



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electronique
Spécialité : système Embarqué

Réf. :

Présenté et soutenu par :
HARCH Leila

Le : dimanche 7 juillet 2019

Etude et simulation d'une cellule solaire à base de InGaN

Jury :

M.	TERGHINI Warda	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
M.	TOBBECHE souad	Pr	Université de Biskra	Président
M.	MEGHERBI mohamedlarbi	MCA	Université de Biskra	Examineur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electronique
Spécialité : système Embarqué

Réf. :

Présenté et soutenu par :

HARCH Leila

Le : dimanche 7 juillet 2019

Etude et simulation d'une cellule solaire à base de InGaN

Avis favorable de l'encadreur :

TERGHINI Warda

Signature

Avis favorable du Président du Jury :

TOBBECHE Souad

Signature

Cachet et signature

Dédicace

Je dédie ce travail en signe de respect

A mes très chers parents pour le soutien, l'amour, la

patience,

l'écoute, et la bonne humeur ;

A mes cher frères et sœurs ;

À tous mes amis et collègues.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser

ce mémoire ;

A ceux qui me sont chère et ceux que j'aime du fond de

mon cœur.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah, le tout puissant, qui m'a donné la force, la patience et la volonté pour accomplir ce modeste travail.

*Également, mon encadreur de mémoire Madame, **TERGHINI Warda** pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité.*

Aussi, je le remercie pour ses encouragements et sa sympathie durant toute la période de la préparation de mon mémoire.

*Mes remerciements s'adressent également aux membres de jury, Madame **TOBBECHE souad** et monsieur **MEGHERBI mohamedlarbi** pour leur présence et pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer pour l'évaluation de ce travail.*

*Je remercie également tous les enseignants de département d'électronique de l'université **Mohamed khider Biskra** qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.*

Je remercie aussi tous mes amies et mes camarades qui m'ont beaucoup soutenu conseillé et aidé.

Harch Leila.



Sommaire

Dédicace	I
Remerciement	II
Sommaire	III
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	XI
Liste des abréviations	XII
Introduction générale	1
Chapitre I : Concept théorique et généralité sur les cellules solaire	
I.1. Introduction.....	3
I.2. L'énergie solaire et constante d'illumination.....	3
I.3. Semi-conducteur	6
I.3.1. Structure de bande	6
I.3.2. Différent types de Semi-conducteur.....	7
I.3.2.a. Les semi-conducteurs intrinsèques.....	7
I.3.2.b. Les semi-conducteurs extrinsèques.....	7
I. 4. La jonction P-N.....	10
I.5. Absorption et génération.....	11
I.5.1.Processus d'absorption.....	11
I.5.1.1 Absorption bande-bande.....	11
I.5.1.2.Condition et coefficient d'absorption.....	12
I.5.1.3. Absorption par les porteurs libres.....	14
I.5.2. Génération des porteurs.....	14
I.6. Mécanismes de recombinaison.....	15

I .6.1. Recombinaisons radiatives ou « bande a bande ».....	15
I .6.2. Recombinaison Auger.....	16
I .6.3 Recombinaison par piège.....	16
a)Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH).....	17
b) Recombinaison en surface	18
I.7. Cellule solaire photovoltaïque.....	19
I.7.1. Historique	19
I.7.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	19
I. 7. 3. Cellule solaire idéale.....	20
I. 7. 4. Cellule solaire réelle	21
I.7.5. Paramètres de la cellule solaire	22
I.7.5.1. Courant de court-circuit J_{cc}	23
I.7.5.2. Tension à circuit-ouvert V_{oc}	23
I.7.5.3. Puissance maximale P_m	24
I.7.5.4. Facteur de forme FF.....	24
I.7.5.5. Rendement de conversion.....	24
I.7.5.6. Le rendement quantique EQE	24
I.7.6. Les différents types de pertes dans une cellule solaire.....	26
I.7.6.1. Les pertes extrinsèques	26
I.7.6.2. Les pertes intrinsèques.....	26
I.8. Étude du matériau InGaN.....	27
I.8.1. Historique de (InGaN)	27
I.8.2. Définition d'InGaN.....	27
I.8.3. Caractéristique structurelle.....	28

I.8.3.1. Structure cristalline.....	28
I.8.3.2. Propriétés électrique	30
I.9. Conclusion.....	37
Chapitre II : Logiciel de simulation SCAPS	
II.1. Introduction.....	38
II.2.Présentation du logiciel SCAPS-1D.....	38
II.3.Utilisation du logiciel	38
II.3.1 Action panel.....	39
II.3.2.Panneau des bandes d'énergies (résultats).....	48
II.3.3. Protocole de simulation.....	49
II.4.Aperçu théorique	49
II.5.Avantages et inconvénients du SCAPS.....	50
II.6. Conclusion.....	50
Chapitre III : Résultats et interprétations	
III.1. Introduction.....	51
III.2.Description de la structure.....	51
III.3.Paramètres de simulation.....	52
III.4. Modèles physiques utilisés dans la simulation.....	53
III.4.1.Mobilité.....	53
III.4.2. Recombinaison.....	53
III.4.3.Le coefficient d'absorption.....	54
III.5. Résultats et interprétations.....	55
III.5. 1. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les paramètres électrique de la cellule.....	57
III.5. 2. Effet de l'épaisseur de la base sur les paramètres électrique de la	60

Cellule.....	
III.5. 3. Effet de dopage de bas sur les paramètres électrique de la cellule...	62
III.5.4. Effet de dopage de l'émetteur sur les paramètres électrique de la Cellule.....	65
III.5.5. Effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant sur les paramètres électrique de la cellule	67
III.5.6. Effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière sur les paramètres électriques de la cellule.....	70
III.5.7. Effet de la dure de vie des porteurs minoritaires dans l'émetteur sur les paramètres électrique de la cellule.....	73
III.5.8. Effet de température sur les paramètres électrique de la cellule.....	75
III.5.9. Effet de la densité du piège profond des électrons sur les paramètres électrique de la cellule.....	79
III.6. Conclusion.....	82
Conclusion générale	83
Bibliographie	85

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : L'effet photovoltaïque.....	3
Figure I.2 : Spectre solaire	4
Figure I.3 : Constante d'illumination.	5
Figure I.4 : Spectre AM0, AM1 et AM1.5	5
Figure I.5 : Diagramme de bande.....	6
Figure I.6 : Semi-conducteur intrinsèque :a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densité états énergétique c) Distribution de Fermi-Dirac d) Densité énergétique de porteurs.....	7
Figure I.7 : Semi-conducteur dopé de type n.....	8
Figure I.8 : Semi-conducteur dopé de type P.....	9
Figure I.9 : le bilan électronique pour un semi-conducteur extrinsèque a. Diagramme des bandes d'énergie b. Densités d'états énergétiques c. Distributions de Fermi-Dirac d. Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p).....	10
Figure I.10 : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre.....	11
Figure I.11 : Transition inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur (le cas (a) correspond à un semi-conducteur à gap direct et le cas (b) à un gap indirect.....	12
Figure I.12 : Evolution de $\alpha(\lambda)$ pour différents matériaux semi-conducteurs.....	13
Figure I.13 : Représentation schématique de la recombinaison radiative	15
Figure I.14 : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger	16
Figure I.15 : Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège.....	17
Figure I.16 : Représentation schématique de la recombinaison SRH	18
Figure I.17 : Représentation schématique de la recombinaison de surface	18
Figure I.18 : Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairment	20
Figure I.19 : Schéma électrique d'une cellule solaire idéale.....	21
Figure I.20 : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque	22
Figure I.21 : Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V)	23
Figure I.22 : Rendement quantique externe de la cellule solaire et les différents types de pertes...	25
Figure I.23 : Différent type de pertes électriques et optiques existant dans une cellule solaire.....	26
Figure I.24 : Tableau périodique partiel.....	28
Figure I.25 : Structure Wurtzite, exemple du GaN	29
Figure I.26 :Structure cubique zinc-blende, exemple du GaN	29
Figure I.27 : Diagramme de bande GaN calculé avec la théorie de structure électronique des	31

quasi-particules	
Figure I.28: Diagramme de bande InN calculé avec la théorie de structure électronique des quasi- particules	31
Figure I.29: Evolution du gap d'énergie interdite de l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la concentration du Ga.....	33
Figure I.30: Evolution du gap d'énergie de GaN en fonction de la température Les courbes A, B et C font référence aux excitons du même nom.	34
Figure I.31: Evolution du gap d'énergie pour InN en fonction de la température Les données expérimentales de photoluminescence sont également montrées	34
Figure I.32: Longueur de diffusion des trous dans GaN en fonction De la concentration d'électrons.	36
Chapitre II	
Figure II.1 : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.....	39
Figure II.2 : Fenêtre d'exécution, de conception du dispositif et des résultats du logiciel SCAPS.	40
Figure II.3 : Le point de fonctionnement.	40
Figure II.4 : Résistance série et parallèle.	41
Figure II.5 : L'illumination.	42
Figure II.6 : Action de bloc.	42
Figure II.7 : Panneau de définition d'une cellule solaire.	43
Figure II.8 : Définir le problème.	43
Figure II.9 : Propriétés de la couche ajoutée.	44
Figure II.10 : Propriétés des dopages définis.	45
Figure II.11 : Modèle de l'absorption.	45
Figure II.12 : Définition des types de recombinaison présents.....	46
Figure II.13 Panneau des propriétés des contacts.....	47
Figure II.14 : Panneau des bandes d'énergie.....	48
Chapitre III	
Figure III.1 : Structure de la cellule à simuler sous SCAPS.....	52
Figure III.2 : le coefficient d'absorption du InGaN en fonction de la longueur d'onde	54
Figure III.3 : Bandes d'énergie à l'équilibre	55
Figure III.4 : Densités des porteurs libres à l'équilibre.....	56
Figure III.5 : Caractéristique J-V et P-V de la cellule pn en $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$	56
Figure III.6 : Rendement quantique sous AM1.5G de la cellule p-n en $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$	57

Figure III.7 : Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur de l'émetteur.....	58
Figure III.8 : Rendement quantique avec l'effet de l'épaisseur de l'émetteur.....	58
Figure III.9 : l'effet de l'épaisseurs de l'émetteur avec $W_n = 270\text{nm}$ sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	59
Figure III.10 : Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur de base.....	60
Figure III.11 : Rendement quantique avec l'effet de l'épaisseur de base.....	61
Figure III.12 : l'effet de l'épaisseurs de base avec $W_p = 130\text{nm}$ sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	62
Figure III.13 : Caractéristique J-V avec l'effet du dopage de base.....	63
Figure III.14 : Rendement quantique avec l'effet du dopage de base.....	63
Figure III.15 : l'effet du dopage de la base sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	64
Figure III.16 : Caractéristique J-V avec l'effet du dopage de l'émetteur.....	65
Figure III.17 : Rendement quantique avec l'effet du dopage de l'émetteur.....	66
Figure III.18 : l'effet du dopage de l'émetteur sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	67
Figure III.19 : Caractéristique J-V avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact avant	68
Figure III.20 : Rendement quantique avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact avant	68
Figure III.21 : l'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	69
Figure III.22 : Caractéristique J-V avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact arrière	70
Figure III.23 : Rendement quantique avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact arrière	71
Figure III.24 : l'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	72
Figure III.25 : l'effet du durées de vie de l'émetteur sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	74
Figure III.26 : Profile de recombinaison : (a) $\tau_n = 6.5 \cdot 10^{-3}\text{ns}$, (b) $\tau_n = 6.5\text{ns}$, (c) $\tau_n = 6.5 \cdot 10^3\text{ns}$	75
Figure III.27 : L'énergie du gap du matériau InGaN avec la température.....	76
Figure III.28 : Caractéristique J(V) avec l'effet de la température.....	76
Figure III.29 : Rendement quantique externe avec l'effet de la température.....	77
Figure III.30 : l'effet de température sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η	78
Figure III.31 : Caractéristique J-V avec l'effet de la densité du piège profond des électrons.....	79

Figure III.32 : Rendement quantique avec l'effet de la densité du piège profond des électrons.....	80
Figure III.33 : l'effet de la densité du piège profond des électrons sur J_{cc} ; V_{co} ; FF; η	81

Liste de Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Paramètres structuraux α , c , u et u pour le GaN et l'InN.....	30
Tableau I.2 : Évolution du gap de GaN et InN en fonction de la température.....	35
Tableau I.3 : Résumé des propriétés électriques du GaN et de l'InN à 300 K.....	36

Chapitre III

Tableau III.1 : Epaisseurs et dopage de la structure étudiée.....	51
Tableau III.2 : Paramètres de simulation à 300 K pour une concentration de 65% de l'InN.....	52
Tableau III.3 : Paramètres utilisés dans le calcul de la mobilité des porteurs en fonction de la concentration de dopage.....	53
Tableau III.4 : Paramètres de sortie de la cellule.....	57
Tableau III.5 : L'effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule.....	59
Tableau III.6 : L'effet de l'épaisseur de la base sur les caractéristiques de la cellule.....	61
Tableau III.7 : L'effet de dopage de bas sur les caractéristiques de la cellule.....	64
Tableau III.8 :L'effet de dopage de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule.....	66
Tableau III.9 :L'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant sur les caractéristiques de la cellule.....	69
Tableau III.10 : L'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière sur les caractéristiques de la cellule.....	71
Tableau III.11 : L'effet de dure de vie sur les caractéristiques de la cellule.....	73
Tableau III.12 :L'effet la de température sur les caractéristiques de la cellule.....	77
Tableau III.13 : L'effet de la densité du piège profond des électrons sur les paramètres de sortie de la cellule solaire en InGaN	80

Liste des abréviations

Symbole	Désignation	Unités
AM	Air Mass	
E_c	Energie minimale de la bande de conduction	eV
E_v	Energie maximale de la bande de valence	eV
E_g	Gap d'énergie interdite d'un matériau	eV
λ	Longueur d'onde d'un photon	nm
C	la vitesse de la lumière=3.108	m/s
h	Constante de Planck= $6,62.10^{-34}$	J.s
v	la fréquence de la longueur d'onde associée au photon	s^{-1}
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
E	l'énergie du photon	eV
G	le taux de génération des porteurs	
Φ_i	Flux des photons incidents	photons/cm ² /s
fabs	Fraction des photons absorbés par le semi-conducteur	
R	Taux de recombinaison pour les électrons et les trous	
$\alpha(\lambda)$	coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde	cm^{-1}
n	La densité des électrons (cm^{-3})	cm^{-3}
p	La densité des trous (cm^{-3})	cm^{-3}
ni	La densité des porteurs intrinsèques, du semi-conducteur à une température donnée	cm^{-3}
μ_e	La mobilité des électrons	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
μ_p	La mobilité des trous	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
V_{th}	La vitesse thermique des porteurs	cm/s
τ_{n0}	La durée de vie des électrons	s
τ_{p0}	La durée de vie des trous	s
S_n	La vitesse de recombinaison des électrons à la surface	$cm.s^{-1}$
S_p	La vitesse de recombinaison des trous à la surface	$cm.s^{-1}$
ZCE	La zone de charge d'espace	
I	Courant	A
I_{ph}	Le photo-courant	A/cm ²
I_d	Courant traversant la diode	A

R_s	La Résistance série	Ω
R_{sh}	La Résistance parallèle	Ω
J_{cc}	Le courant de court-circuit	A/cm^2
V_{co}	La tension en circuit-ouvert	V
P_m	La puissance électrique maximale.	mw/cm^2
V_m	Tension correspondante à la puissance maximale fournie	V
I_m	Courant correspondante à la puissance maximale fourni	mA/cm^2
FF	Le facteur de forme	%
η	Le rendement de conversion de la cellule	%
EQE	Le rendement quantique externe.	%
D_n	Coefficient de diffusion des électrons	cm^2/s
D_p	Coefficient de diffusion des trous	cm^2/s
k_B	La constante de Boltzmann	$eV/^{\circ}K.$
A	Constante spécifique du matériau dans l'expression du Gap	$cm^{-3} \cdot ^{\circ}K^{-3/2}$
T	Température	K
D	Coefficient de diffusion des porteurs	$cm^2 \cdot s^{-1}$
N_a	Densité de dopants accepteurs	cm^{-3}
N_c	Densité d'états au bord de la bande de conduction	cm^{-3}
N_d	Densité de dopants donneurs	cm^{-3}
N_v	Densité d'états au bord de la bande de valence	cm^{-3}
L	Longueur de diffusion	M
I_s	Courant de saturation	A
\vec{J}_n	Le vecteur de la densité des courants des électrons	A/cm^2
\vec{J}_p	Le vecteur de la densité des courants des trous	A/cm^2

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié le fonctionnement des cellules photovoltaïques à base d'InGaN par la simulation sous éclairage avec un spectre AM1.5 effectuée sous le simulateur SCAPS. Les paramètres de sortie de la cellule sont: le courant de court circuit , **$J_{cc}=34.46 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$** , la tension de circuit ouvert, **$V_{co}=0.884V$** , le facteur de forme **$FF=81.98\%$** et le rendement de conversion, **$\eta=24.98 \%$** .

L'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule sont aussi étudiée.

À travers ce travail, nous avons abouti aux conclusions suivantes:

- L'augmentation de l'épaisseur améliore le rendement électrique de la cellule et le rendement quantique.
- L'augmentation de l'épaisseur de la cellule améliore aussi le rendement électrique et quantique de la cellule.
- l'augmentation du dopage entraîne une augmentation dans le rendement.
- La diminution de la vitesse de recombinaison en surface améliore le rendement électrique, et le rendement quantique externe.
- l'augmentation de la durée de vie du porteurs minoritaires augmente le rendement de conversion électrique et le rendement quantique externe.
- L'augmentation de la température cause une dégradation dans les paramètres de sortie de la cellule.
- L'augmentation de la densité du piège profond cause une diminution de rendement électrique et le rendement quantique externe .

Mots clés : Nitrure d'Indium Gallium, cellules solaires, simulation.SCAPS

ملخص

الخلايا الكهروضوئية تحول الطاقة الضوئية مباشرة الى طاقة كهربائية. في هذا العمل قمنا بدراسة الخلايا الضوئية باستعمال سبائك InGaN عن طريق المحاكاة تحت اضاءة AM1.5 بواسطة البرنامج SCAPS. بفضل المحاكاة تمكنا من الحصول على وسائط الخروج **$34.46 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$** , **$0.884V$** , **$81.98\%$** و مردود كهربائي **$24.98 \%$** . كما أجرينا دراسة حول تأثير سمك و تطعيم الباعث و القاعدة , كثافة العيوب, عمر حاملات الشحنات الاقلية, ودرجة الحرارة على الوسائط الخارجية للخلية.

من خلال هذا العمل ، توصلنا إلى الاستنتاجات التالية:

- زيادة السمك يحسن المردود الكهربائي و المردود الكوانتيكي للخلية.
- تؤدي الزيادة في كثافة الاشابة إلى الزيادة في المردود.

- تخفيض في سرعة اعادة تركيب الالكترونات على السطح يحسن المردود الكهربائي و المردود الكوانتيكي .
- الزيادة في عمر الناقلات الأقلية تزيد من كفاءة المردود الكهربائي و المردود الكوانتيكي.
- زيادة درجة الحرارة يسبب تدهور في عناصر الإخراج للخلية.
- تؤدي زيادة كثافة الشوائب إلى انخفاض في الكفاءة الكهربائية و المردود الكوانتيكي.

الكلمات المفتاحية: الإنديوم أنتريد الغاليوم، الخلايا الشمسية، المحاكاة SCAPS.

Introduction Générale

Introduction générale

Aujourd'hui le développement rapide de l'industrie nous convertit à être plus dépendant de l'énergie. Les sources d'énergie traditionnelles comme le charbon et le pétrole sont à la fois limitées et constituent une grave menace pour les organismes vivants et l'environnement. Une des méthodes les plus prometteuses pour lutter contre ces problèmes est l'énergie solaire, qui est contrairement aux autres sources d'énergies, abondante et propre, d'autre part annuellement elle fournit à la terre une énergie supérieure à celle de la consommation mondiale. L'électricité est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « Cellule solaire » basé sur un effet dit « Effet photovoltaïque » [1].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV [2].

L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir :

- Energie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Frais de maintenance relativement faibles.
- Permette de produire l'énergie électrique sans dégrader l'environnement.
- Constitue des ressources pratiquement inépuisables.
- Les systèmes exigeant peu d'entretien, sont fiables, non polluants et silencieux [3].

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût. Cependant, depuis quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux

normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales. Les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (sur au moins 20 ans). De nouveaux matériaux ont vu le jour, tel que le Nitrure d'Indium Gallium « InGaN » qui a subi des recherches approfondies depuis 2002 en tant que matériau photovoltaïque. En faisant varier la composition de nitrure d'indium et de nitrure de gallium au sein de l'InGaN, la bande interdite de ce matériau semi-conducteur peut être changée. La gamme de bande interdite de l'InGaN coïncide avec la partie visible du spectre solaire. Ainsi, une cellule solaire à haut rendement peut être développée par l'utilisation de multicouches de l'InGaN [4].

L'objectif de notre travail est l'étude et la simulation d'une cellule solaire à base du nitrure d'Indium Gallium InGaN ; Nous avons utilisé le logiciel de simulation « SCAPS » (Solar Cell Capacitance Simulator), développé à l'Université de Gand.

Notre mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre : on fait appel aux notions générales sur l'énergie photovoltaïque et les caractéristiques des cellules solaires et consacré à la description des cellules solaires en couche mince à base d'InGaN

Le deuxième chapitre : présentons le logiciel de simulation SCAPS et comment l'utiliser pour calculer par simulation numérique les caractéristiques électriques courant-tension et rendement quantique de la cellule solaire p-n InGaN

Dans le troisième chapitre, les résultats de la simulation de la cellule proposée sont présentés. La caractéristique courant-tension de la cellule et son rendement quantique. L'effet des épaisseurs et du dopage des deux régions et aussi étudié, ainsi que l'effet de la durée de vie des porteurs minoritaires (τ), l'effet de la vitesse de recombinaison en surface (S_n, S_p), l'effet de la température et l'effet des défauts.

A la fin, nous présenterons une conclusion générale et quelques perspectives envisageables.

Chapitre I :

Concept théorique et

généralité sur les cellules

solaire

I. 1. Introduction.

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau.

Cette transformation d'énergie est réalisée par les cellules solaires en produisant du courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.

Au cours de l'éclairage de la cellule (jonction), un certain nombre de processus physiques se produit,

- 1) Absorption de photons avec l'énergie $h\nu > E_g$.
Où h est la constante de Planck, ν la fréquence
- 2) Génération de paires de porteurs de charge électron et trou.
- 3) Migration des porteurs de charge (diffusion).
- 4) Séparation des porteurs de charge induits par le champ électrique interne.

La séparation de charge entraîne l'apparition d'une tension électrique sur les électrodes de la cellule solaire.

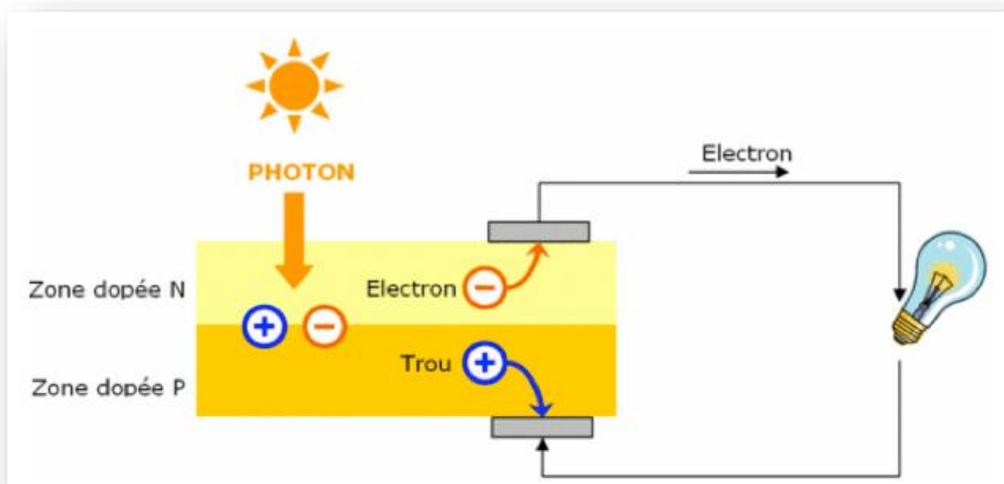


Figure I.1 : L'effet photovoltaïque [5].

I.2. L'énergie solaire et constante d'illumination

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente. Cette source d'énergie est propre, facilement accessible et virtuellement inépuisable.

Sur Terre, la principale source de lumière est le soleil. La lumière est une onde Électromagnétique qui peut se propager dans le vide sans support matériel avec une célérité $c \sim 3 \times 10^8$ m/s. Les ondes lumineuses comprennent les radiations visibles, ultraviolettes et infrarouges, ce qui correspond globalement au spectre solaire (**Figure I. 2**).

