Fraunhofer. Photovoltaics report. Fraunhofer ISE, Freiburg, 2017. 1, 12, 13, 15 ».
- [3] « Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 48). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 24(7) :905–913, July 2016. 1, 2, 14, 15, 16, 17, 89, 90, 110, 111 ».
- [4] « William Shockley and Hans J. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of applied physics*, 32(3) :510–519, 1961. 1 ».
- [5] A. G. Bhuiyan, K. Sugita, A. Hashimoto, et A. Yamamoto, « InGaN Solar Cells: Present State of the Art and Important Challenges », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 2, n° 3, p. 276-293, juill. 2012, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2193384.
- [6] « Photovoltaics Report - Fraunhofer ISE ». <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html> (consulté le 31 décembre 2022).
- [7] « Le photovoltaïque », *Terre Solaire*. <https://terresolaire.com/comprendre-le-solaire/photovoltaique/> (consulté le 31 décembre 2022).
- [8] « Effets photoélectrique et électroluminescent ». <https://www.printfriendly.com/p/g/XcWyc7> (consulté le 1 juin 2022).
- [9] « Yacine MAROUF , Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco , Mémoire de master soutenu publiquement le: 27/06/2013. ».
- [10] A. Adaine, « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d’InGaN », phdthesis, Université de Lorraine, 2018. Consulté le: 12 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01870260>
- [11] « Junqiao Wu. When group-III nitrides go infrared : New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*, 106(1) :5, 2009. 25, 32 ».
- [12] « GF Brown, JW Ager III, W Walukiewicz, and J Wu. Finite element simulations of compositionally graded InGaN solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(3) :478–483, 2010. 00089. 25, 26, 49, 50, 79 ».
- [13] « J. Wu and W. Walukiewicz. Band gaps of InN and group III nitride alloys. *Superlattices and Microstructures*, 34(1) :63–75, 2003. 52, 55 ».

- [14] « Omkar Jani, Ian Ferguson, Christiana Honsberg, and Sarah Kurtz. Design and characterization of GaN/InGaN solar cells. *Applied Physics Letters*, 91(13):132117, 2007. 33, 39 ».
- [15] « Chloe A. M. Fabien and W. Alan Doolittle. Guidelines and limitations for the design of high-efficiency InGaN single-junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130 :354–363, November 2014. 37, 39, 56, 79 ».
- [16] « Xiaobin Zhang, Xiaoliang Wang, Hongling Xiao, Cuibai Yang, Junxue Ran, Cuimei Wang, Qifeng Hou, Jinmin Li, and Zhanguo Wang. Theoretical design and performance of InGaN two-junction solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(24):245104, 2008. 37, 38, 39, 116, 122 ».
- [17] « Hsu. Modeling of InGaN/Si tandem solar cells. *Journal of Applied Physics*, 104(2):024507, July 2008. 38, 39 ».
- [18] C. J. Neufeld, N. G. Toledo, S. C. Cruz, M. Iza, S. P. DenBaars, et U. K. Mishra, « High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, n° 14, p. 143502, oct. 2008, doi: 10.1063/1.2988894.
- [19] Md. R. Islam, Md. R. Kaysir, Md. J. Islam, A. Hashimoto, et A. Yamamoto, « MOVPE Growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \sim 0.4$) and Fabrication of Homo-junction Solar Cells », *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 29, n° 2, p. 128-136, févr. 2013, doi: 10.1016/j.jmst.2012.12.005.
- [20] N. G. Young *et al.*, « High-performance broadband optical coatings on InGaN/GaN solar cells for multijunction device integration », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, n° 16, p. 163902, avr. 2014, doi: 10.1063/1.4873117.
- [21] Malick Ndiaye *et al.*, « CAPACITE DE DIFFUSION D'UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A MULTI-JONCTIONS VERTICALES CONNECTEES EN SERIE SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE:EFFET DU TAUX DOPAGE DE LA BASE ».
- [22] N. Honma, C. Munakata, et H. Shimizu, « Calibration of Minority Carrier Lifetimes Measured with an ac Photovoltaic Method », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 27, n° 7R, p. 1322, juill. 1988, doi: 10.1143/JJAP.27.1322.
- [23] A. Mandelis, « Coupled ac photocurrent and photothermal reflectance response theory of semiconducting $p-n$ junctions. I », *J. Appl. Phys.*, vol. 66, n° 11, p. 5572-5583, déc. 1989, doi: 10.1063/1.343662.
- [24] L. A. Kosyachenko, *Solar Cells - Dye-Sensitized Devices*. 2011. doi: 10.5772/1757.