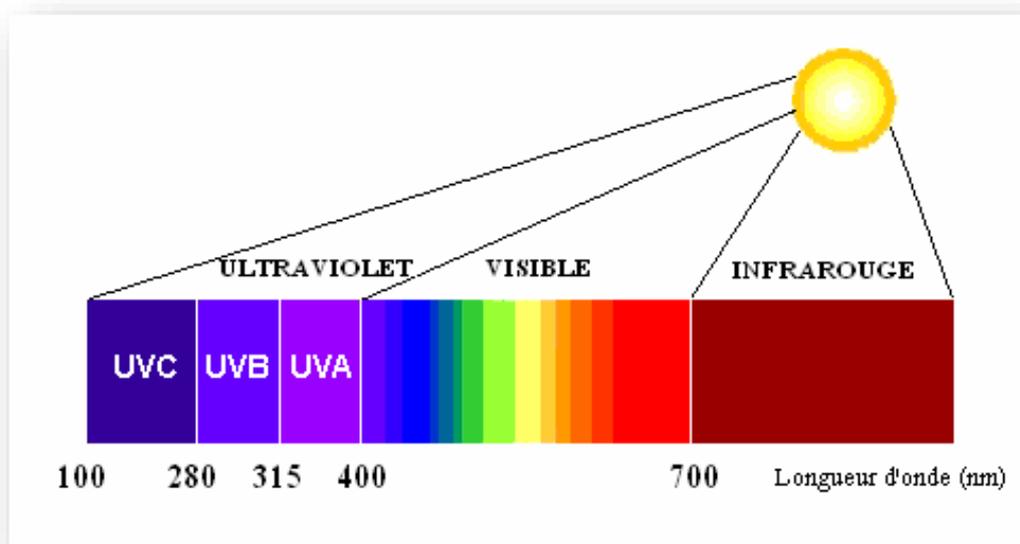


Figure I.2 : Spectre solaire.

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la terre est appelée la constante solaire. Elle est approximativement de $1,4 \text{ kW/m}^2$ au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur Terre à 1 kW/m^2 par la réflexion et l'absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. La perte de l'énergie solaire causée par l'absorption atmosphérique est appelée la « masse d'air » AM x , x étant défini par : $x \sim 1/\sin \theta$, θ étant l'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la Terre (**Figure I.3**).

La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, et AM1 lorsque cette lumière arrive à la surface de la terre. Le terme AM1.5G désigne la masse d'airs rencontrés à la lumière arrivant obliquement (48.2°) sur la surface de la Terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande. Le standard AM1.5G est utilisé pour caractériser une cellule solaire [6].

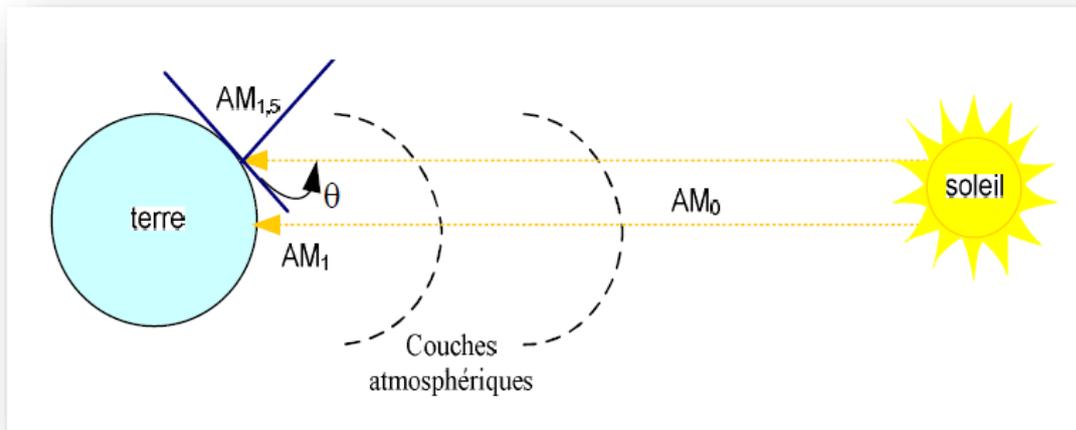


Figure I.3 : Constante d'illumination [7].

Au cours des dix dernières années les spectres rattachés à ce standard (**Figure I.4**) ont été homologués par l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO 9845-1: 1992) et la Société Américaine de Test et Matériaux (ASTM E892-87:1992).

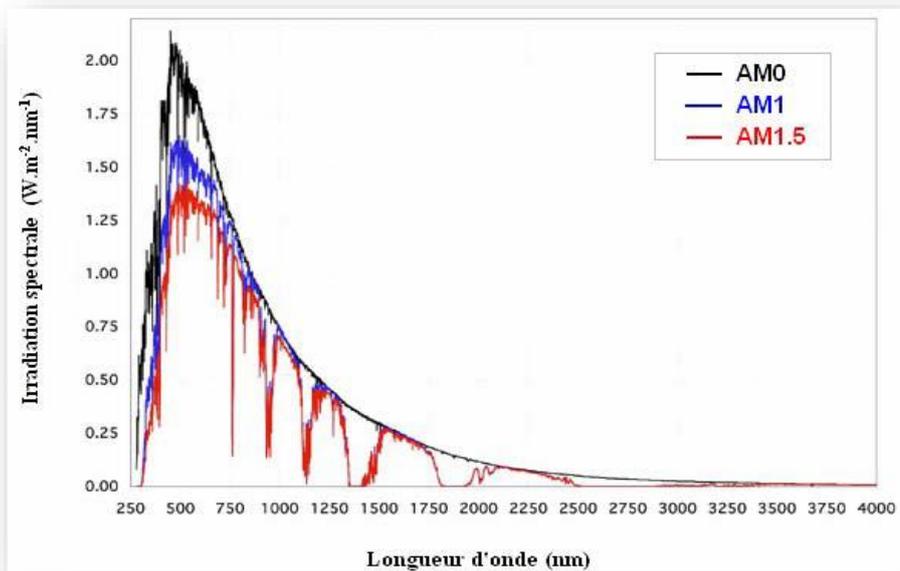


Figure I.4: Spectre AM0, AM1 et AM1.5 [6].

I.3. Semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celles des isolants. Cette conductivité, dépend fortement de la température. Un semi-conducteur est un matériau où les électrons périphériques se répartissent entre deux bandes d'énergie au moins séparées par un intervalle d'énergie (gap) relativement faible de l'ordre de 1 eV [8].

I.3.1. Structure de bande

Dans un cristal, la particule en mouvement est soumise à un potentiel qui dépend des périodicités du réseau cristallin [9]. Dans un schéma simple d'un matériau à deux niveaux d'énergie (**figure I.5**), un électron possédant l'énergie E_v appartient à la bande de valence et se trouve lié à l'atome, s'il reçoit une énergie « sous forme d'un photon par exemple » qui lui permet d'atteindre le niveau E_c , qui est l'énergie correspondante à la bande de conduction, l'électron devient donc libre et peut alors participer à la création d'un courant électrique. L'énergie nécessaire pour que l'électron devienne libre est noté E_g , énergie associée à la bande interdite ou gap :

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{I.1})$$

Contrairement aux isolants ($E_g > 5 \text{ eV}$), les semi-conducteurs ont un gap de l'ordre de 1-3 eV, par contre pour les métaux le gap est inexistant.

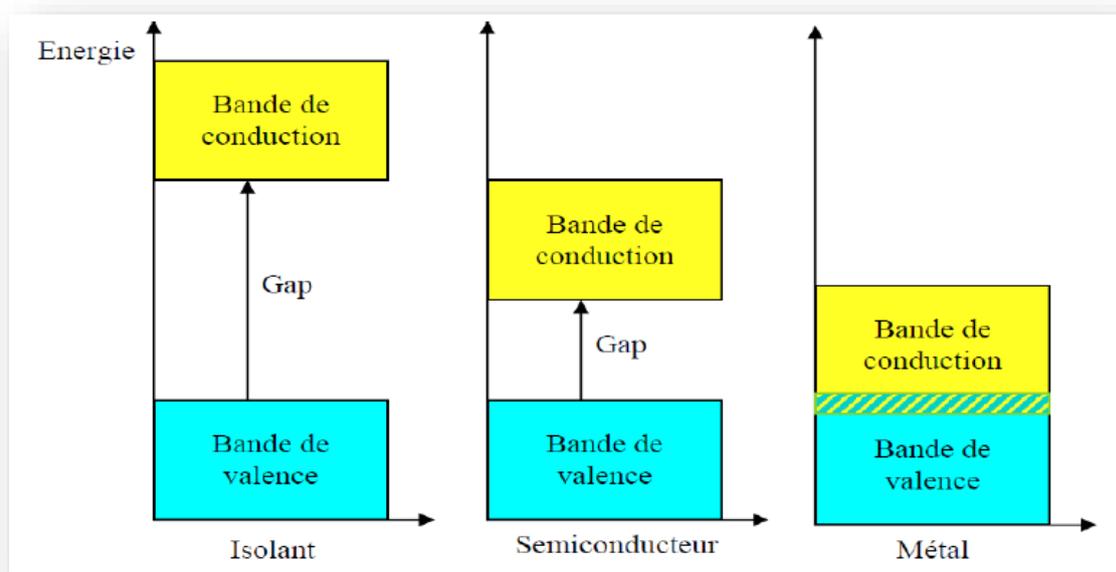


Figure I.5 : Structure de bande des trois catégories de matériaux [10].

I.3.2. Différent types de Semi-conducteur

I.3.2.a. Les semi-conducteurs intrinsèques

Ce sont des semi-conducteurs très purs et très bien cristallisés présentant un réseau cristallin parfaitement périodique tout en ayant un taux d'impuretés très faible (moins d'atome d'impureté pour 10^{13} atomes de l'élément semi-conducteur). Ils se comportent comme des isolants à très basse température et leur conductivité augmente avec la température, la **Figure I.6** donne un résumé global des semi-conducteurs intrinsèques du point de vue structure de bandes et distributions des charges [11].

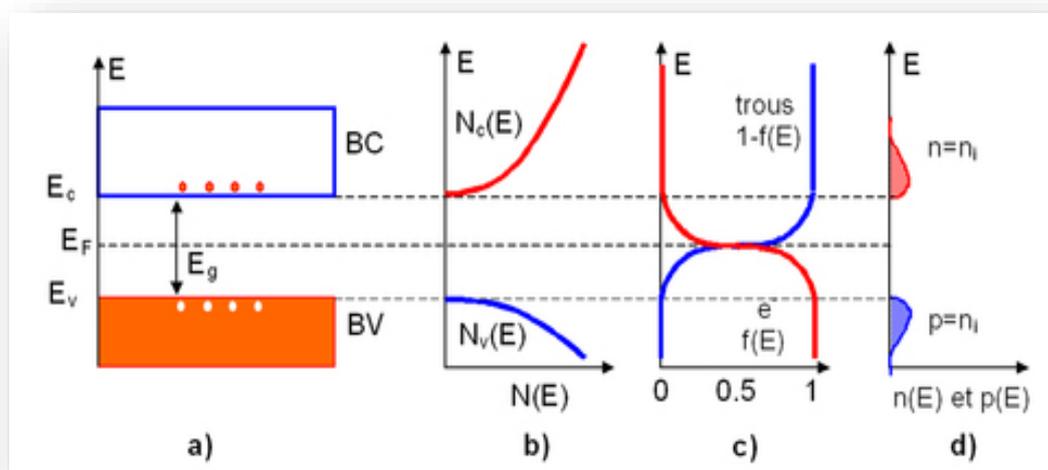


Figure I.6 : Semi-conducteur intrinsèque :a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densité d'états énergétique c) Distribution de Fermi-Dirac d) Densité énergétique de porteurs [12].

I.3.2.b. Les semi-conducteurs extrinsèques

- **Semi-conducteur dopé n**

Prenons le cas d'un atome de la colonne V, par exemple du phosphore. La couche externe de cet atome comporte, a priori, 5 électrons, comme représenté (**Figure I.7**). Inclus dans le réseau cristallin, cet atome va se retrouver avec 9 électrons sur sa couche externe. Dès que l'énergie thermique sera suffisante, cet électron va quitter son orbite pour circuler dans le cristal. Il rejoint dans ce cas la bande de conduction du cristal. Le noyau de l'atome de phosphore ayant une charge (due à ses protons) qui n'est plus compensée, cet atome va s'ioniser positivement. Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a fourni un électron au cristal (dans sa bande de conduction), on l'appelle atome donneur. Notons que la charge totale du cristal reste nulle, le cristal étant globalement neutre [13].

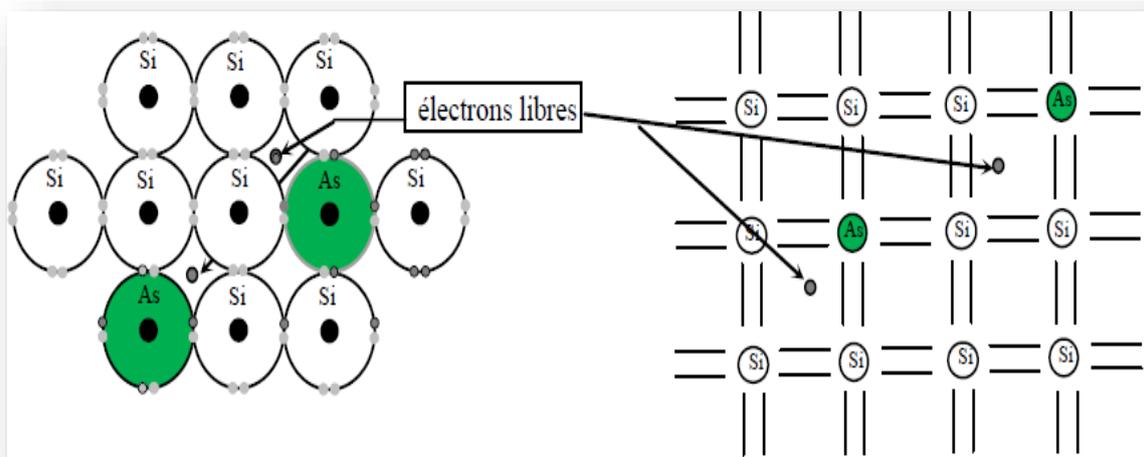


Figure I.7 : Semi-conducteur dopé de type n[14].

Pour résumer, un atome dopant de type donneur :

- donne un électron au réseau cristallin,
- s'ionise positivement,
- crée un dopage de type n.

- **Semi-conducteur dopé p**

Prenons le cas d'un atome de la colonne III, par exemple du bore. La couche externe de cet atome comporte, a priori, 3 électrons, comme représenté (**Figure I.8**). Inclus dans le réseau cristallin, cet atome va se retrouver avec 7 électrons sur sa couche externe. Dès que l'énergie thermique sera suffisante, un électron de valence voisin va quitter son orbite pour venir créer un octet autour de l'atome de bore. Il crée dans ce cas une lacune dans la bande de valence du cristal, c'est-à-dire qu'il crée un trou. Le noyau de l'atome de bore ayant une charge due à ses protons insuffisante, cet atome va s'ioniser négativement. Cet atome a ainsi un comportement dopant et puisqu'il a fourni un trou au cristal (dans sa bande de valence), on l'appelle atome accepteur, puisqu'il accepte un électron. Notons que la charge totale du cristal reste toujours nulle, le cristal étant globalement neutre [13].

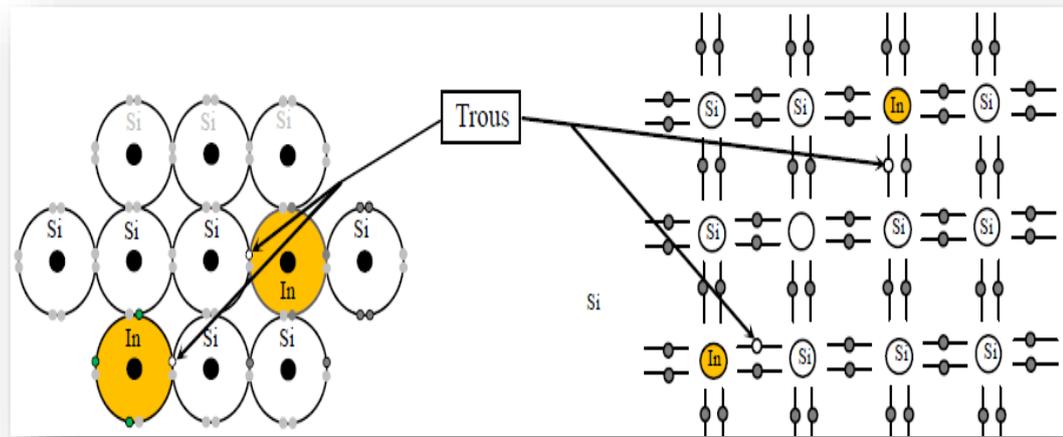


Figure I.8 : Semi-conducteur dopé de type P[14].

Pour résumer, un atome dopant de type accepteur :

- donne un trou au réseau cristallin,
- s'ionise négativement,
- crée un dopage de type p.

Un bilan général du point de vue structure de bande, distribution des charges des deux types des semi-conducteurs est illustré à titre indicatif et à titre comparatif.

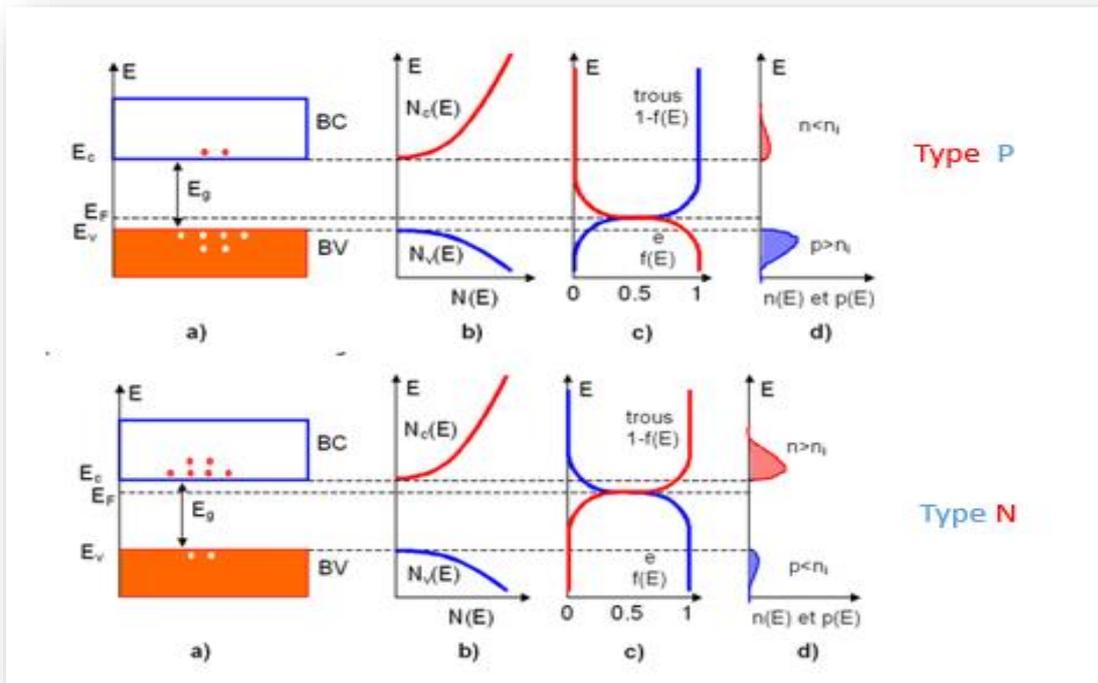


Figure I.9 : le bilan électronique pour un semi-conducteur extrinsèque **a.** Diagramme des bandes d'énergie **b.** Densités d'états énergétiques **c.** Distributions de Fermi-Dirac **d.** Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p) [12].

I. 4. La jonction P-N

Une jonction P-N est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (**Figure I.10**), c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [15].

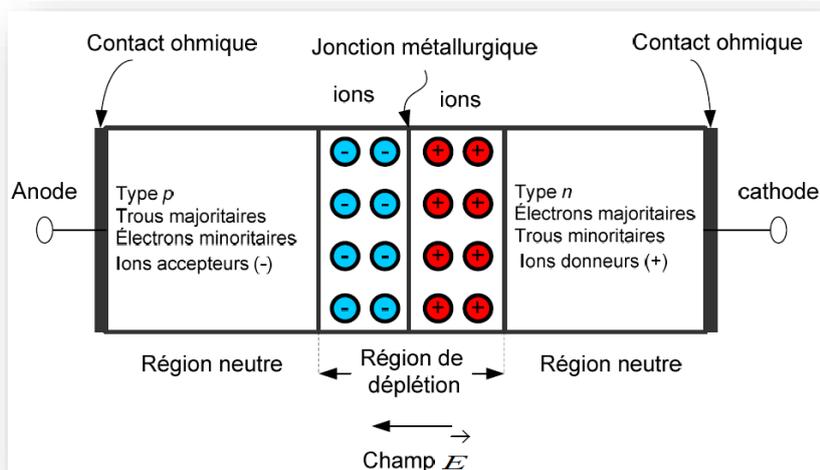


Figure I.10 : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre[16].

I.5. Absorption et génération

I.5.1. Processus d'absorption

Les principaux processus d'absorption sont l'absorption fondamentale bande-bande et par les porteurs libres.

I.5.1.1 Absorption bande-bande

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur l'absorption des photons d'énergie pour pouvoir induire le saut d'un électron depuis un état occupé de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction. En réalité, cette transition se fait de différentes manières selon le gap du semi-conducteur. S'il s'agit d'un gap direct les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives, ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V. Dans le cas du gap indirect, les transitions sont obliques, les électrons du sommet de la bande de valence peuvent être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie (**Figure I.11**) [15].

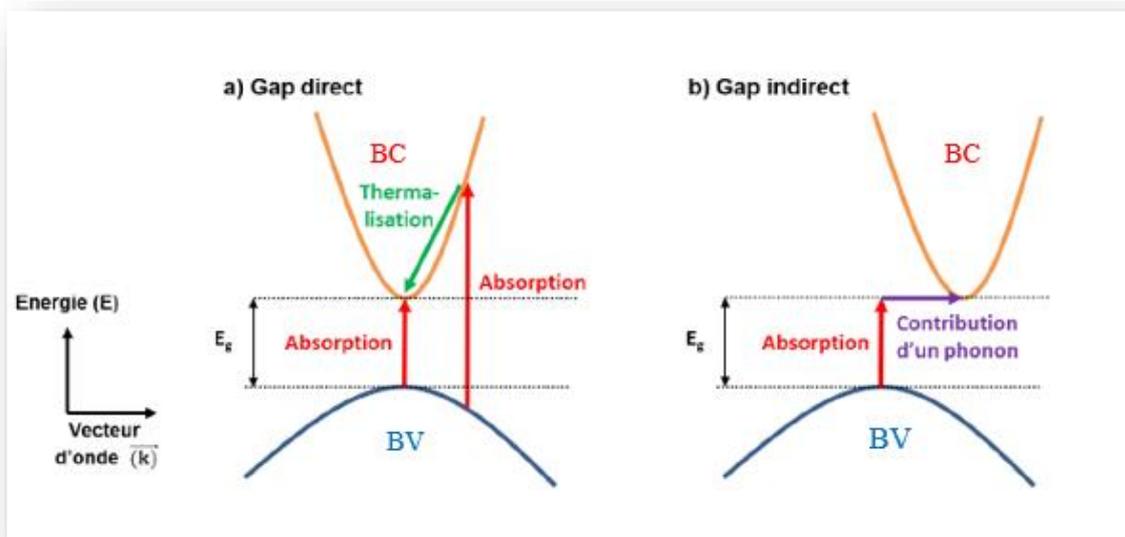


Figure I.11 : Transition inter-bandes d’électrons dans un semi-conducteur (le cas (a) corresponde à un semi-conducteur à gap direct et le cas (b) à un gap indirect [17].

I.5.1.2. Condition et coefficient d’absorption

Un photon de fréquence ν peut provoquer des transitions dans un matériau semi-conducteur entre la bande de valence et la bande de conduction. On a ainsi photo-génération d’un électron dans la bande de conduction et d’un trou dans la bande de valence. L’énergie du photon doit être supérieure ou égale à la différence des énergies entre ces bandes. En termes de longueur d’onde, la condition d’absorption est donnée par l’expression [18].

$$E = h\nu \geq E_g \tag{I.2}$$

$$\text{et } \lambda (\mu\text{m}) \leq \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} \tag{I.3}$$

Avec :

h : La constant de Planck.

E_g : L’énergie du gap du semi-conducteur en eV .

λ : La longueur d’onde en μm .

Cependant, il est possible qu’un photon d’énergie supérieure à E_g puisse provoquer une transitions d’électrons.

L’aptitude d’un matériau semi-conducteur à absorber la lumière est définie par le coefficient d’absorption $\alpha(\lambda)$. Dans le cas où $\alpha(\lambda)=0$, le matériau est transparent au rayonnement et dans le cas contraire, le rayonnement est absorbé par le matériau. Ce dernier est atténué dans la

direction de sa propagation, d'une manière exponentielle et sa profondeur de pénétration est égale à $1/\alpha(\lambda)$ selon la loi de Beer-Lambert. Le coefficient d'absorption, pour un semi-conducteur d'épaisseur x , est défini à partir du rapport entre l'intensité absorbée I et l'intensité incidente I_0 [18].

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{I.4})$$

x : l'épaisseur de la cellule,

$\alpha(\lambda)$: le coefficient d'absorption du semi-conducteur,

I_0 : L'intensité lumineuse incidente.

Où l'intensité réfléchiée a été négligée. Pour αx faible, il vient [18].

$$\alpha(\lambda)x = \frac{I_{\text{abs}}(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (\text{I.5})$$

Où

I_{abs} : L'intensité absorbée qui est reliée au nombre de photons qui disparaissent par unité de temps.

Les courbes de la **Figure I.12** donnent l'évolution du coefficient d'absorption pour certains.

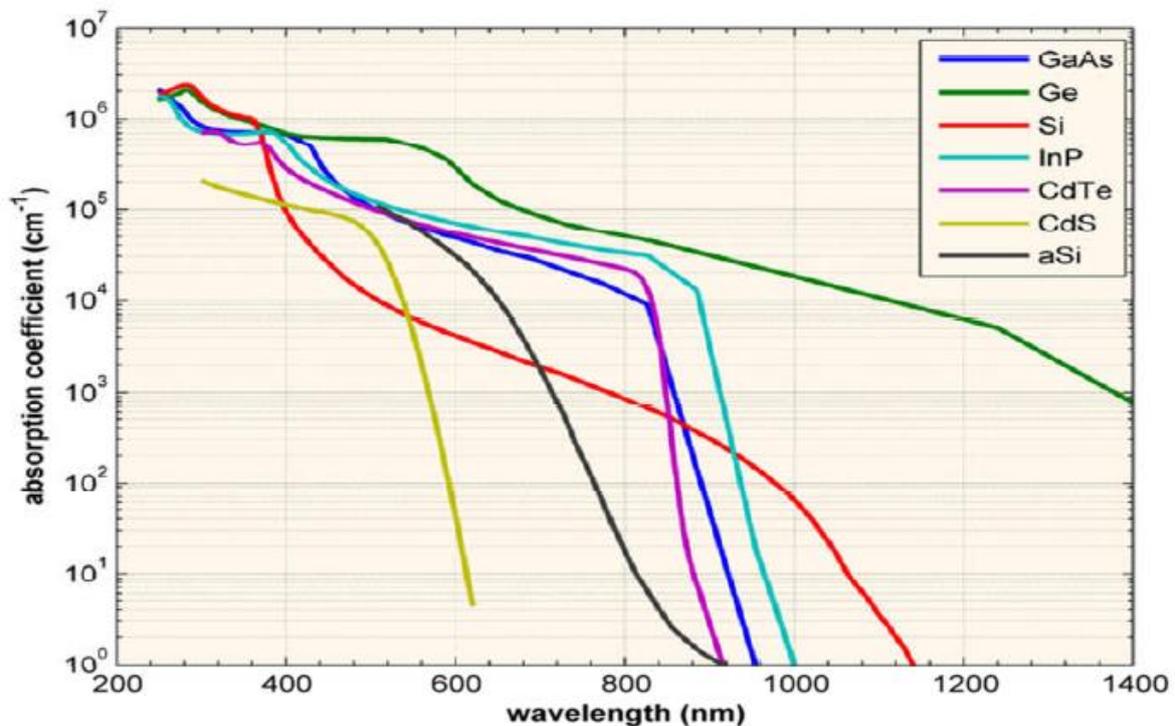


Figure I.12 : Evolution de $\alpha(\lambda)$ pour différents matériaux semi-conducteurs.

I.5.1.3. Absorption par les porteurs libres

L'absorption par les porteurs libres des photons incidents est un processus concurrent au processus général des paires électrons-trous, ce processus est significatif pour les photons d'énergie inférieure au gap. Dans ce processus, les électrons de la bande de conduction absorbent des photons et migrent vers des états supérieurs (même cas avec les trous) [15].

I.5.2. Génération des porteurs

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semi-conducteur génèrent des paires électrons-trous (on suppose implicitement la création d'une seule paire par photon). L'expression du taux de génération G ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) dépend de la forme du faisceau et de la surface éclairée, mais son intégral sur tout le volume de génération donne le nombre total des photons absorbés par seconde [15].

Cas (1) : Dans le cas de génération homogène, par un éclairage monochromatique, sur toute l'épaisseur x d'un échantillon :

$$G = \frac{\phi_i f_{abs}}{x} \quad (\text{I.6})$$

Où :

G : le taux de génération des porteurs.

x : l'épaisseur de la cellule.

ϕ_i : Flux des photons incidents (photons/cm²/s).

f_{abs} : Fraction des photons absorbés par le semi-conducteur.

Cas (2) : En éclairant un semi-conducteur d'une façon homogène en surface mais pas en profondeur, le taux de génération à une dimension s'écrit selon la loi de Beer-Lambert :

$$\phi(\lambda, x) = (1 - R(\lambda))\phi_i(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{I.7})$$

Avec R , le coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde.

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans le semi-conducteur génèrent des paires électron-trous. Le nombre de paires électron-trous créées par seconde est égal au nombre de photons disparus. Le taux de génération de paires électron-trous est donc le taux de disparition des photons

$$G(\lambda, x) = -\frac{d\phi_i(\lambda, x)}{dx} \quad (\text{I.8})$$

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)\phi_i(\lambda)(1 - R(\lambda))\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{I.9})$$

Dans le cas où les photons incidents ne pénètrent pas jusqu'à la surface arrière de l'échantillon, on peut écrire :

$$f_{abs} = 1 - R \quad (\text{I.10})$$

Donc :

$$G(\lambda, \mathbf{x}) = \alpha(\lambda)\phi_i(\lambda)f_{abs}\exp(-\alpha(\lambda)\mathbf{x}) \quad (\text{I.11})$$

G est alors le nombre de photons créés par unité de volume et par unité de temps.

I.6. Mécanismes de recombinaison

Trois types de recombinaisons entre un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence peuvent avoir lieu dans le volume des matériaux semi-conducteurs : radiative, Auger et Shockley-Read-Hall.

A chaque mécanisme de recombinaison des porteurs de taux R est associée une durée de vie τ par la relation [19] :

$$R = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (\text{I.12})$$

Avec Δn : concentration de porteurs en excès. La neutralité électrique du matériau étant conservée, on a : $\Delta n = \Delta p$.

I.6.1. Recombinaisons radiatives ou « bande à bande »

On parle de recombinaison radiative lorsque un électron de la bande de conduction se désexcite en émettant un photon pour se recombiner directement avec un trou de la bande de valence (**Figure I.13**).

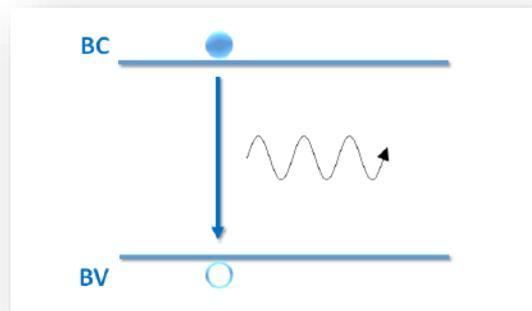


Figure I.13 : Représentation schématique de la recombinaison radiative.

Le taux de recombinaison radiatif s'exprime :

$$R_{rad} = B(np - n_i^2) \quad (\text{I.13})$$

Où n est la concentration d'électrons dans la bande de conduction, p est la concentration de trous dans la bande de valence, et B un coefficient dépendant du matériau. Ce type de recombinaison est peu fréquent dans le silicium cristallin où $B = 9.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en raison de son gap indirect [20].

I.6.2. Recombinaison Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées (**Figure I.14**). Le taux de recombinaison est donné par la relation [21] :

$$R_{Aug} = C_{Augn}(pn^2 - nn_i^2) + C_{AugP}(np^2 - pn_i^2) \quad (\text{I.14})$$

Où C_{Augn} et C_{AugP} : coefficients Auger pour les électrons et les trous .

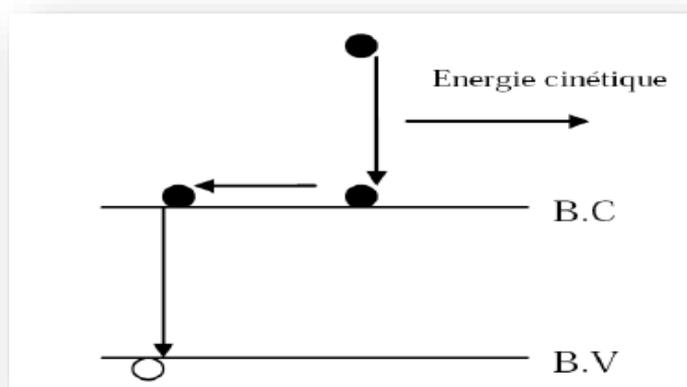


Figure I.14: Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger

I.6.3. Recombinaison par piège:

Les deux mécanismes précédents ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par des processus de recombinaison plus efficaces faisant intervenir les niveaux profonds.

Pour le silicium, il y a des niveaux profonds proches du milieu de la bande interdite associés à quelques impuretés courantes (**Figure I.15**). L'électron a tendance à revenir à son état initial dans la bande de valence, en passant par ces niveaux (s'ils existent).

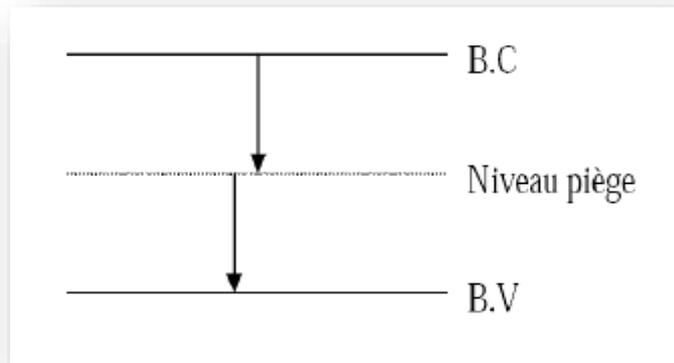


Figure I.15 : Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège.

a) Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH)

Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de Read-Shokley-Hall à un seul niveau piège (**Figure I.16**). Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation [21] :

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{n0} \left(p + n_{ie} \exp\left(-\frac{E_{trap}}{kT}\right) \right) + \tau_{p0} \left(n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right) \right)} \quad (\text{I.15})$$

Ou :

- n et p les concentrations d'électrons et de trous, respectivement [cm^{-3}].
- n_{ie} la concentration intrinsèque d'électrons [cm^{-3}].
- $n_{ie}^2 = pn$ (a l'équilibre thermodynamique) (I.16)
- τ_{n0} et τ_{p0} les durées de vie des électrons et des trous [s].
- E_{trap} la différence d'énergie entre la position énergétique du défaut et le niveau de Fermi intrinsèque [eV].
- k la constante de Boltzmann [eV.K^{-1}].
- T la température [K]

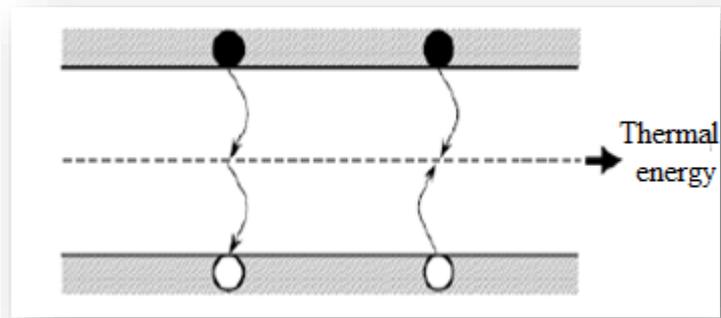


Figure I.16 : Représentation schématique de la recombinaison (SRH) [22].

b) Recombinaison en surface

La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses (**Figure I.17**), en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et autres défauts caractéristiques à température constante ($T=300^{\circ}\text{K}$). Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérentes aux densités de dopages selon la relation suivante

$$S = S_0 \left(\frac{N}{N_{set}} \right) \quad (\text{I.17})$$

S_0 , N_{set} et dépendent du traitement de la surface et de la passivation. Pour une oxydation thermique d'une couche de silicium de type n, est de 1 et $N_{set} \ll$ est de 10^{18} Cm^{-3} [21].

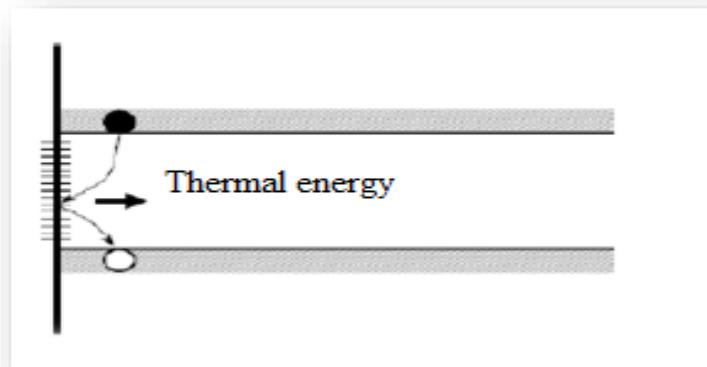


Figure I.17 : Représentation schématique de la recombinaison de surface [22].

I.7. Cellule solaire photovoltaïque

I.7.1. Historique

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent un cellule photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement 9%, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [23].

I.7.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons incidents (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron-trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées [24].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la **Figure I.18** :

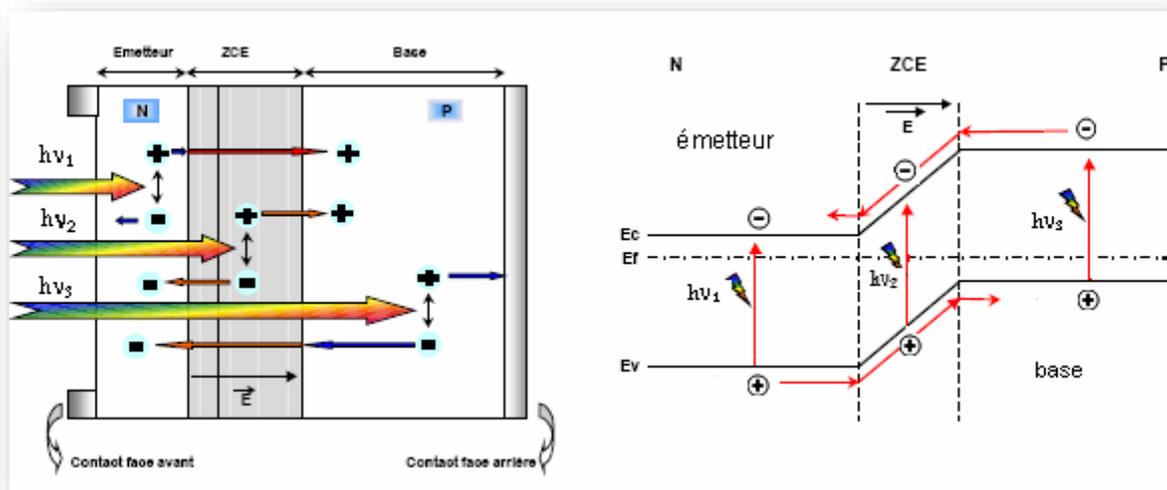


Figure I.18 : Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairage.

Sous éclairage les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace (ZCE). Les paires électrons-trous photogénérées dans cette zone sont instantanément séparées par le champ électrique E régnant (**Figure I.18**).

Les trous, charges positives, se voient accélérés vers la zone P, les électrons, charges négatives, vers la zone N. Trous et électrons deviennent alors majoritaires : c'est le photocourant de génération. Parallèlement, les porteurs minoritaires, trous générés côté N et électrons générés côté P, créent un gradient de concentration et diffusent dans le matériau. S'ils atteignent la ZCE sans se recombiner, le champ électrique leur fait traverser la zone déplétée afin d'atteindre la région où ils deviennent majoritaires : c'est le photocourant de diffusion.

La présence de contacts ohmiques assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photogénéré I_{ph} , somme des deux contributions précédentes, et qui participe au courant total [25].

I. 7. 3. Cellule solaire idéale

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électronique équivalent ci-dessous (**Figure I.19**). Nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant d'une source du courant et une diode en parallèle. La source du courant I_{ph} représente le photo-courant (généré) et la branche de diode un courant I_D [26].

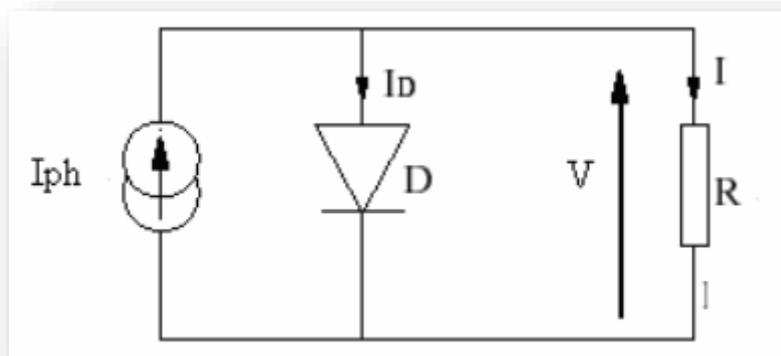


Figure I.19 : Schéma électrique d'une cellule solaire idéale

Le courant délivré par la cellule photovoltaïque éclairée sur une charge R s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{I.18})$$

I_{ph} : photo- courant générée.

I_D : Courant traversant la diode.

$$I_D = I_s \left[\exp \left(\frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.19})$$

$$\text{Avec } V_T = kT/q \quad (\text{I.20})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V_D}{V_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.21})$$

q : charge de l'électron. ($1.6 \cdot 10^{-19}$ coul).

k : la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

V_T : Tension thermique.

I_s : Courant de saturation.

V_D : Tension à la borne de la diode.(volt)

T : température absolue (en kelvin).

I. 7. 4. Cellule solaire réelle

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte Des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords.... doivent être pris-en Considération.

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la **Figure I.20** par un générateur de courant I_{ph} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} [26].

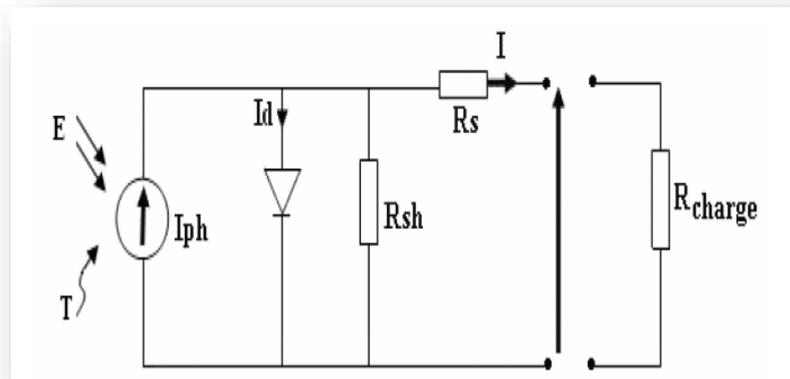


Figure I.20 : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans la **Figure (I.20)**, on a :

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad (\text{I.22})$$

$$I_P = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.23})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V + I.R_s}{A.V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.24})$$

R_s : est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux.

R_{sh} : est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques.

A: Facteur de qualité.

I.7.5. Paramètres de la cellule solaire

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension (I - V) (**Figure I.21**) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

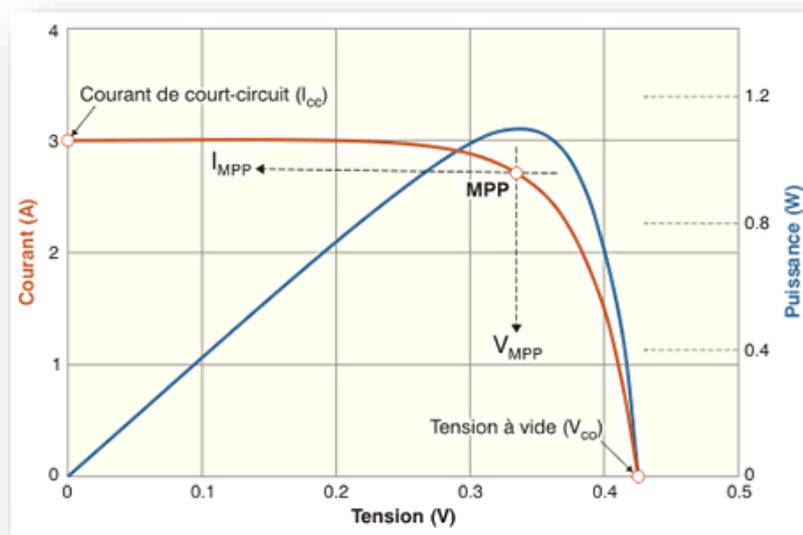


Figure I.21 : Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V) [7].

Les trois grandeurs physiques qui définissent cette courbe sont :

- V_{co} : Tension en circuit ouvert, cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- J_{cc} : Courant court-circuit, cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- P_m : Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp})

Ces paramètres sont définis par :

I.7.5.1. Courant de court-circuit J_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [27].

I.7.5.2. Tension à circuit-ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [28].

La tension V_{oc} est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I.25})$$

Avec :

$$I_S = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \quad (\text{I.26})$$

$$n_i^2 = N_C N_V e^{-E_g/K_B T} \quad (\text{I.27})$$

I.7.5.3. Puissance maximale P_m :

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit [28] :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{I.28})$$

I.7.5.4. Facteur de forme FF :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_m) pour un point de fonctionnement P_m (I_m , V_m) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et J_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{OC}). Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique [27].

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{OC} J_{CC}} \quad (\text{I.29})$$

I.7.5.5. Rendement de conversion η :

Le rendement, η des cellules PV 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} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot J_{CC} \cdot V_{OC}}{P_{in}} \quad (\text{I.30})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [29].

I.7.5.6. Le rendement quantique (EQE)

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents (**Figure I.22**). Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur

s'appelle alors le rendement quantique interne, *IQE* (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce

paramètre s'appelle le rendement quantique externe, *EQE* (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit [29] :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{hc}{\lambda e} \tag{I.31}$$

J_{cc} : est la densité de courant de Court-circuit ($A.cm^{-2}$).

ϕ : est l'éclairement reçu par l'échantillon ($w.cm^{-2}$).

λ : est la longueur d'onde monochromatique (nm).

h : est la constante de Planck (J.s).

c : est la vitesse de la lumière (Jms^{-1}).

q : charge de l'électron. ($1.6 \cdot 10^{-19}$ coul).

E : l'énergie du photo.

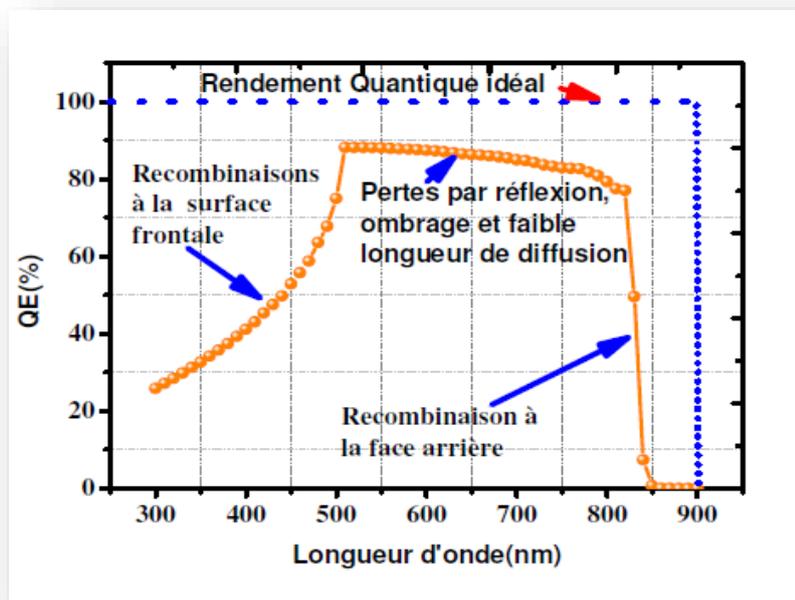


Figure I.22: Rendement quantique externe de la cellule solaire et les différents types de pertes [30].

I.7.6. Les différents types de pertes dans une cellule solaire

Le rendement d'une cellule solaire est limité par différents types des pertes. Ces pertes peuvent être classées selon les pertes intrinsèque et extrinsèque ou selon les pertes optiques et électriques [30] :

I.7.6.1. Les pertes extrinsèques : ce sont les pertes qu'on peut éliminer. Il s'agit notamment des pertes dues à la réflexion, l'ombrage dû aux contacts, la résistance série, la collecte incomplète des porteurs photo générés, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison non radiative.

I.7.6.2. Les pertes intrinsèques : ce type de pertes est dû aux raisons suivantes :

1/ l'incapacité de la cellule solaire mono jonction à répondre efficacement toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire devient transparente pour les photons dont leur énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur $E_{ph} < E_g$. le supplément d'énergie est dissipé sous forme de chaleur.

2/ le deuxième type est dû à la recombinaison radiative dans la cellule.

Pour le deuxième classement (optique et électrique), la **Figure I.23** présente les différentes sources de pertes [30].