- [25] Adaine, Abdoulwahab, « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN », *OpenAIRE - Explore*. https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____2592::eb5d62b954f81ac4a19264dcbb7d4edb (consulté le 31 décembre 2022).
- [26] « Ly, I, Lemrabott, O.H, Dieng, B, Gaye, I, Gueye, S, Diouf, M.S, Sissoko, G. (2012). Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique. *Revue des Energies Renouvelables*, (15), 187206. ».
- [27] F. B. Pelap, E. K. Tagne, et A. D. K. Kenfack, « Numerical Optimization of a Tandem Solar Cell based on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ », *J. Renew. Energ.*, vol. 24, n° 1, Art. n° 1, juin 2021, doi: 10.54966/jreen.v24i1.971.
- [28] A. Mesrane, F. Rahmoune, A. Mahrane, et A. Oulebsir, « Design and Simulation of InGaN p - n Junction Solar Cell », *Int. J. Photoenergy*, vol. 2015, p. 1-9, 2015, doi: 10.1155/2015/594858.
- [29] M. Nawaz et A. Ahmad, « A TCAD-based modeling of GaN/InGaN/Si solar cells », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 27, n° 3, p. 035019, mars 2012, doi: 10.1088/0268-1242/27/3/035019.
- [30] E. H. Ndiaye *et al.*, « Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation », *J. Appl. Math. Phys.*, vol. 03, n° 11, p. 1522-1535, 2015, doi: 10.4236/jamp.2015.311177.
- [31] G. Sahin, M. Dieng, M. A. O. E. Moujtaba, M. I. Ngom, A. Thiam, et G. Sissoko, « Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination », *J. Appl. Math. Phys.*, vol. 03, n° 11, p. 1536-1543, 2015, doi: 10.4236/jamp.2015.311178.
- [32] « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN », phdthesis, Université de Lorraine, 2018 - Recherche Google ». 8 (consulté le 31 décembre 2022).
- [33] Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable(GIRER). BP. 15003, Dakar, Senegal. *et al.*, « CAPACITE DE DIFFUSION DUNE PHOTOPILE AU SILICIUM A MULTI-JONCTIONS VERTICALES CONNECTEES EN SERIE SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE:EFFET DU TAUX DOPAGE DE LA BASE », *Int. J. Adv. Res.*, vol. 10, n° 04, p. 556-572, avr. 2022, doi: 10.21474/IJAR01/14584.

- [34] H. Diallo *et al.*, « Determination of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell », juin 2020.
- [35] O. SOW, I. ZERBO, S. Mbodji, M. I. NGOM, M. S. DIOUF and, et G. Sissoko, « SILICON SOLAR CELL UNDER ELECTROMAGNETIC WAVES IN STEADY STATE: ELECTRICAL PARAMETERS DETERMINATION USING THE I-V AND P-V CHARACTERISTICS october 2012 ».
- [36] Oumar DIA1, Mamadou Lamine BA1, Gora DIOP, Ibrahima DIATTA, Mor SARR, Mamadou WADE and Gregoire SISSOKO., « EFFET DE LENERGIE DIRRADIATION SUR LA RESISTANCE SERIE DANS UNE PHOTOPILE (N+/P/P+) AU SILICIUM A JONCTIONS VERTICALES SERIES », *Int. J. Adv. Res.*, vol. 9, n° 11, p. 985-997, nov. 2021, doi: 10.21474/IJAR01/13832.
- [37] « Mathcad : logiciel de calcul technique | Mathcad ». <https://www.mathcad.com/fr> (consulté le 1 janvier 2023).