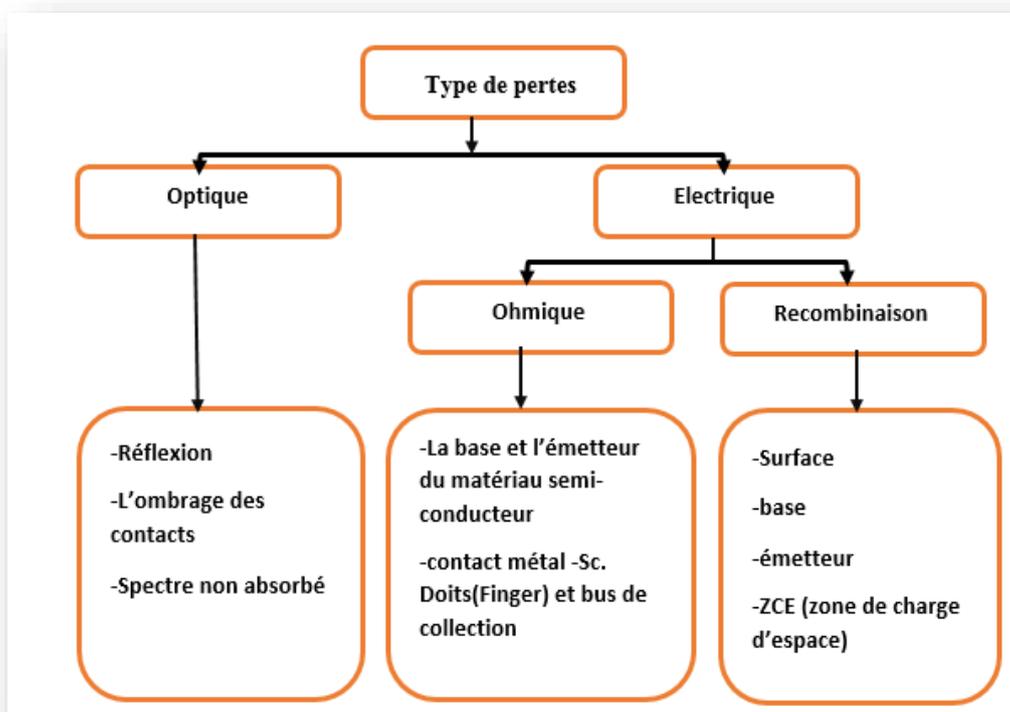


Figure I.23 : Différent type de pertes électriques et optiques existant dans une cellule solaire.

I.8. Étude du matériau InGaN

I.8.1. Historique de (InGaN)

Le GaN fut utilisé pour la première fois par un certain Warren. B Johnson en 1932 lors de son étude sur la structure cristalline du GaN sous des conditions normales. Mais c'est seulement à la fin des années 80 quand on a commencé à réellement l'utiliser pour des diodes électroluminescentes et des détecteurs dans l'ultraviolet.

Par contre l'InN fut utilisé pour la première fois en 1972 dans un procédé de pulvérisation radiofréquence. Malheureusement, les résultats obtenus ont montré que ce matériau avait une mobilité électronique très réduite. D'un autre côté, ce matériau avait l'avantage d'avoir un très grand seuil d'absorption de 1.9 eV qui lui permet d'avoir une grande absorption dans l'infrarouge, Bizarrement ce dernier n'avait pas une émission lumineuse proportionnelle à son gap d'énergie contrairement au matériau GaN.

Cependant, l'utilisation de la technique de dépôt chimique en phase vapeur a permis de produire des couches de InGaN et AlInN améliorés au niveau de la luminescence. Mais c'est seulement une fois quand on a utilisé la technique d'épitaxie par jet moléculaire qu'on a réussi à obtenir une meilleure qualité cristalline. En outre, il a fallu attendre plusieurs années pour obtenir des films de haute qualité disposant d'un gap d'énergie qui couvre quasiment tout le spectre solaire par Oussama et al, en 2002 [31].

Actuellement, ce genre de matériau est devenu un sujet de recherche de haute importance.

I.8.2. Définition d'InGaN

Ce matériau est un semi-conducteur faisant partie de la catégorie des nitrures (III) c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne (V) du tableau de Mendeleïev, à savoir le gallium et l'indium, voir la **Figure I.24**. Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN). C'est pourquoi, nous allons principalement décrire dans ce chapitre les propriétés structurales, électriques et optiques de l'InGaN qui en découle [32].

	III	IV	V	VI
	5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène
	13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure
80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium

Figure I.24 : Tableau périodique partiel

I.8.3. Caractéristique structurale

I.8.3.1. Structure cristalline

Les nitrures GaN et InN se présentent essentiellement sous deux formes cristallines : la structure hexagonale « wurtzite » et la structure cubique « zinc-blende ». Dans les conditions ambiantes, la structure la plus stable thermodynamiquement est la structure hexagonale « wurtzite » (**Figure I.25**). Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un côté hexagonale a , la hauteur de la maille élémentaire c , et le paramètre interne u décrivant la séparation des sous-réseaux des anions (N^{3-}) et des cations (Ga^{3+}) selon l'axe c [33]. Ce dernier est défini comme étant la longueur de la liaison cation-anion divisée par c . Il est égal à 0,375 pour un cristal wurtzite idéal.

La deuxième structure dite « zinc-blende » (**Figure I.26**) est constituée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, l'un est constitué d'un élément III et l'autre d'un élément V, les deux sous réseaux étant décalés du quart de la diagonale principale soit $\frac{\sqrt{3}}{4}$, « a » étant la longueur du cube, Le **Tableau 1.1** présente les paramètres de maille des nitrures GaN et l'InN pour les deux structures.

Cette structure ne peut quant-à elle être obtenue que dans des conditions de croissance bien particulières, elle est thermodynamiquement instable. Dans les nitrures les liaisons sont de

type covalent présentant de propriétés partiellement ioniques, telle que l'une des quatre liaisons reçoit deux électrons de l'élément V.

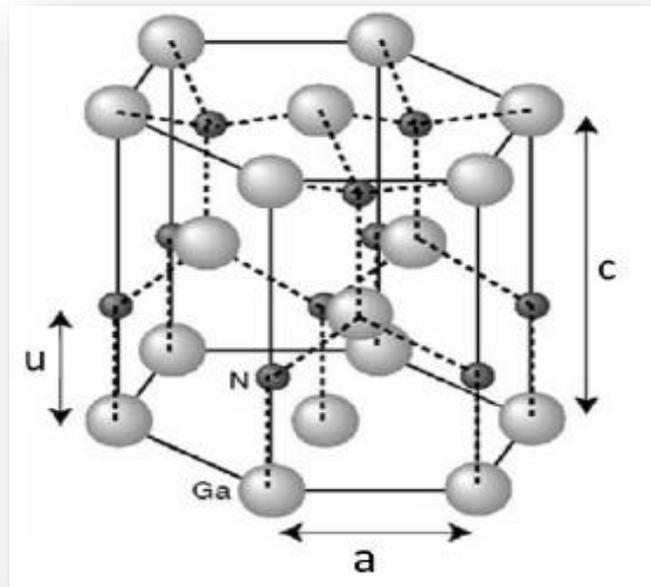


Figure I.25 : Structure wurtzite, exemple du GaN [34].

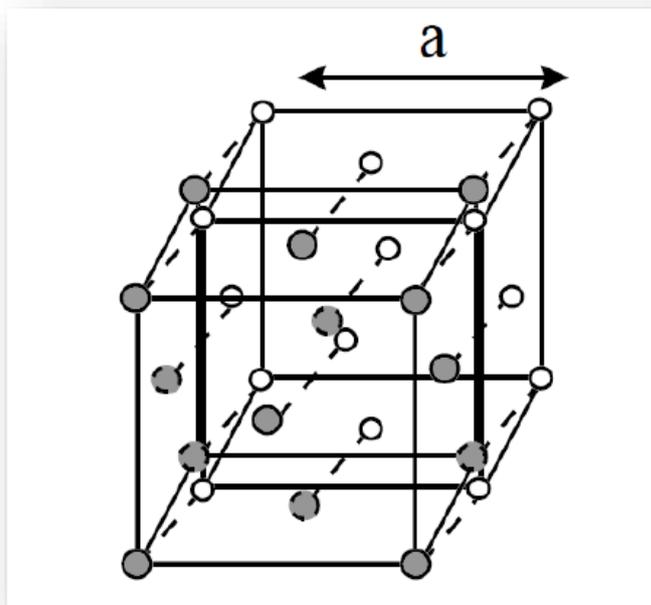


Figure I.26 : Structure cubique zinc-blende, exemple du GaN [32].

Tableau I.1 : Paramètres structuraux a , c , u et u pour le GaN et l'InN [35,36] .

	Wurtzite			Cubique
	a (Å°)	c (Å°)	u (Å°)	a (Å°)
GaN	3.189	5.185	0.377	4.47
InN	3.54	5.70	0.378	4.96

I.8.3.2. Propriétés électrique

Les propriétés électriques de n'importe quel matériau sont dues à la différence d'énergie trouvée entre la bande de conduction et la bande de valence. Ces dernières sont composées à leur tour de deux niveaux énergétiques continus qui dépendent des différents niveaux électroniques des atomes, autrement dit la densité d'état du matériau qui varie par rapport aux caractéristiques du matériau et du facteur de température. La densité d'état de l'alliage InGaN pour la bande de conduction et la bande de valence est donnée par les équations suivantes [37]:

$$N_c = [0.9x + (1 - x) \times 2.3] \times 10^{18} [\text{cm}^{-3}] \quad (\text{I.32})$$

$$N_v = [5.3x + (1 - x) \times 1.8] \times 10^{19} [\text{cm}^{-3}] \quad (\text{I.33})$$

Où : x est la concentration d'indium.

I.8.3.2.1. Gap d'énergie interdite dans les nitrures

Le gap d'énergie interdite des nitrures est la caractéristique la plus intéressante dans cette famille de semi-conducteur, d'ailleurs c'est la principale raison pour laquelle les recherches sont focalisées là-dessus. Leur gap d'énergie interdite direct les rends uniques dans leurs genres en leur permettant de couvrir la majorité du spectre solaire, en allant du proche ultraviolet à l'infrarouge, ce qui est vraiment prometteur pour des applications photovoltaïques ou bien de LEDs grâce à la quasi-conversion ou l'émission de lumière.

Le GaN a un gap direct de 3.3eV à la température de 300K et une bande de valence divisée en trois niveaux d'énergies créés par les interactions spin-orbites (E_{so}) et le champ électrique cristallin (E_{cr}). Ce qui est le même cas pour l'InN qui présente lui aussi une bande de valence divisée en trois branches d'énergies avec un gap direct de 0.79 eV à une température de 300K. Ce qui est proche de la valeur recommandée par Vurgaftman et Mayer qui est de 0.78 eV, calculée à 0K [38, 39]. Les diagrammes de bande théorique pour GaN et InN sont illustrés dans les deux **Figures (I.27)** et **(I.28)** respectivement.

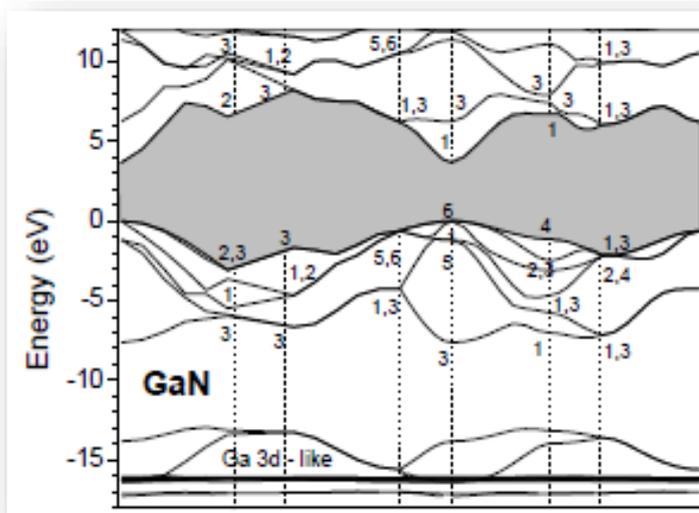


Figure I.27 : Diagramme de bande GaN calculé avec la théorie de structure électronique des quasi-particules [40].

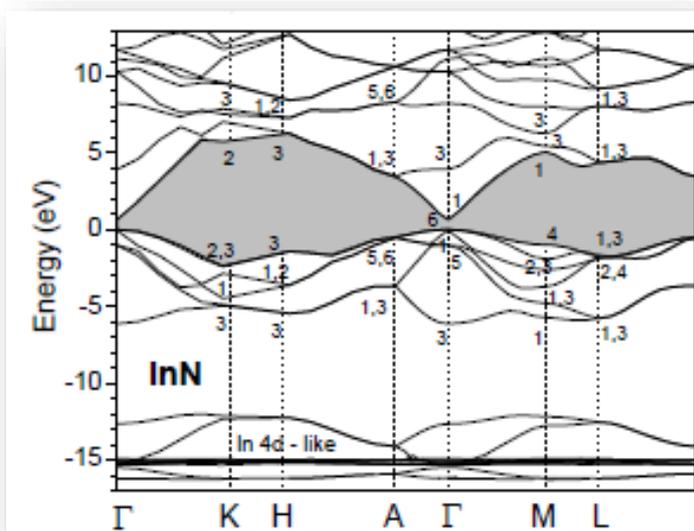


Figure I.28 : Diagramme de bande InN calculé avec la théorie de structure électronique des quasi-particules [40]

Où les densités d'états du GaN et InN sont représentés par les parties droites et les bandes d'énergies interdites par les parties grises. Les nombres représentent les points de haute

symétrie en utilisant la notation de Rashba avec les maximums des bandes de valences présent comme la référence des énergies [40].

I.8.3.2.2. L'expression du gap de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$

Comme les autres nitrures, la principale caractéristique d' InGaN , pour laquelle il est largement étudié est sa bande d'énergie interdite (gap) directe [41]. Cette dernière peut être exprimée selon la loi de Vegard modifiée qui relie les valeurs des bandes interdites de 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 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 [42]. Pour GaN , la bande d'énergie interdite est de 3,42 eV [42].

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, constantes 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 [37] :

$$E_g^{\text{InGaN}} = x \cdot E_g^{\text{InN}} + (1 - x)E_g^{\text{GaN}} - b \cdot x \cdot (1 - x) \quad (\text{I.34})$$

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 : la concentration d'indium dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

b : paramètre de courbure égal a 1.43.

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 **Figure 1.29** .

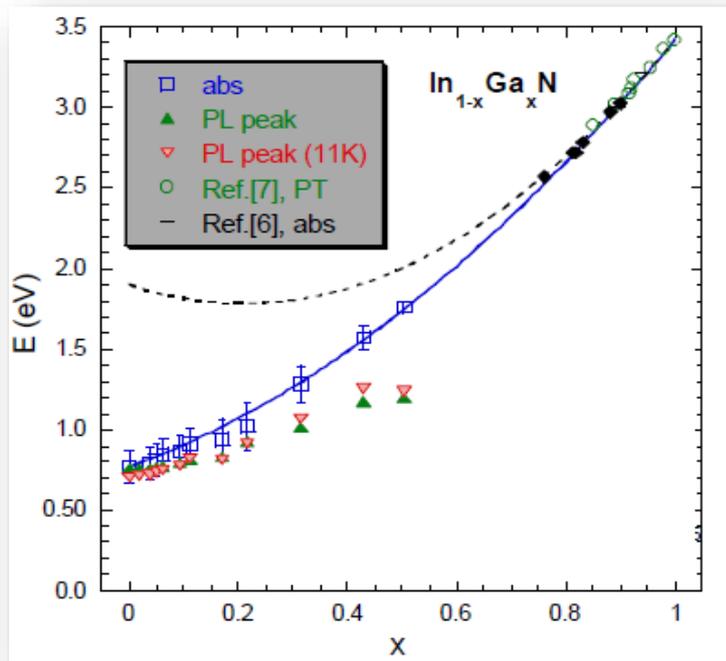


Figure 1.29 : Evolution du gap d'énergie interdite de l' $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la concentration du Ga[43].

I.8.3.2.3. Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température

Le gap d'énergie interdite dépend généralement de plusieurs facteurs physiques comme la température, donc il est nécessaire de mentionner son évolution en fonction de la température, qui est donnée par l'expression de Varshni suivante [44] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{I.35})$$

$E_g(T)$: Gap d'énergie de l'alliage à la température T (eV).

α : Constante empirique ($\text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$).

β : Constante associée à la température (K).

Ces paramètres pour le GaN et l'InN sont rassemblés dans le Tableau I.2. L'évolution des gaps d'énergie de GaN et de l'InN en fonction de la température est représentée dans la **Figure I.30** et la **Figure I.31**, respectivement [45].

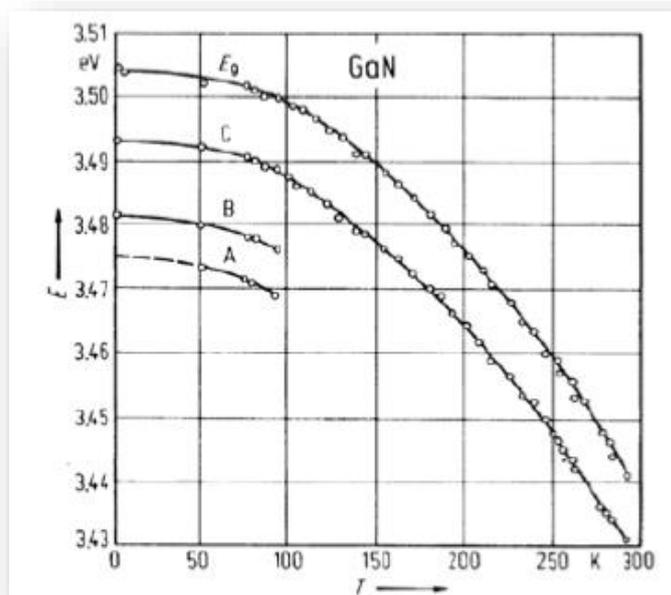


Figure 1.30 : Evolution du gap d'énergie de GaN en fonction de la température. Les courbes A, B et C font référence aux excitons du même nom

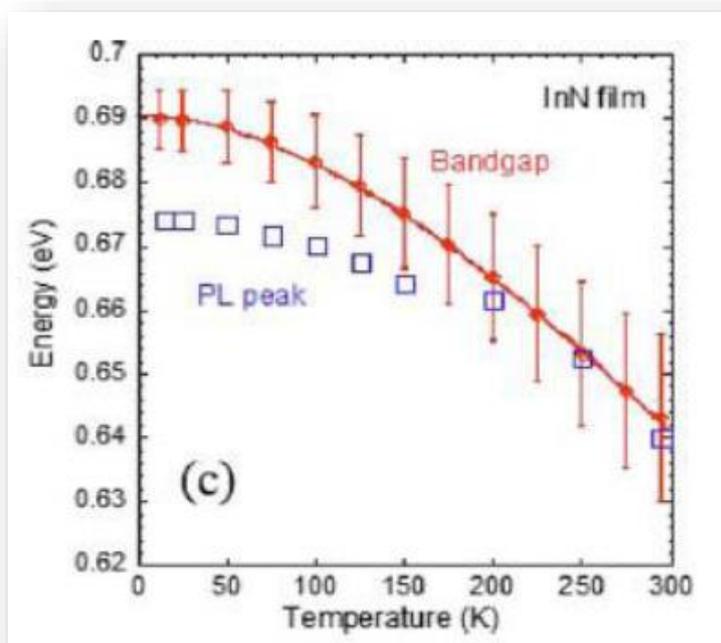


Figure 1.31 : Evolution du gap d'énergie pour l'InN en fonction de la température

Tableau I. 2 : Évolution du gap de GaN et InN en fonction de la température.

	Matériau	α (meV.K ⁻¹)	β (K)	E_g (OK) (eV)	E_g (300K) (eV)
Vurgaftman Mayer	GaN	0.909	830	3.51	3.44
	InN	0.245	624	0.78	0.75
Bourgov Wu	GaN	0.77	600	3.47	3.39
	InN	0.41	454	0.69	0.64

I.8.3.2.4. Longueur de diffusion

La longueur de diffusion L est la distance moyenne sur laquelle les porteurs peuvent se déplacer par diffusion. Elle est définie par[46] :

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (\text{I.36})$$

Avec :

- τ le durées de vie des porteurs.
- D le coefficient de diffusion des porteurs [$\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$], défini par[46] :

$$D = kT\mu/q \quad (\text{I.37})$$

μ : la mobilité des porteurs [$\text{cm}^{-2}.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$].

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire. En effet, si les électrodes collectant le courant produit par la cellule sont éloignées d'une distance supérieure à la longueur de diffusion, alors les charges se recombineront avant d'être collectées.

La **Figure I.32** présente l'évolution de la longueur de diffusion des trous dans le GaN en fonction de la concentration d'électrons. On observe que la longueur de diffusion des trous chute de manière quasiment exponentielle avec l'augmentation de la concentration des électrons à cause de l'augmentation de la probabilité de recombinaison.

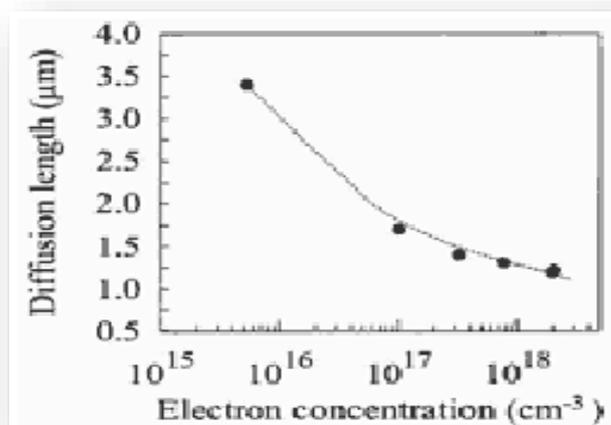


Figure I.32 : Longueur de diffusion des trous dans GaN en fonction de la concentration d'électrons [47].

Les propriétés électriques du GaN et de l'InN sont rassemblées dans le **Tableau I.3**.

Tableau I.3 : Résumé des propriétés électriques du GaN et de l'InN à 300 K[44].

	GaN	InN
Gap d'énergie interdite E_g (eV)	3.39	0.7
Affinité électronique χ (eV)	4.1	5.8
Masse effective des électrons, m_e	0.20 m_0	0.11 m_0
Masse effective des trous, m_h	0.80 m_0	0.65 m_0
Densité d'états effective de la Bande de conduction, N_c [cm ⁻³]	2.3 $\times 10^{18}$ 4.3 $\times 10^{14} \cdot T^{3/2}$	9 $\times 10^{17}$ 1.76 $\times 10^{14} \cdot T^{3/2}$
Densité d'états effective de la bande de valence, N_v [cm ⁻³]	4.6 $\times 10^{19}$ (8.9 $\times 10^{15} \cdot T^{3/2}$)	5.3 $\times 10^{19}$ (10 $^{16} \cdot T^{3/2}$)
Mobilité des électrons μ_e [cm ² .v ⁻¹ .s ⁻¹]	1400	3200
Mobilité des trous μ_h [cm ² .v ⁻¹ .s ⁻¹]	<20	17-36
Paramètres de Varshni : α [meV/K] β [K]	0.909 830	0.41 454

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'énergie solaire et constante d'illumination et le principe de fonctionnement et les caractéristiques principales d'une cellule photovoltaïque. aussi on a déduit les différents paramètres électriques (rendement, facteur de forme, le courant de court-circuit, ...), et le circuit équivalent, et les différents types de pertes d'une cellule photovoltaïque,

Nous avons aussi présenté son caractéristiques et les propriétés de l'InGaN tant sur le plan structurel, qu' cristalline, et électrique.

Chapitre II :

Logiciel de simulation

SCAPS

II.1.Introduction

Avec le développement du secteur de recherche sur l'énergie photovoltaïque et de là, la cellule photovoltaïque, on a vu croître la nécessité de développer les moyens de recherche, parmi ces moyens les logiciels de simulation. Il existe plusieurs logiciels de simulation d'une cellule photovoltaïque à base de couches minces, on peut citer : AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, Silvaco etc. Dans ce travail nous allons utiliser le logiciel SCAPS-1D.

II.2.Présentation du logiciel SCAPS-1D

SCAPS (Soler Cell Capacitance Simulator) est un programme de simulation de cellule solaire tridimensionnelle développée au département d'électronique et des systèmes d'information (ELIS) de l'Université de Gand, Belgique.

SCAPS contient plusieurs panneaux (fenêtres ou pages). Le principal panneau est « le panneau de l'action ». Il permet de régler le problème, définir la liste d'actions de calculs requis, exécuter les calculs, naviguer vers d'autres panneaux et sauver les résultats de l'intrigue[48].

II.3.Utilisation du logiciel

On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE. SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action présenté sur la **Figure II.1**.

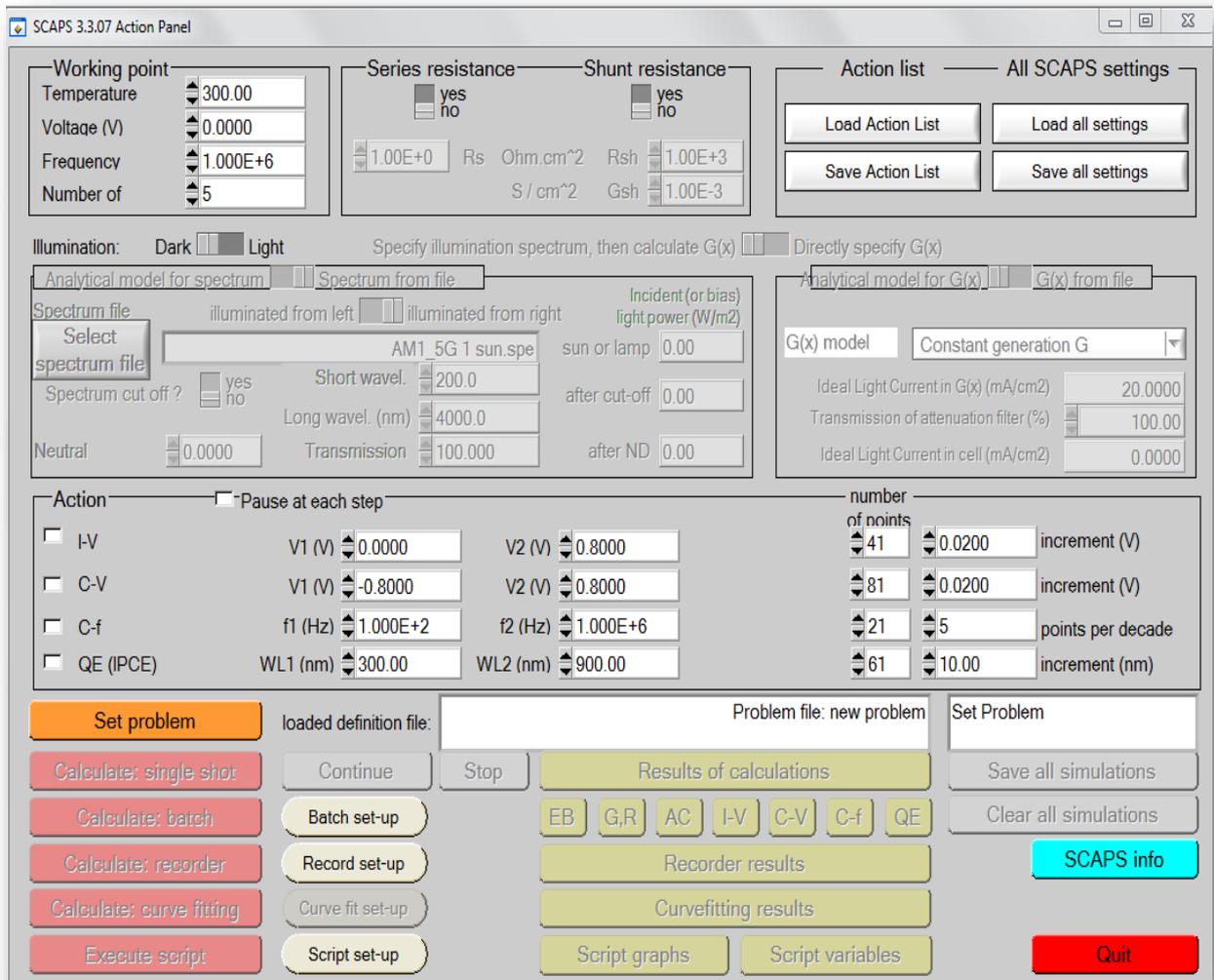


Figure II.1 : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.

II.3.1 Action panel

En premier lieu en lançant l'application, la fenêtre d'exécution qui est le menu principal s'ouvre.

On peut à n'importe quel moment accéder aux deux autres fenêtres, fenêtre de conception de dispositif et fenêtre des résultats comme montre la **Figure II.2** ci-dessous [49].

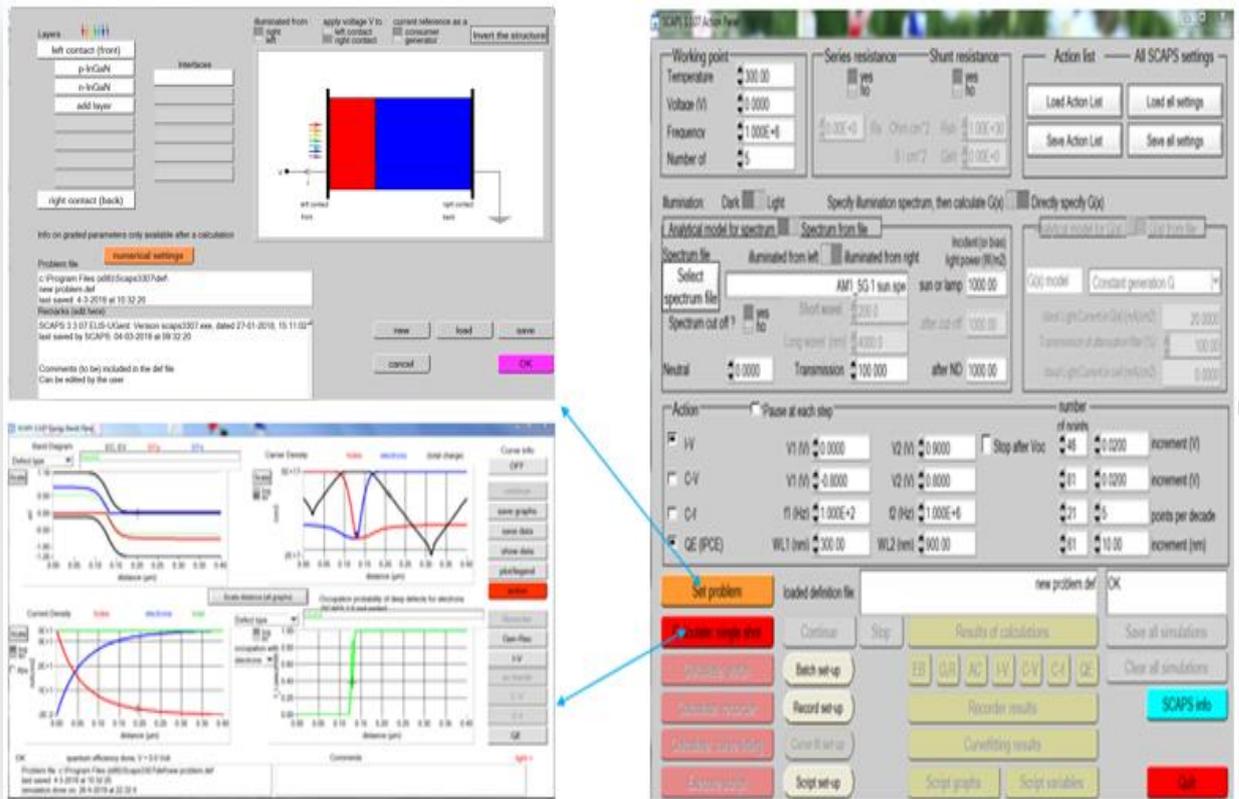


Figure II.2 : Fenêtre d'exécution, de conception du dispositif et des résultats du logiciel SCAPS.

II.3.1.1. Bloc « working point », « illumination » et « series and shunt resistance »

Cette partie spécifie le point de fonctionnement.

- ✓ working point

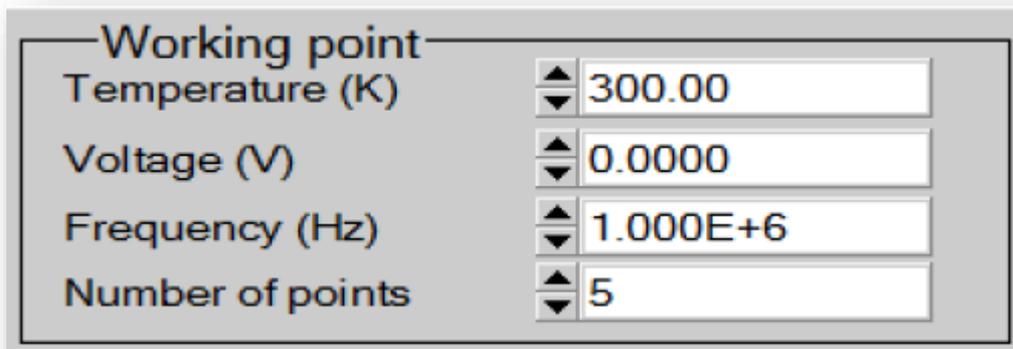


Figure II.3 : Le point de fonctionnement.

Les champs présentés sont [50]:

- **La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS, seulement $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seuls variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant.
- **Le voltage V** : il ne concerne pas les simulations $I-V$ et $C-V$. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation $C-f$ et $EQE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0 V, s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.
- **La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations $I-V$, $EQE(\lambda)$ et $C-f$. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique $C-V$ est simulée.
- **Nombre de point** : le nombre de point utilisé pour tracer les courbes.

✓ **Résistance série et résistance shunt (parallèle) :**

ces deux paramètres influencent sur la caractéristique $I-V$, elle représente les pertes ohmiques de la cellule (voir la **Figure II.4**) [49].

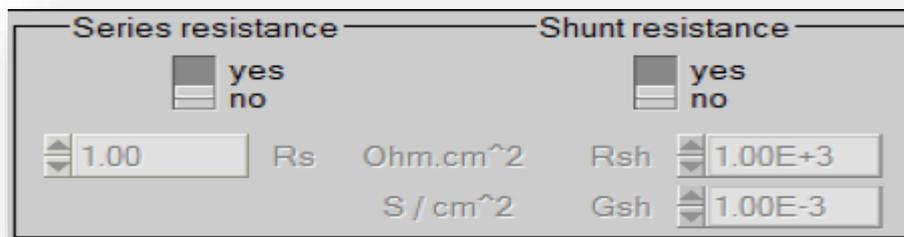


Figure II.4 : Résistance série et parallèle.

- ✓ **L'illumination** : elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour $QE(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one sun (= 1000 W/m²) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre[50].

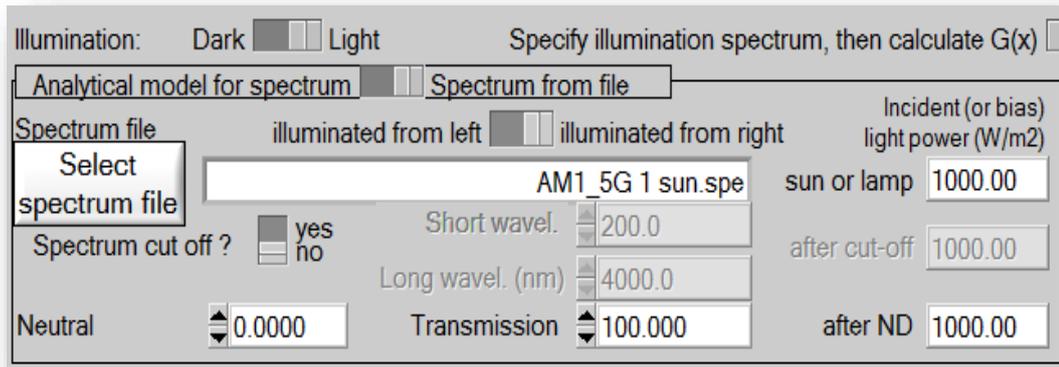


Figure II.5 : L'illumination

II.3.1.2. Bloc «Action »

On peut donc grâce à ce bloc sélectionner les grandeurs voulus afin de les simuler en effet :

- ✓ On peut mesurer la caractéristique I-V en remplissant les champs associés : le point initial, le point final, le pas et le nombre de point qui s'affiche automatiquement.
- ✓ Idem pour la capacitance-voltage, capacitance-fréquence et la réponse spectrale [49].

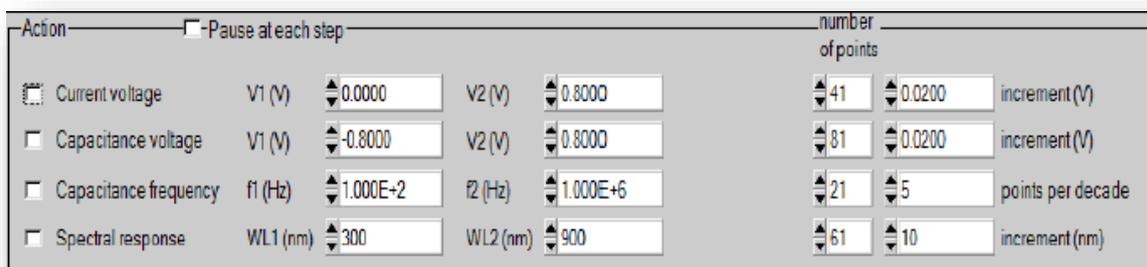


Figure II.6 : Action de bloc.

II.3.1.3. Panneau de définition de la cellule solaire

On appuyant sur le bouton « set problem » situé dans le panneau d'action, on obtiendra la fenêtre représentée sur la **Figure II.7** : nommée panneau de définition d'une cellule solaire ou bien Solar Cell Definition Panel [48].

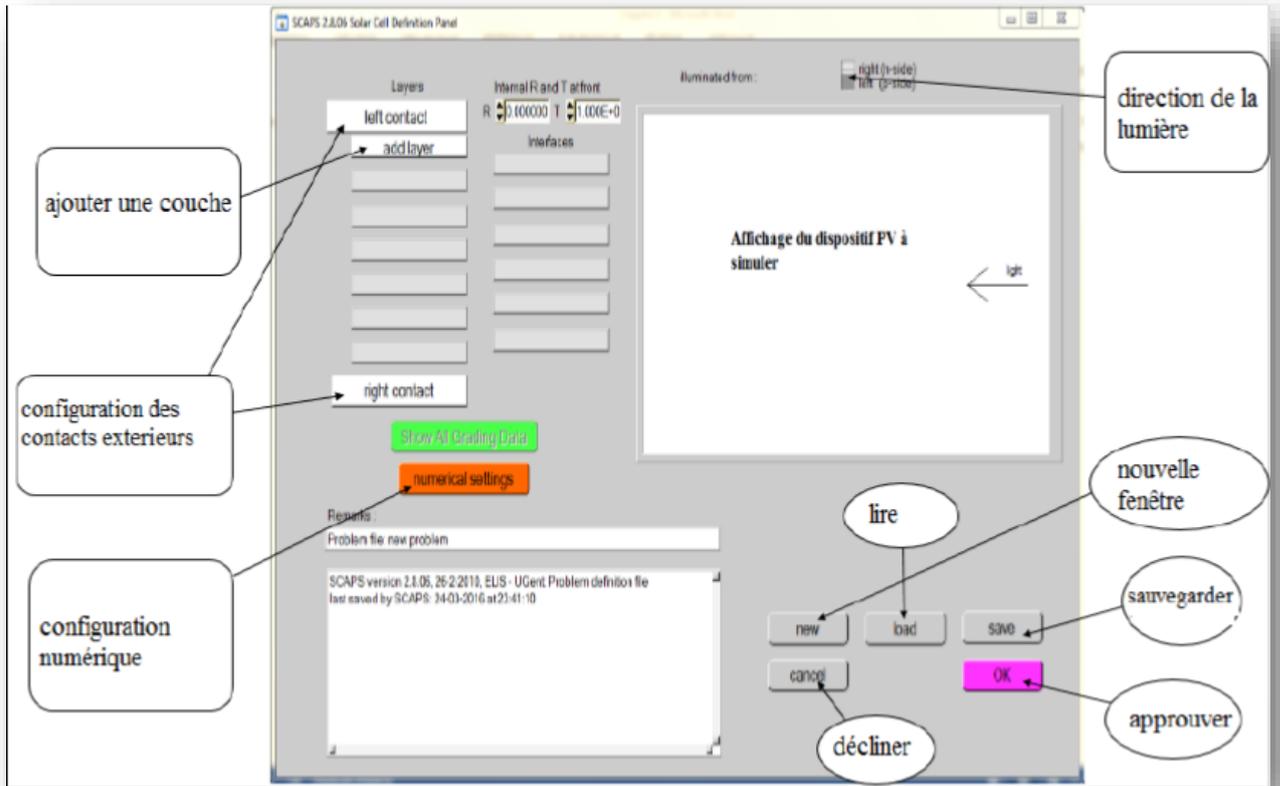


Figure II.7 : Panneau de définition d’une cellule solaire.

a. **New** : afin crée un nouveau dispositif photovoltaïque.

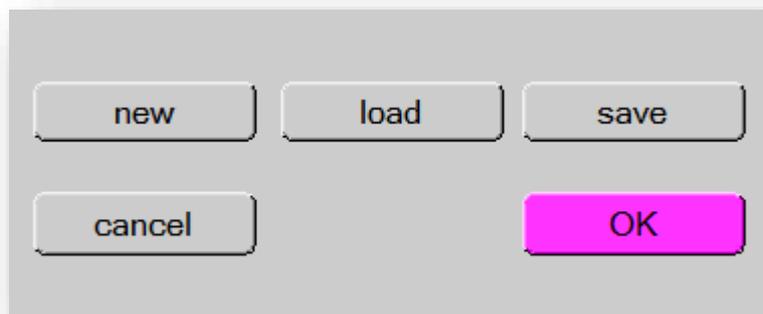


Figure II.8 : Définir le problème

b. **Add a layer** :

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure II.9) s’ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type de dopage).

Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite.

Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile.

Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel.

Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres.

Dans le cinquième block, **Figure II.10**, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,...).

Dans le sixième block, on défini l'absorption de la couche, comme le montre la **Figure II.11**. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut introduite sous forme de données. SCAPS fourni un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.

LAYER 1	p-InGaN
thickness (μm)	0.130
The layer is pure A: y = 0, uniform	uniform pure A (y=0)
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.310
electron affinity (eV)	5.560
dielectric permittivity (relative)	13.270
CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	1.390E+18
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	5.060E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm^2/Vs)	3.250E+2
hole mobility (cm^2/Vs)	4.721E+1

Figure II.9 : Propriétés de la couche ajoutée.

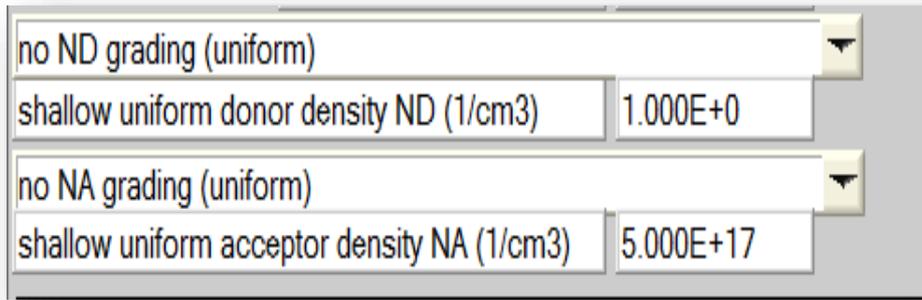


Figure II.10 : Propriétés des dopages définis.

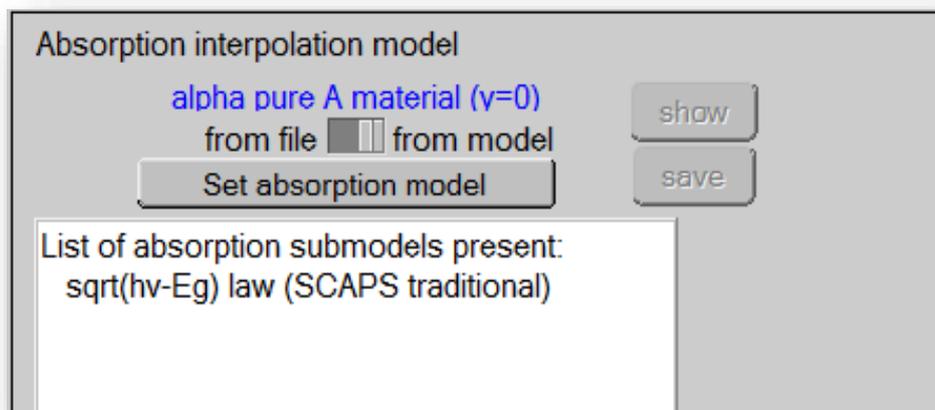


Figure II.11 : Modèle de l'absorption

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche (**Figure II.12**). Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.

Recombination model	
Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm ³ /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm ⁶ /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm ⁶ /s)	0.000E+0

Defect 1 of p-InGaN	
defect type	Neutral
capture cross section electrons (cm ²)	1.000E-16
capture cross section holes (cm ²)	1.000E-16
energetic distribution	Single
reference for defect energy level Et	Above EV (SCAPS < 2.7)
energy level with respect to Reference (eV)	0.655
characteristic energy (eV)	0.100
no Nt grading (uniform)	
Nt total (1/cm ³)	uniform Nt \updownarrow 1.537E+17

Figure II.12 : Définition des types de recombinaison présents.

Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.

c .Right and left contact : afin de modifier les paramètres des surfaces extérieures gauche et droite de la cellule.

Electrical properties

Thermionic emission / surface recombination velocity (cm/s) :

electrons	1.00E+3				
holes	1.00E+3				
Metal work function (eV)	6.7504	or	<input checked="" type="checkbox"/>	flat bands	

Majority carrier barrier height (eV) :

relative to EF	0.1196				
relative to EV or EC	0.0000				

In batch mode, recalculate Phi m:

at each step
 at first step only

Allow contact tunneling

Effective mass of electrons	1.00E+0				
Effective mass of holes	1.00E+0				

Optical properties

optical filter

	Filter Mode				
		<input checked="" type="checkbox"/>	transmission		
		<input type="checkbox"/>	reflection		

	Filter Value				
<input checked="" type="checkbox"/> From Value		0.000000			
<input type="checkbox"/> From File	Complement of Filter	1.0000E+0			

Figure II.13 Panneau des propriétés des contacts.

Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.

Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).

La barrière des porteurs majoritaires.

L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

d .Save : afin de sauvegarder la cellule à étudier.

e. Load : afin de sélectionner une cellule déjà sauvegarder.

f. Ok : approuver la cellule construite et revenir au panneau d'action pour finir le travail.

g. **Cancel** : décliner le panneau de définition et revenir au panneau d'action.

II.3.2. Panneau des bandes d'énergies (résultats)

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la **Figure II.14**. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper et Coller vers, par ex., Excel, origine ou sauve garder les valeurs dans un fichier de données[48].

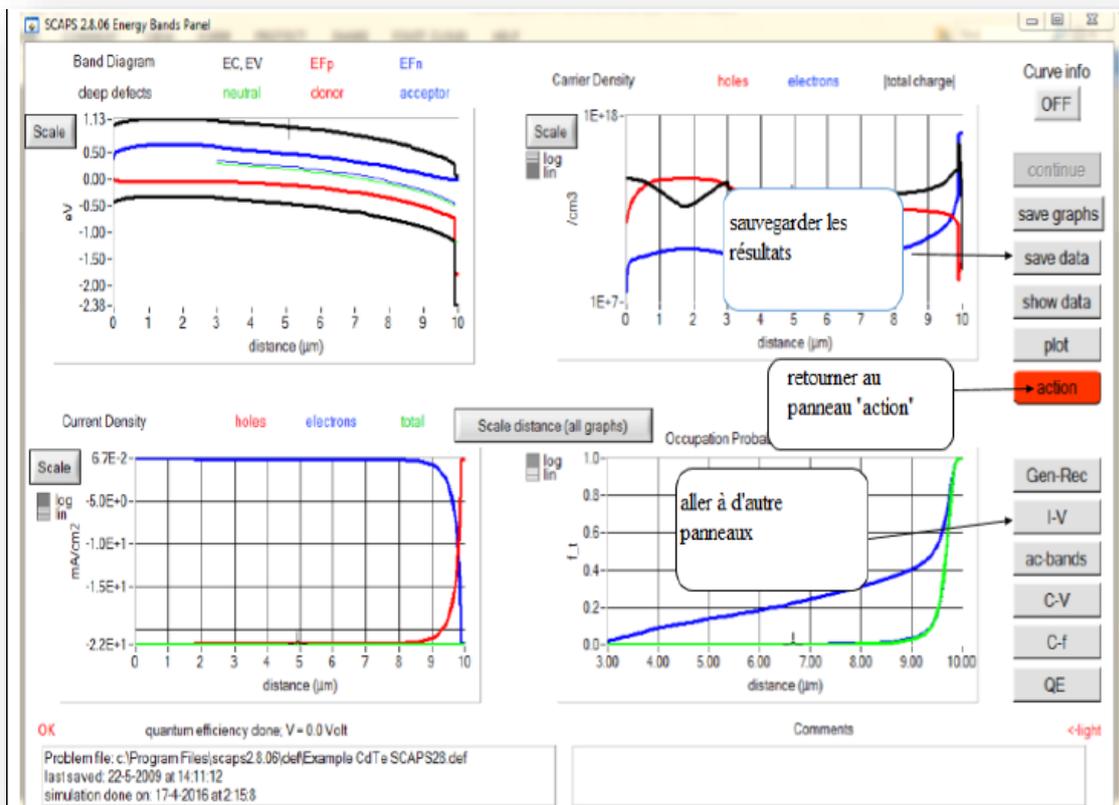


Figure II.14 : Panneau des bandes d'énergie.

Les grandeurs simulées sont :

- Caractéristique I-V.
- Capacitance en fonction de la tension « C-V ».
- Capacitance en fonction de la fréquence « C-f ».
- Rendement quantique Q-E.
- Bande d'énergie « Energy band » et bande d'énergie en régime alternatif «AC Band ».

II.3.3. Protocole de simulation

Le protocole de simulation d'une cellule solaire par logiciel SCAPES est comme suit [49] :

- Etape 1 : après le lancement du logiciel et l'ouverture de la fenêtre d'exécution on modifie les paramètres : la température, illumination,...
- Etape 2 : modifier la structure de la cellule à travers la fenêtre « définition panel ».
- Etape 3 : exécuter la simulation « calculate », noter les résultats de simulation (V_{co} , I_{cc} , FF , η) dans la fenêtre « I-V panel », la caractéristique I.V. On peut encore afficher et copier ces résultats sous forme de tableau en appuyant « show ».

II.4. Aperçu théorique

Le programme SCAPS 1-D résout les équations pour des structures contenant un certain nombre de couche semi-conducteur qui ont un profil de dopage arbitraire (comme fonction de la position), avec une distribution énergétiques arbitraires des niveaux profonds des donneurs ou des accepteurs sous différents types d'éclairément. Des itérations de résolutions des équations sont faites jusqu'à convergence de l'algorithme. SCAPS 1-D a été introduit dans la littérature avec les articles.

Alors que les algorithmes de SCAPS sont détaillés dans les références

L'étude de la plus part des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la résolution simultanée de **l'équation de Poisson** (1) et de **l'équation de continuité** pour les électrons (2) et les trous (3) avec des conditions aux limites appropriées [51].

$$\frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (p(x) - n(x) + N_D - N_A + \rho_p - \rho_n) \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{d}{dx} J_n(x) - e \frac{\partial n(x)}{\partial t} - e \frac{\partial p_n}{\partial t} = G(x) - R(x) \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{d}{dx} J_p(x) + e \frac{\partial p(x)}{\partial t} + e \frac{\partial p_p}{\partial t} = G(x) - R(x) \quad (\text{II.3})$$

Tel que ; Ψ est le potentiel électrique, e la charge électrique, ϵ_r permittivité relative, ϵ_0 permittivité du vide, p et n concentrations de trous et électrons, N_D et N_A la charge des impuretés donneurs et accepteurs, ∂p et ∂n la distribution de trou et d'électron, J_p et J_n densité de courant de trou et électron, $G(x)$ et $R(x)$ la génération et recombinaison des charges .

Les équations de transport : basées sur le modèle de dérive-diffusion et qui relient les densités de courant aux champs électriques et aux gradients de concentration [20],

$$\vec{J}_n = q\mu_n n \vec{\xi} + qD_n \vec{\nabla} n \quad (\text{II.4})$$

$$\vec{J}_p = q\mu_p p \vec{\xi} - qD_p \vec{\nabla} p \quad (\text{II.5})$$

où $\vec{\xi}$ est le champ électrique.

μ_n et μ_p sont les mobilités respectives des électrons et des trous.

D_n et D_p leurs coefficients de diffusion définis par les relations d'Einstein :

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \quad (\text{II.6})$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad (\text{II.7})$$

Où k est la constante de Boltzmann et T la température.

II.5. Avantages et inconvénients du SCAPS

Les avantages du SCAPS sont multiples à savoir :

la grande vitesse d'exécution, les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif, la possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci, l'introduction de résistances en série et parallèle, et l'obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité-fréquence. Cependant, ses inconvénients concernent l'absence de la réflexion aux interfaces de différentes couches constituant la cellule qui n'est pas gérée par le SCAPS et son programme de traçage inflexible. D'autant plus, qu'il peut être instable lorsque le dispositif est loin d'être idéal et comprend des barrières secondaires [52], et Dans SCAPS les dopants sont complètement ionisés : quel que soit la température, et 3 types de mécanismes de recombinaisons sont utilisés : recombinaisons SRH, Auger et radiatives [53].

II.6. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre la présentation du logiciel SCAPS et utilisation du logiciel, aperçu théorique, avantages et inconvénients du logiciel.

Chapitre III:
Résultats et
interprétations

III.1.Introduction

La cellule solaire étudiée est une jonction p-n en $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$. Les paramètres d'entrée de cette cellule sont les épaisseurs, le dopage des deux régions p et n, le gap d'énergie du InGaN, les densités effectives des électrons et des trous, la température, les mobilités, les vitesses thermiques des électrons et des trous, ainsi que le spectre du soleil.

Puisque les cellules solaires à base du InGaN sont destinées aux applications spatiales, le spectre du soleil utilisé est le AM1.5G Tous ces paramètres sont introduits dans l'interface de SCAPS pour simuler la caractéristique courant-tension de la cellule et son rendement quantique externe. L'effet des épaisseurs et du dopage des deux régions et aussi étudié, ainsi que l'effet de la durée de vie des porteurs minoritaires (τ_n), l'effet de la vitesse de recombinaison en surface ($S_{n,p}$), l'effet de la température et l'effet de la densité du piège profond.

III.2.Description de la structure

Notre structure de référence est une cellule p-n à base d' $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ (**Figure III.1**) dont les épaisseurs et le dopage, choisis sont regroupés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Epaisseurs et dopage de la structure étudiée [54].

Région	Epaisseur (nm)	Dopage (cm^{-3})
Emetteur	130	5×10^{17}
Base	270	5×10^{17}

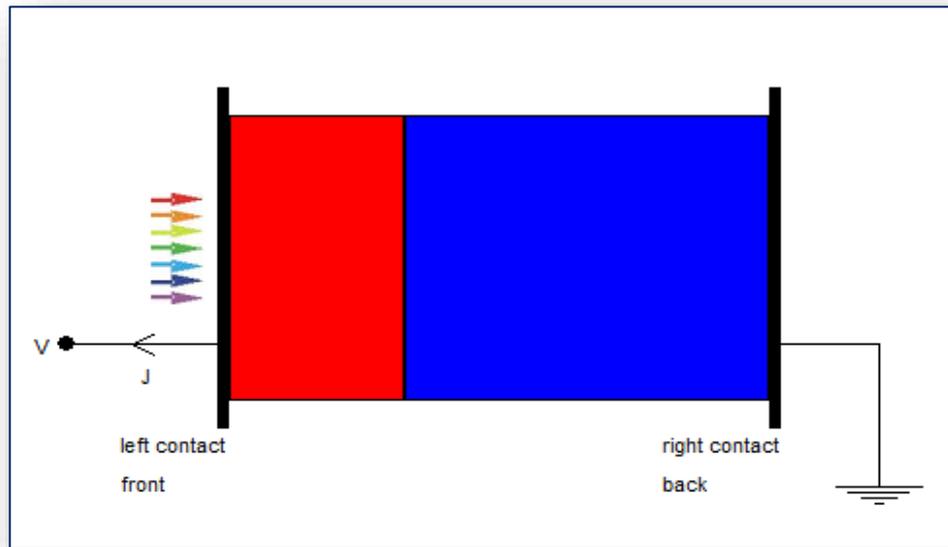


Figure III.1 : Structure de la cellule à simuler sous SCAPS.

III.3. Paramètres de simulation

L'InGaN, c'est le matériau utilisé dans notre travail, est défini à partir de ses paramètres tirés de la littérature, dont les valeurs sont rassemblées dans le **Tableau III.2**.

Tableau III.2 : Paramètres de simulation à 300 K pour une concentration de 65% de l'InN[54]

Paramètre	Désignation	Valeur
Bande interdite E_g (eV)	$E_g = 0.74x + 3.4(1-x) - 1.43(1-x)x$	1.31
Affinité électronique (eV)	$\chi = 4.1 + 0.7(3.4 - E_g)$	5.56
Permittivité ϵ	$\epsilon_r = 14.6x + 10.4(1-x)$	13.27
Densité d'états des électrons ($\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	$N_C = 0.9x + 2.3(1-x)$	1.39
Densité d'états des trous ($\times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)	$N_V = 5.3x + 1.8(1-x)$	5.06
Durée de vie des électrons et des trous τ_{n0} et τ_{p0} (ns)	$\tau_{n0} = \tau_{p0}$	6.5
Vitesse de recombinaison en surface S_n et S_p (cm/s)	$S_n = S_p$	1000

III.4. Modèles physiques utilisés dans la simulation

III.4.1. Mobilité

Pour notre étude, on a utilisé le modèle de Caughey-Thomas , la mobilité dépendante de la concentration des porteurs définie par l'expression[55] :

$$\mu_i(N) = \mu_{\min,i} + \frac{\mu_{\max,i} - \mu_{\min,i}}{1 + (N/N_{g,i})^{\gamma_i}} \quad (\text{III.1})$$

- i représentant soit les électrons (**e**), soit les trous (**h**).
- N la concentration de dopage [cm^{-3}].
- N_g le dopage critique dépendant du matériau [cm^{-3}].
- γ une constante.

Les valeurs de ces différents paramètres sont regroupées dans le **Tableau III.3**.

Tableau III.3: Paramètres utilisés dans le calcul de la mobilité des porteurs en fonction de la concentration de dopage.

Porteur	Paramétré	Valeur
Electrons	$\mu_{\min,e} [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}]$	55
	$\mu_{\max,e} [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}]$	1000
	γ_i	1
	$N_{g,h} [\text{cm}^{-3}]$	2×10^{17}
Trous	$\mu_{\min,h} [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}]$	3
	$\mu_{\max,h} [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}]$	170
	γ_i	2
	$N_{g,h} [\text{cm}^{-3}]$	3×10^{17}

III.4.2. Recombinaison

Afin de modéliser les pertes dans la structure, nous prenons en compte les recombinaisons de Shockley-Read-Hall (SRH) , définies par l'expression :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_{po} \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT_L}\right) \right] + \tau_{no} \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-E_{trap}}{kT_L}\right) \right]}$$

Avec :

- n et p les concentrations d'électrons et de trous, respectivement [cm^{-3}].
- n_{ie} la concentration intrinsèque d'électrons [cm^{-3}].

- τ_{no} et τ_{po} les durées de vie des électrons et des trous[s].
- E_{trap} la différence d'énergie entre la position énergétique du défaut et le niveau de Fermi intrinsèque [eV].
- k la constante de Boltzmann [eV.K⁻¹].
- T_L la température [k]

$$\tau_{no} = \frac{1}{\sigma_n V_{thn} N_t} \quad (III.2)$$

$$\tau_{po} = \frac{1}{\sigma_p V_{thp} N_t} \quad (III.3)$$

Où :

- $\sigma_{n,p}$ Sections efficaces de capture par l'électron et le trou.
- $V_{thn,p}$ la vitesse thermique des électrons et des trous.
- N_t Concentration des défauts.

III.4.3. Le coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption est un paramètre qui influence directement sur la densité de courant délivrée par la cellule et donc son rendement. Pour décrire l'absorption dans InGaN, nous utilisons un modèle empirique défini par la relation suivante[56]:

$$\alpha(\lambda) = 2.2 * 10^5 \sqrt{\frac{1.24}{\lambda} - E_g(x)} \quad (III.4)$$

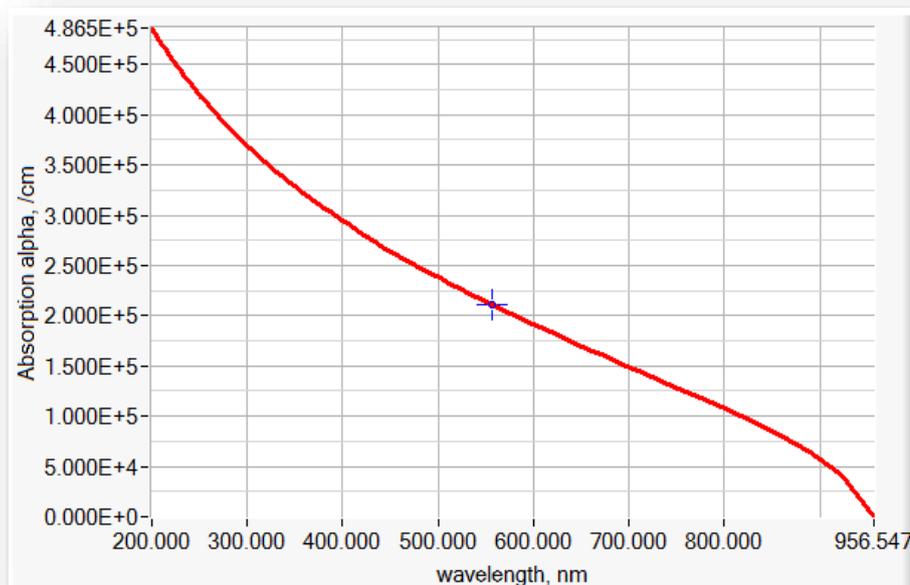


Figure III.2 : Le coefficient d'absorption du InGaN en fonction de la longueur d'onde.

III.5. Résultats et interprétations

Dans cette partie, on va simuler notre cellule a base de $\text{In}_{0,65}\text{Ga}_{0,35}\text{N}$, on utilisant le simulateur SCAPS puis on va étudier l'effet de la géométrie de la structure tel que le dopage et l'épaisseur ainsi l'effet d'autre paramètres tel que l'effet de la durée de vie des porteurs minoritaires (τ), l'effet de la vitesse de recombinaison en surface ($S_{n,p}$), l'effet de la température et l'effet de la densité du piège profond.

La **Figure III.3**, présente le diagramme de bande d'énergie qui correspond à la condition de court circuit ($V = 0 \text{ V}$) de la structure. F_n et F_p sont les quasi-niveaux de Fermi dû à la polarisation de la cellule par la lumière.

Les densités des porteurs libres correspondantes au diagramme de bande d'énergie sont présentées dans la **Figure III.4**.

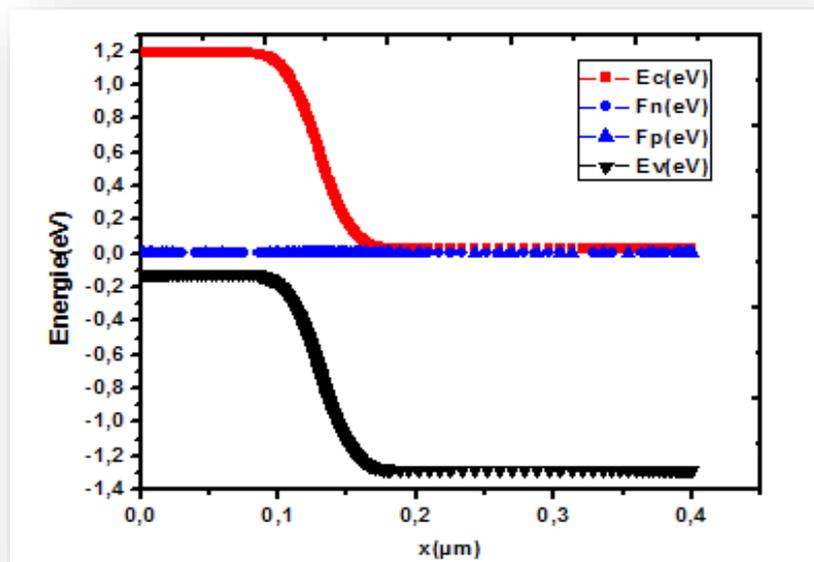


Figure III.3 : Bandes d'énergie à l'équilibre.

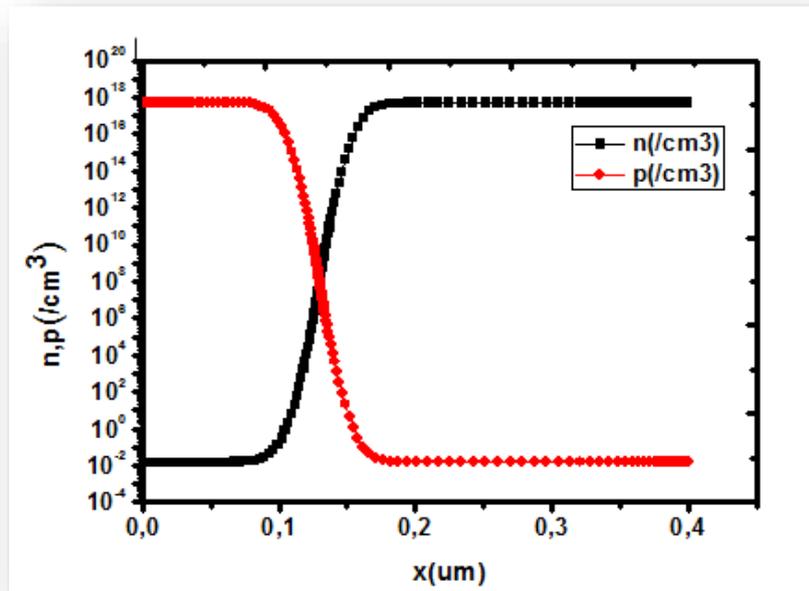


Figure III.4 : Densités des porteurs libres à l'équilibre

La caractéristique électrique $J(V)$, la puissance électrique $P(V)$ et le rendement quantique externe(EQE) de la cellule sont présentés dans les **Figures III.5** et **III.6**, respectivement.

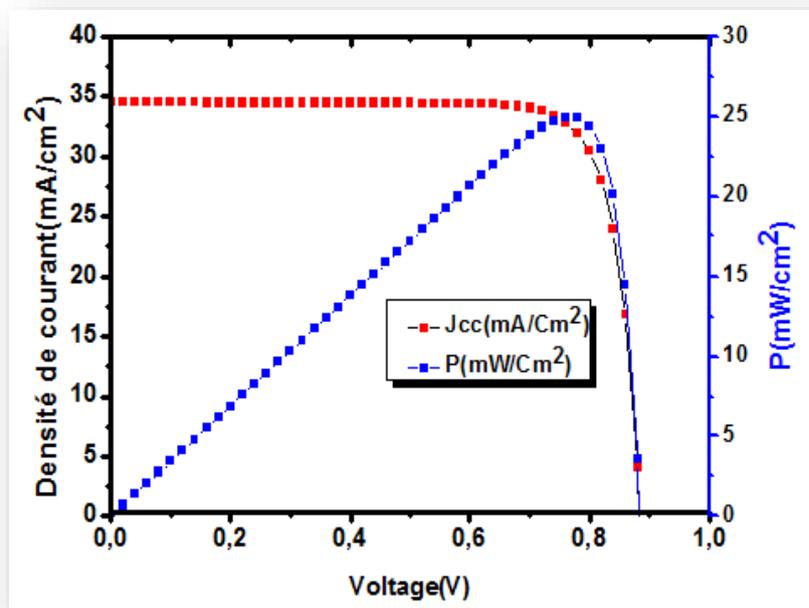


Figure III.5 : Caractéristique $J(V)$ et $P(V)$ de la cellule pn en InGaN.

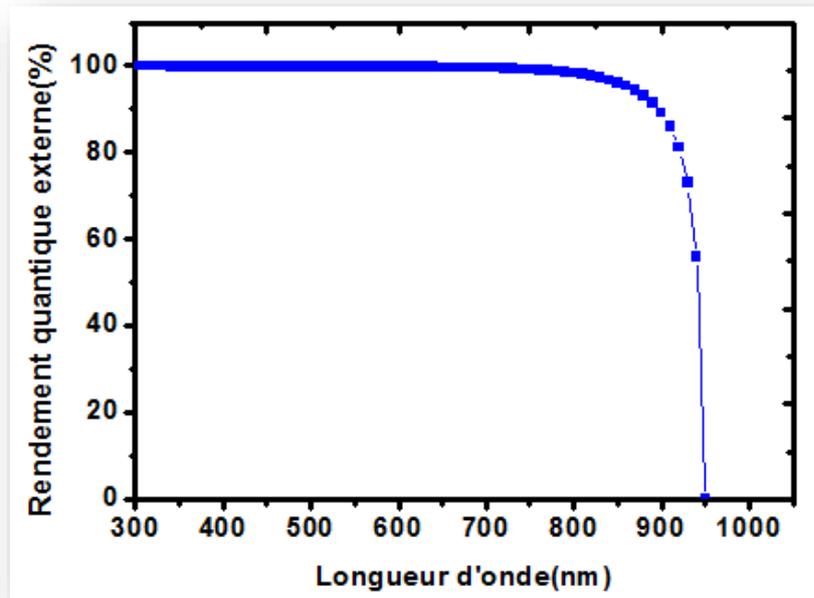


Figure III.6 : Rendement quantique sous AM1.5G de la cellule p-n en $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$.

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le **Tableau III.4**.

Tableau III.4 : Paramètres de sortie de la cellule.

	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
Résultats de référence [54]	0.834	29.613	82.2	20.284
Notre travail	0.8842	34.4645	81.98	24.98

III.5. 1. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les paramètres électrique de la cellule

Dans cette partie, l'épaisseur de l'émetteur W_p est variée entre 80 et 150 nm, alors que le dopage de l'émetteur N_a , l'épaisseur W_n et le dopage N_d de la base sont fixés.

La courbe $J(V)$ et le rendement quantique externe (EQE) obtenus sont présentés, respectivement, dans les **Figures III.7** et **III.8**. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.5**, et présentés sous forme de courbes dans les **Figures III.9, (a), (b), (c) et (d)**.

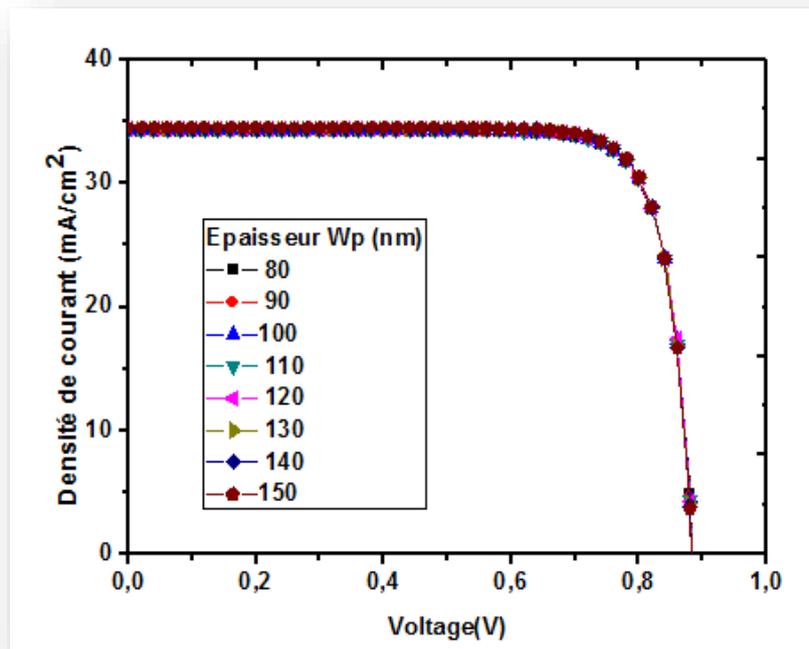


Figure III.7 : Caractéristique J-V avec l'effet de l'épaisseur de l'émetteur.

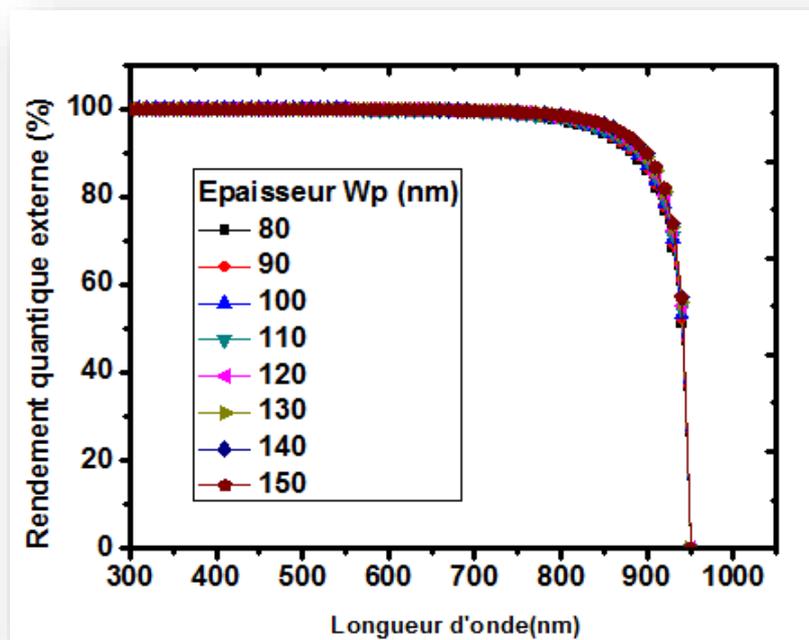
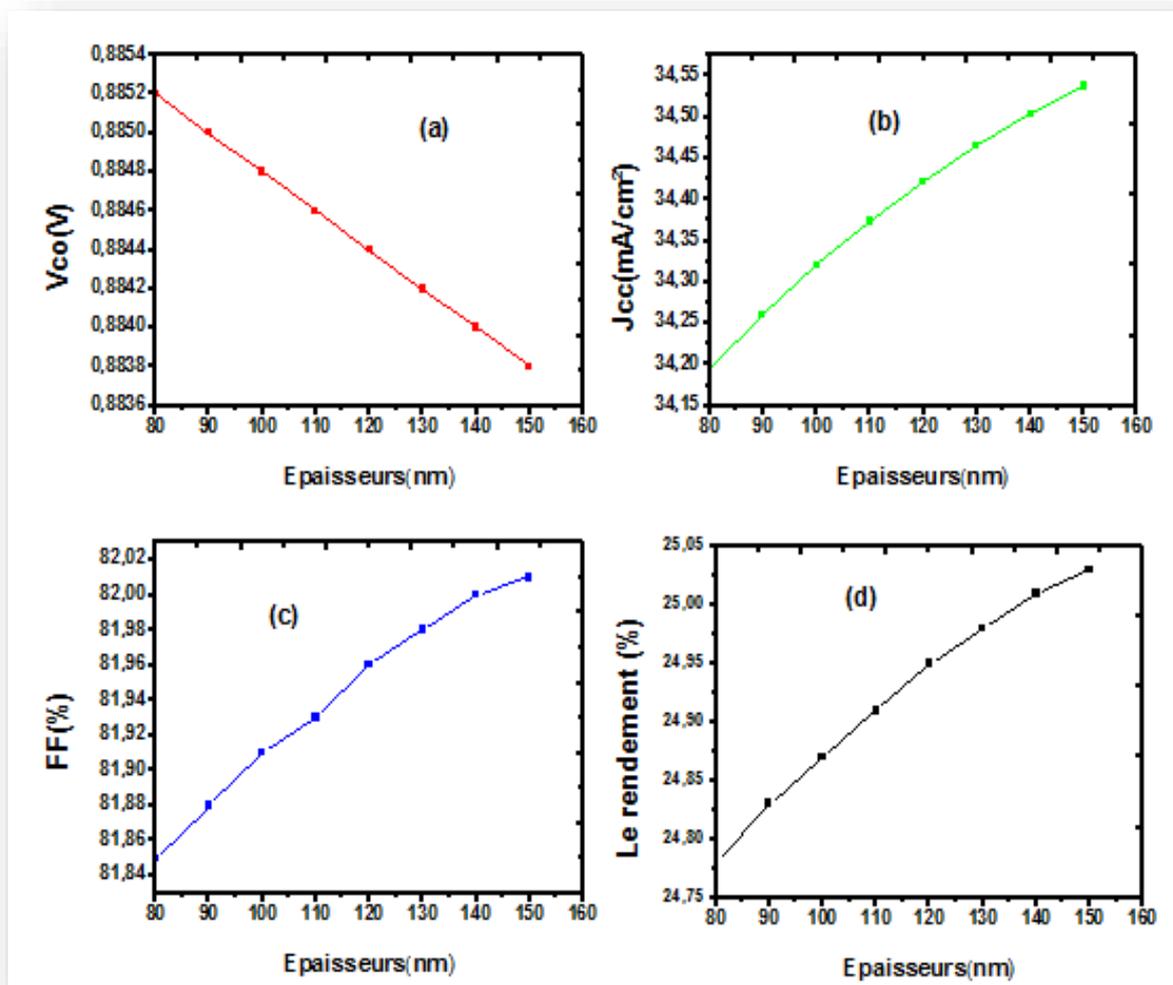


Figure III.8 : Rendement quantique externe avec l'effet de l'épaisseur de l'émetteur.

Tableau III.5 : L'effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule.

$W_p(\text{nm})$	$V_{co} (V)$	$J_{cc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
80	0,8852	34,19467	81,85	24,78
90	0,885	34,26076	81,88	24,83
100	0,8848	34,32024	81,91	24,87
110	0,885	34,29205	81,92	24,86
120	0,8844	34,42163	81,96	24,95
130	0,8842	34,464567	81,96	24,98
140	0,884	34,50303	82,004	25,01
150	0,8838	34,53718	82,01	25,03

Figure III.9 : l'effet de l'épaisseurs de l'émetteur avec $W_n = 270\text{nm}$ sur J_{cc} ; V_{co} ; FF ; η .

D'après les résultats, on remarque dans la (Figure III.9) que, le V_{co} diminue légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur peut être a cause de l'augmentation de courant de saturation.

La **Figure III.9 (b)** montre l'augmentation de la densité de courant avec l'épaisseur de la couche P, en raison de la distance éloignée de la surface où la recombinaison des porteurs est faible et par conséquent l'effet de la recombinaison en surface est réduit, et par conséquent une augmentation de la densité de courant (J_{cc}) est observée. Donc, l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur cause une augmentation du rendement.

Le rendement quantique externe (**Figure III.8**) présente des variations au niveau des longueurs d'onde longues. Plus que l'épaisseur de l'émetteur augmente, les longueurs d'ondes longues sont absorbées au niveau de l'émetteur et elles sont affectées par celui-ci.

III.5. 2. Effet de l'épaisseur de la base sur les paramètres électrique de la cellule

Dans cette partie, l'épaisseur de base W_n est variée entre 240 et 300 nm, alors que le dopage de base N_a , l'épaisseur W_p et le dopage N_a de l'émetteur sont fixés.

La courbe $J(V)$ et le rendement quantique externe (EQE) obtenus sont présentés, respectivement, dans les **Figures III.10** et **III.11**. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.6**, et présentés sous forme de courbes dans les **Figures III.12, (a), (b), (c) et (d)**.

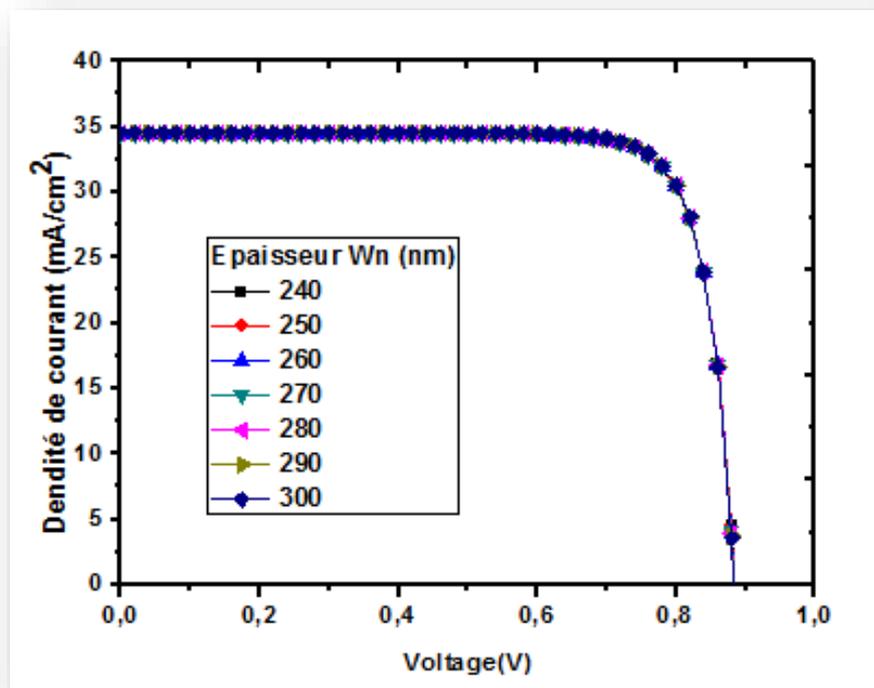


Figure III.10 : Caractéristique $J(V)$ avec l'effet de l'épaisseur de base.

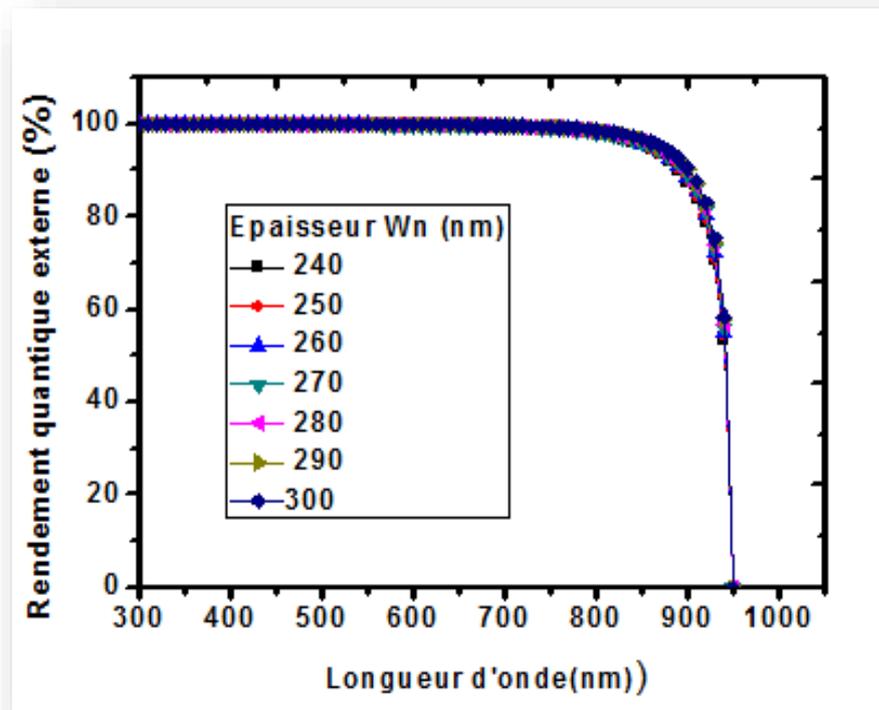


Figure III.11 : Rendement quantique externe avec l'effet de l'épaisseur de base.

Tableau III.6 : L'effet de l'épaisseur de la base sur les caractéristiques de la cellule.

$W_n(\text{nm})$	$V_{co}(V)$	$J_{cc}(mA/cm^2)$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
240	0,8848	34,34114	81,93	24,89
250	0,8846	34,386	81,95	24,93
260	0,8844	34,42702	81,96	24,95
270	0,8842	34,46457	81,98	24,98
280	0,884	34,49901	81,99	25
290	0,8838	34,53049	82	25,03
300	0,8836	34,55934	82,02	25,05

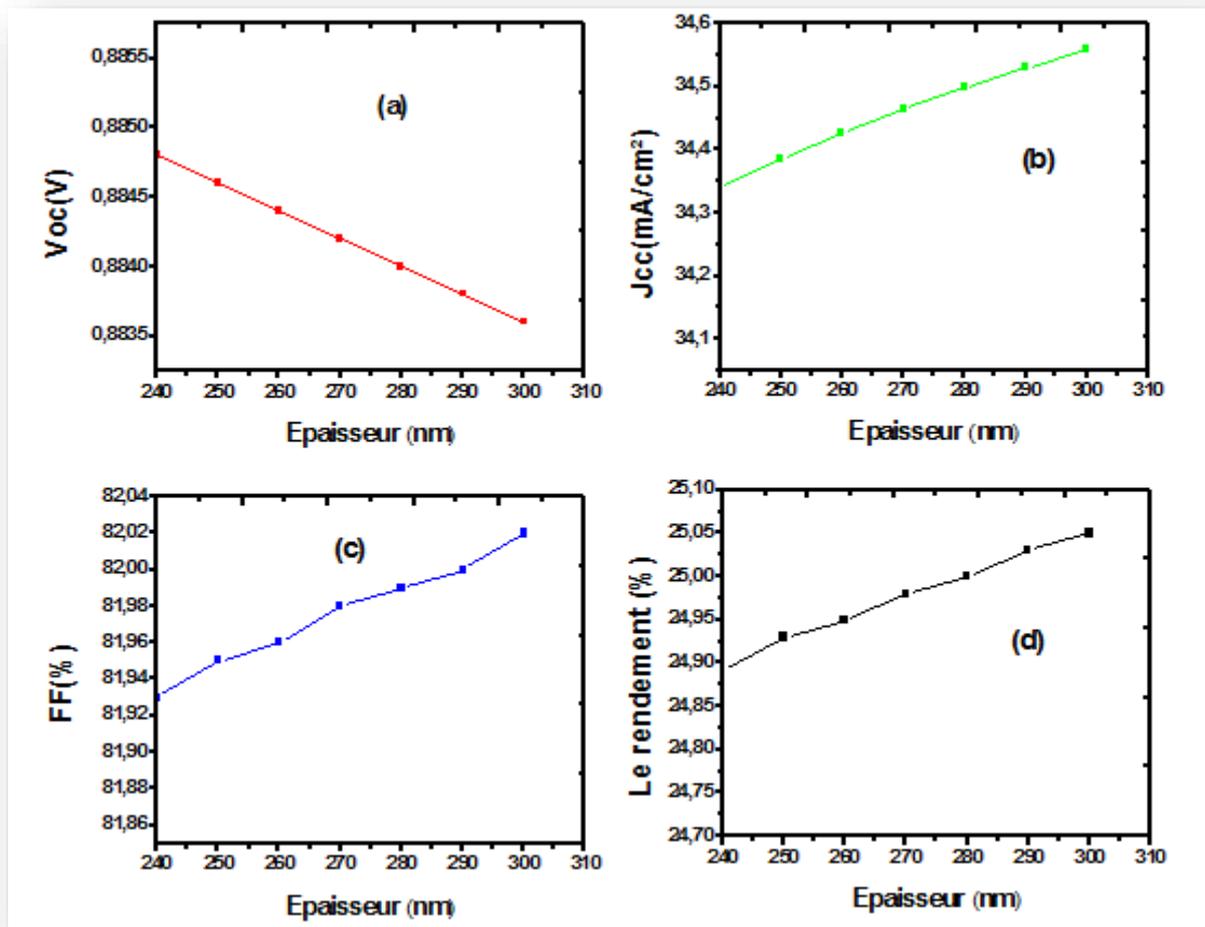


Figure III.12 : L'effet de l'épaisseurs de base avec $W_p=130\text{nm}$ sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η .

Selon les résultats de la Figure III.12, on remarque que la densité de courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la base en raison de la longue distance entre la surface et la zone de charge d'espace. Plus l'épaisseur de base augmente, plus la densité de courant et rendement augmentent aussi.

On remarque aussi une variation dans le rendement quantique externe avec l'augmentation de l'épaisseur de la base pour les longueurs d'ondes longues, parce qu'elles sont absorbées par la région arrière (base).

Les paramètres électriques de la cellule solaire $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ sont moins affectés par l'épaisseur de la couche arrière que la couche avant épaisseur.

III.5. 3. Effet de dopage de bas sur les paramètres électrique de la cellule

Dans cette partie, le dopage de la base N_d est varié entre 10^{17} et $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, alors que l'épaisseur de la base W_n , l'épaisseur W_p et le dopage N_a de l'émetteur sont fixés.

La courbe J(V) et le rendement quantique externe(EQE), obtenus sont présentés, respectivement, dans les **Figures III.13** et **III.14**. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.7**, et présentés sous forme de courbes dans les **Figures III.15**, (a), (b), (c) et (d).

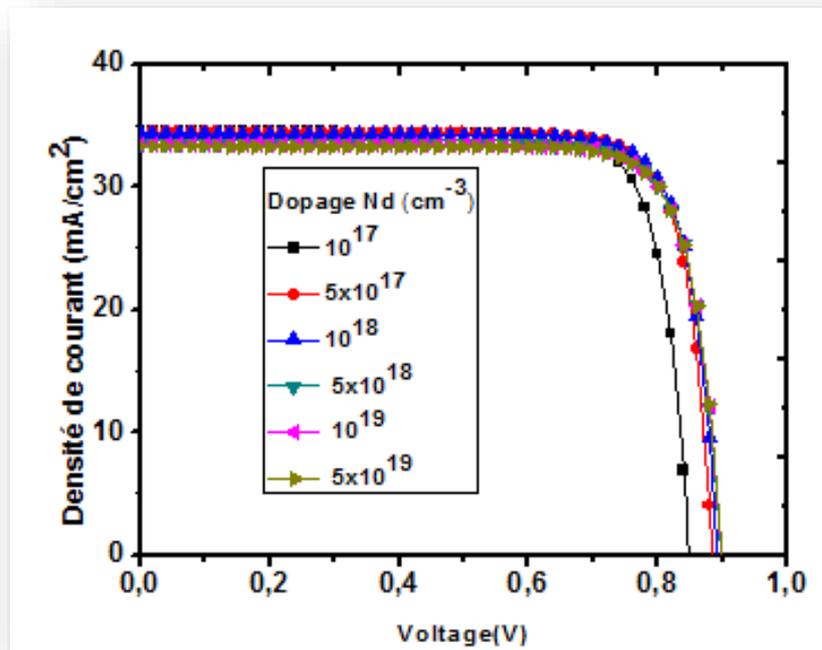


Figure III.13 : Caractéristique J(V) avec l'effet du dopage de base.

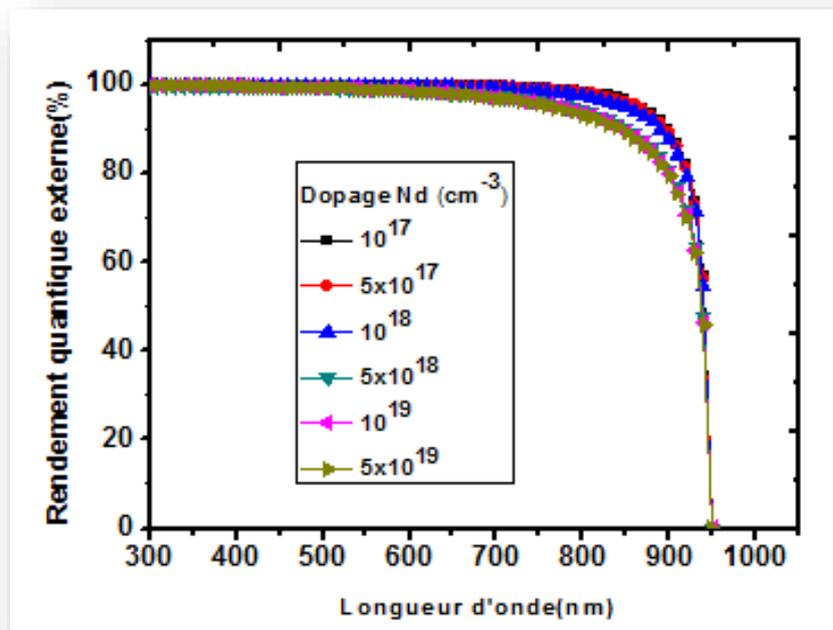
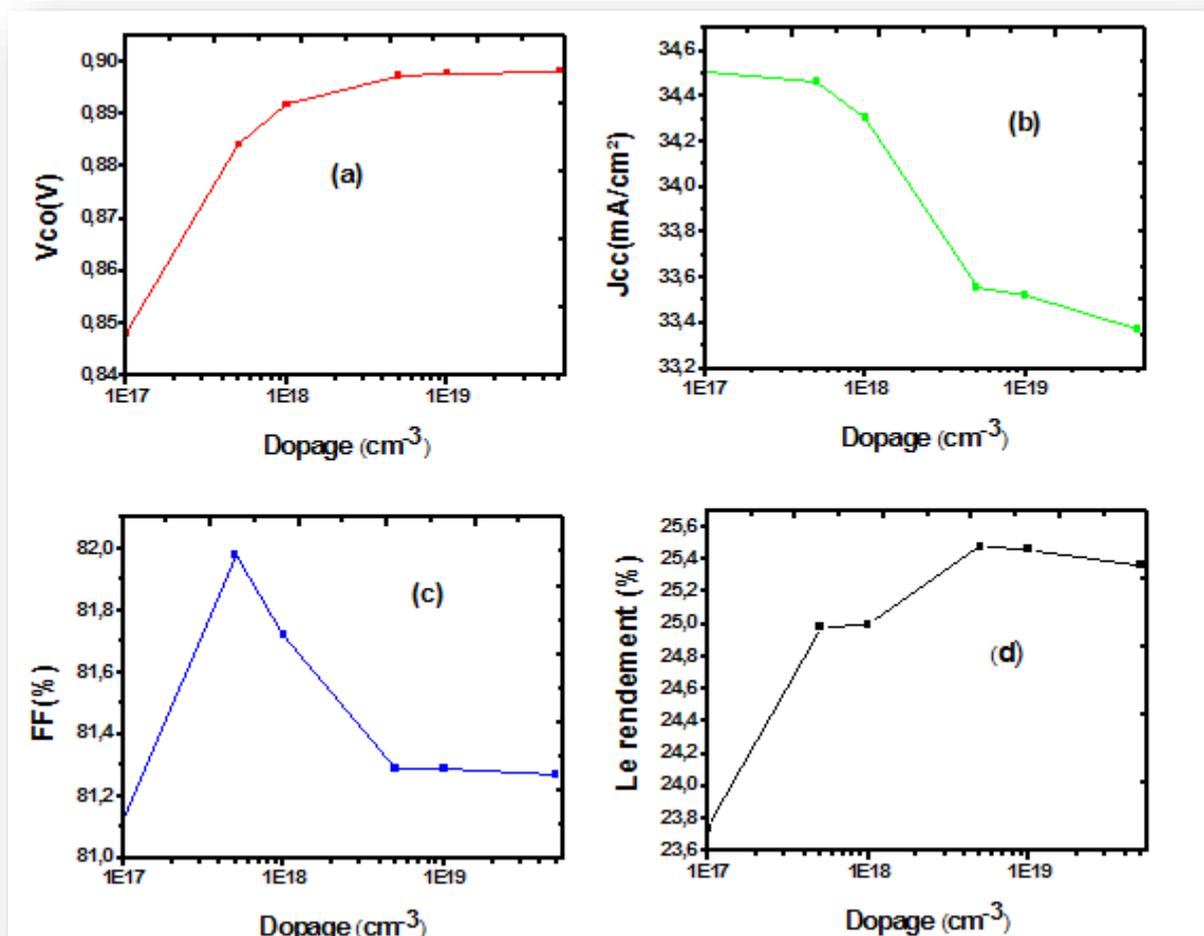


Figure III.14 : Rendement quantique externe avec l'effet du dopage de base.

Tableau III.7 : L'effet de dopage de bas sur les caractéristiques de la cellule

N_d (cm^{-3})	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
10^{17}	0,8479	34,511413	81,13	23,74
5×10^{17}	0,8842	34,464547	81,98	24,98
10^{18}	0,8918	34,305613	81,72	25
5×10^{18}	0,8972	33,559018	81,29	24,48
10^{19}	0,8977	33,437870	81,28	24,40
5×10^{19}	0,8982	33,374339	81,27	24,36

Figure III.15 : l'effet du dopage de la base sur J_{cc} ; V_{co} ; FF ; η

D'après la **Figure III.15(b)**, la densité du courant de court-circuit (J_{cc}) augmente avec la diminution de la concentration du dopage N_d .

La diminution de N_d entraîne une augmentation de la mobilité des porteurs [Eq. (III.1)], qui entraîne l'augmentation du coefficient de diffusion des porteurs D [Eq.(I.37)] et ainsi

l'augmentation de la longueur de diffusion [Eq.(I.36)], conduisant à une meilleure collecte des porteurs de charges libres générés par la lumière dans les électrodes.

Cependant, V_{co} décroît avec la croissance de la concentration du dopage N_a comme le montre la **Figure III.15(a)**, parce que d'après l'équation (I.26), le courant de saturation diminue avec l'augmentation du dopage, et cette diminution entraîne une augmentation de V_{co} d'après l'équation(I.25), et par conséquent, l'augmentation du rendement.

III.5.4. Effet de dopage de l'émetteur sur les paramètres électrique de la cellule

Le dopage de l'émetteur N_a est varié entre 10^{17} et $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, alors que l'épaisseur de l'émetteur W_n , l'épaisseur et le dopage N_d de la base sont fixés.

La courbe $J(V)$ et le rendement quantique externe obtenus sont présentés, respectivement, dans les **Figures III.16** et **III.17**. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.8**, et présentés sous forme de courbes dans les **Figures III.18, (a), (b), (c) et (d)**.

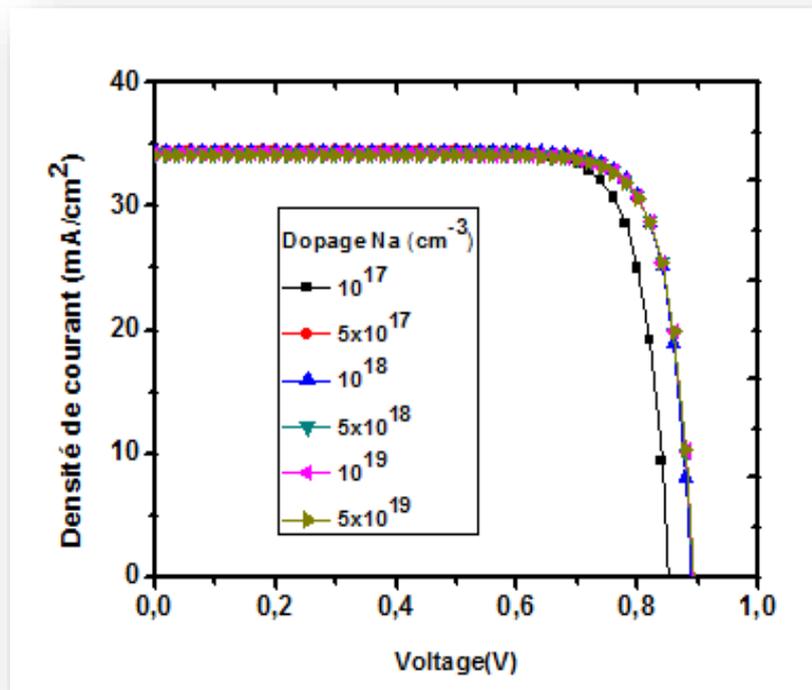


Figure III.16 : Caractéristique $J(V)$ avec l'effet du dopage de l'émetteur.

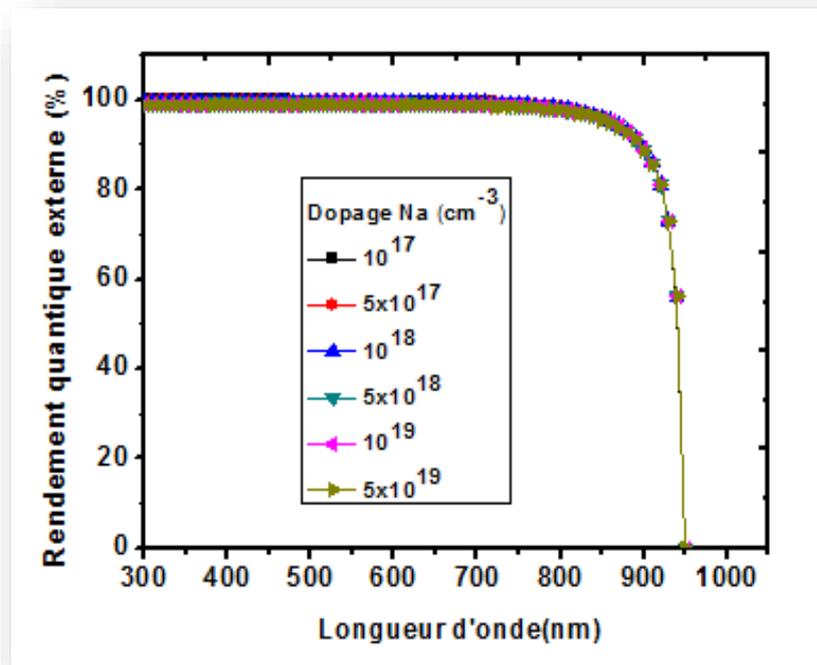


Figure III.17 : Rendement quantique externe avec l'effet du dopage de l'émetteur.

Tableau III.8 : L'effet de dopage de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule.

N_a (cm^{-3})	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
10^{17}	0,8520	34,470040	80,82	23,73
5×10^{17}	0,8842	34,464567	81,98	24,98
10^{18}	0,8893	34,434828	81,94	25,09
5×10^{18}	0,8925	34,293679	81,75	25,02
10^{19}	0,8929	34,230550	81,72	24,98
5×10^{19}	0,8931	34,148579	81,71	24,92

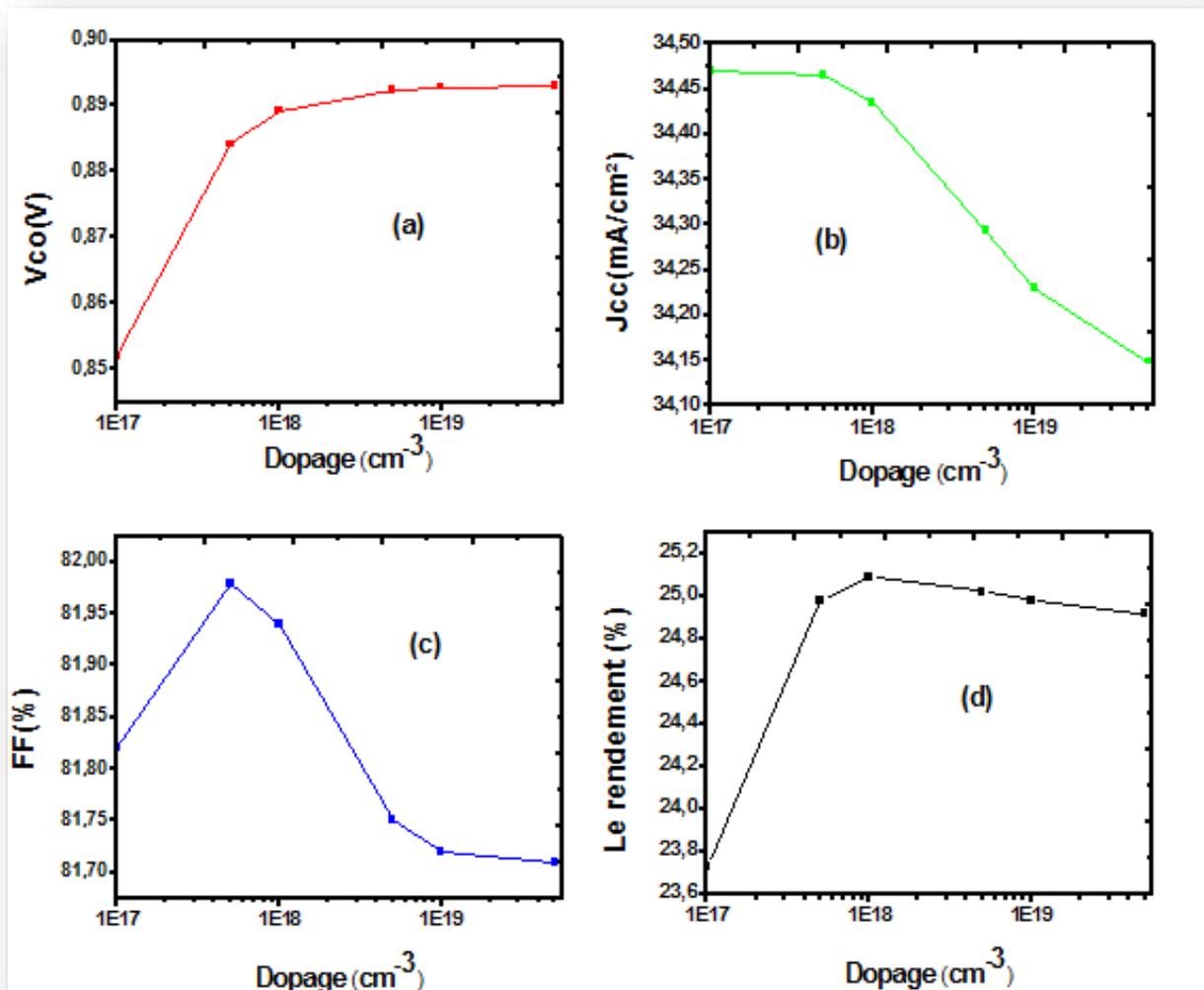


Figure III.18 :l'effet du dopage de l'émetteur sur J_{cc} ; V_{co} ;FF ; η .

D'après la **Figure III.18**, l'augmentation du dopage de la base entraîne une légère diminution dans la densité du courant de court-circuit (J_{cc}) et une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et par conséquent une augmentation dans le rendement (même explication que l'effet du dopage sur l'émetteur) .

Dans le rendement quantique externe, l'effet de dopage de l'émetteur est remarqué clairement sur les longueurs d'ondes courtes, par ce que elles sont absorbées par la région avant (l'émetteur).

III.5.5. Effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant sur les paramètres électrique de la cellule

La vitesse de recombinaison en surface de contact avant est varié entre 10 et 10^5 (cm/s), alors que la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière est fixé. La caractéristique électrique $J(V)$ et le rendement quantique externe (EQE) obtenus sont présentés,

respectivement, dans les **Figures III.19** et **III.20**. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.9**, et présentés sous forme de courbes dans les **Figures III.21, (a), (b), (c) et (d)**.

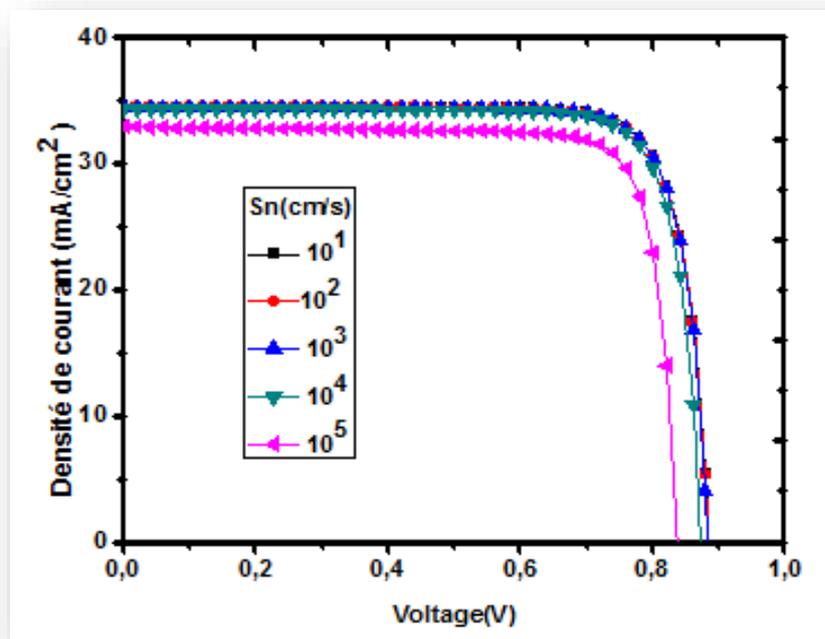


Figure III.19 : Caractéristique J(V) avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact avant.

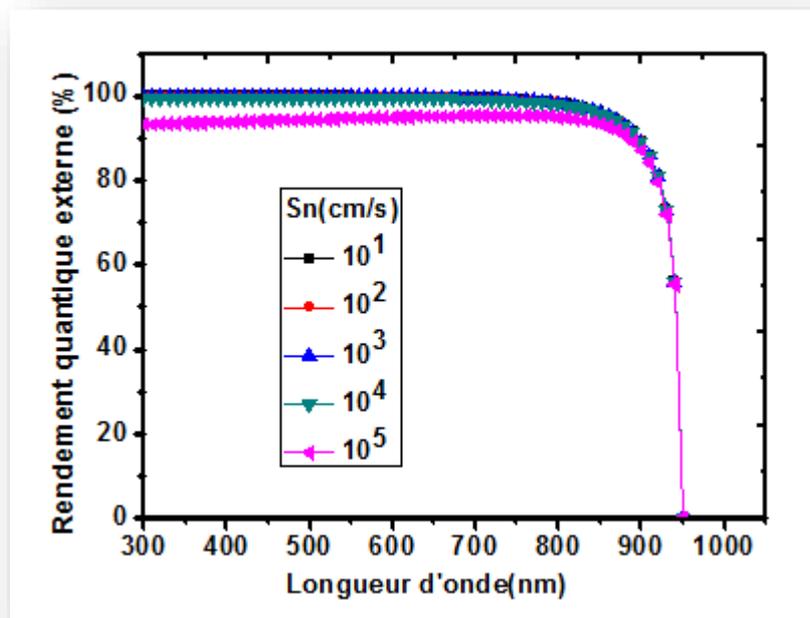


Figure III.20 : Rendement quantique externe avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact avant.

Tableau III.9 : L'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant sur les caractéristiques de la cellule

S_n (cm/s)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
10^1	0,8859	34,481611	81,88	25,01
10^2	0,8857	34,480060	81,89	25,01
10^3	0,8842	34,464567	81,98	24,98
10^4	0,8724	34,311252	82,57	24,72
10^5	0,8363	32,9239	82,99	22,85

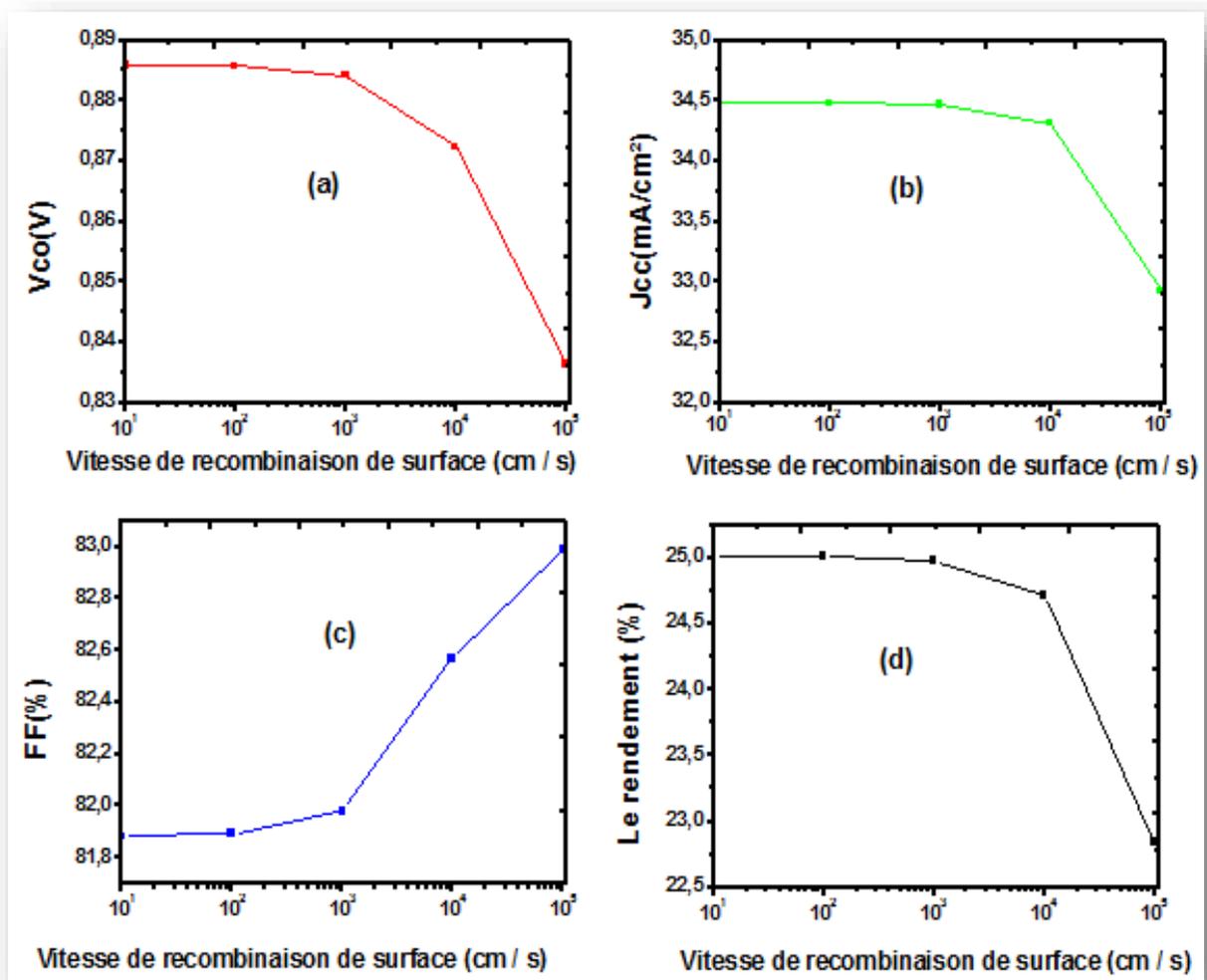


Figure III.21 : l'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η .

D'après la **Figure (III.21)**, on remarque que la densité du courant de court-circuit (J_{cc}) diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant, due à la densité

de défauts de surface élevée, ceci entraîne une diminution de la collection de charge dans le contact, et la diminution dans la tension de circuit ouvert (V_{co}) qui est causée par l'augmentation du courant de saturation inverse, celui-ci augmente avec l'augmentation de la densité de défauts, et cela entraîne une diminution de l'efficacité de la conversion de 25.01% à 22.85%.

la **Figure III.20** montre que, les courtes longueurs d'onde sont affectées par la vitesse de recombinaison du contact avant, parce que elles sont absorbées majoritairement au niveau de la face avant.

III.5.6. Effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière sur les paramètres électriques de la cellule

La vitesse de recombinaison en surface de contact arrière est varié entre 10^1 et 10^5 (cm/s), alors que celle du contact avant est fixée est égal à 10^3 (cm/s).

La caractéristique électrique $J(V)$ et le rendement quantique (EQE) obtenus sont présentés, respectivement, dans les **Figures III.22** et **III.23**. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.10**, et présentés sous forme de courbes dans les **Figures III.24, (a), (b), (c) et (d)**.

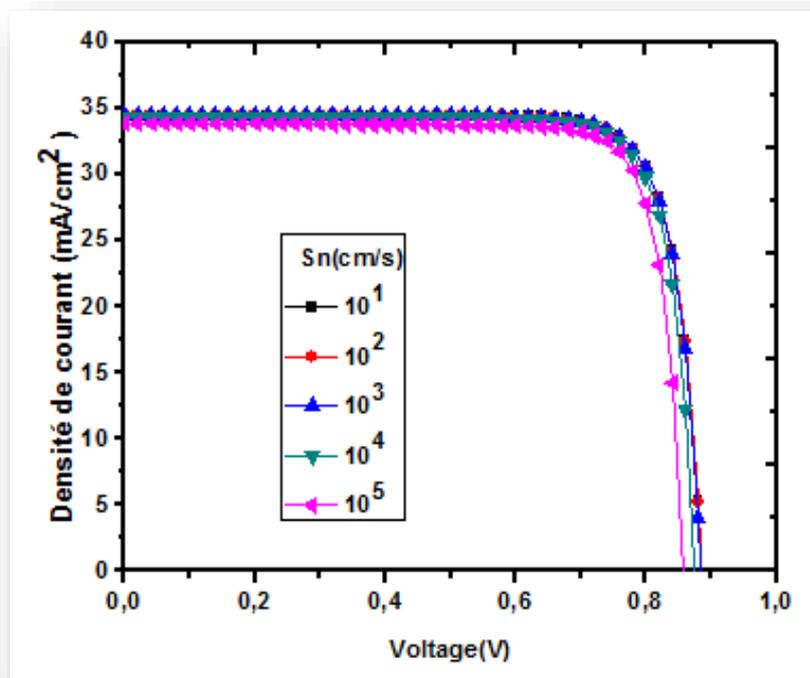


Figure III.22 : Caractéristique $J(V)$ avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact arrière.

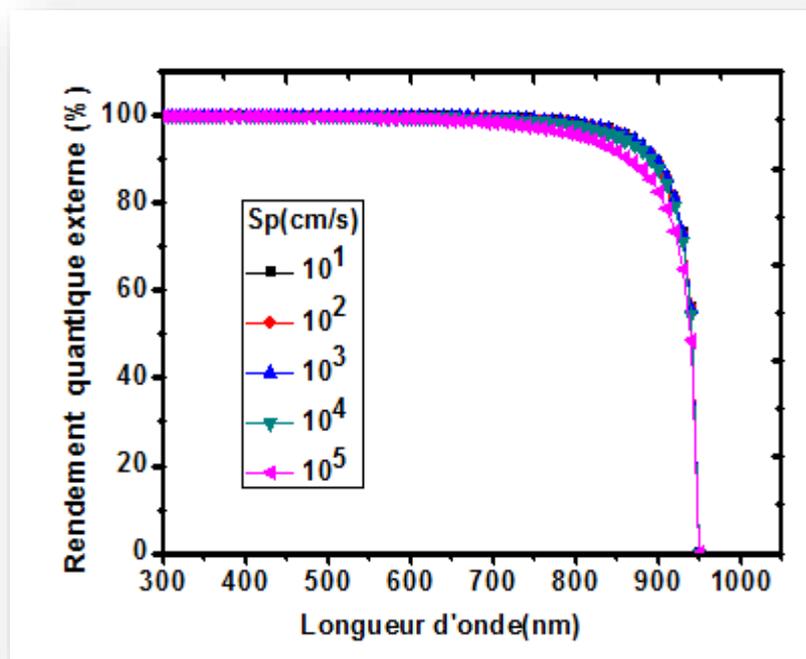


Figure III.23 : Rendement quantique externe avec l'effet de la vitesse de recombinaison en surface du contact arrière

Tableau III.10 : L'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière sur les caractéristiques de la cellule

S_p (cm/s)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
10^1	0,8858	34,482304	81,89	25,01
10^2	0,8856	34,480065	81,80	25,01
10^3	0,8842	34,464567	81,98	24,98
10^4	0,8747	34,328316	82,48	24,48
10^5	0,8570	32,839192	83,12	22,10

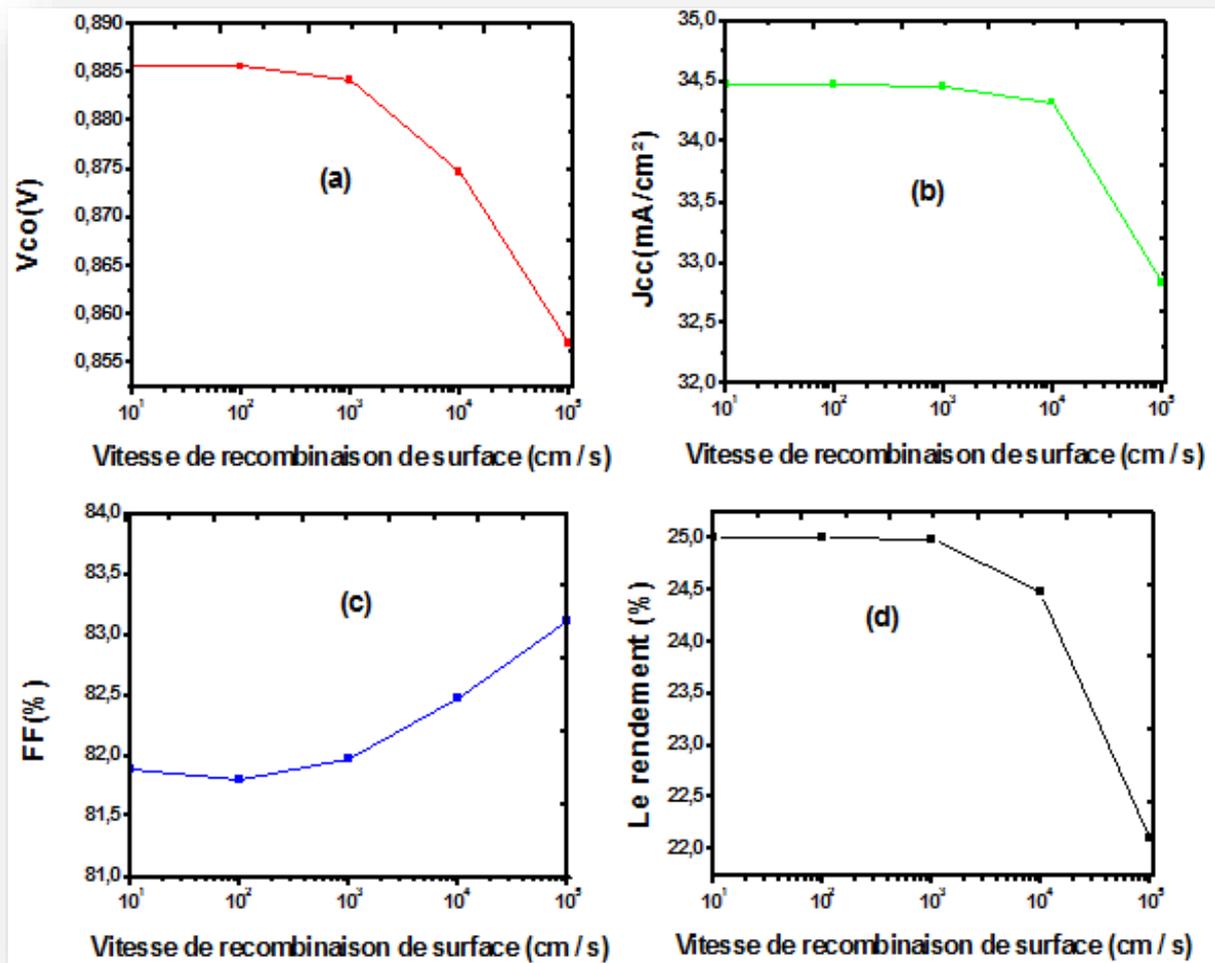


Figure III.24 : l'effet de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η .

D'après la **Figure (III.24)**, on remarque que la densité du courant de court-circuit (J_{cc}) diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière, ceci est dû à une diminution de la collection de charge dans le contact, et aussi la tension de circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison en surface, à cause de l'augmentation du courant de saturation inverse qui augmente avec l'augmentation de la densité de défauts dans la surface, et cela entraîne une diminution de l'efficacité de la conversion.

La **Figure (III.23)**, montre une diminution dans le rendement quantique externe (EQE) avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison au niveau de longueurs d'onde longues, parce que elles sont absorbées par la couche arrière, et donc elles sont affectés par le contact arrière.

III.5.7. Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires dans l'émetteur sur les paramètres électriques de la cellule

La durée de vie des porteurs minoritaires de l'émetteur est un paramètre important dans la collection de charge dans les cellules solaires. Dans cette partie on va varier (τ_p) entre 6.5×10^{-2} et 6.5×10^3 ns. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.11**, et présentés sous forme de courbes dans les Figures III. 25, (a), (b), (c) et (d).

Tableau III.11 : L'effet de durée de vie sur les caractéristiques de la cellule

τ_n (ns)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
6.5×10^{-2}	0.7191	33.00692	75.21	17.85
6.5×10^{-1}	0.8219	34.324965	79.09	22.31
6.5	0.8842	34.464567	81.98	24.98
6.5×10^1	0.8995	34.478610	83.16	25.79
6.5×10^2	0.9018	34.480015	83.29	25.90
6.5×10^3	0.9021	34.480155	83.30	25.91

*

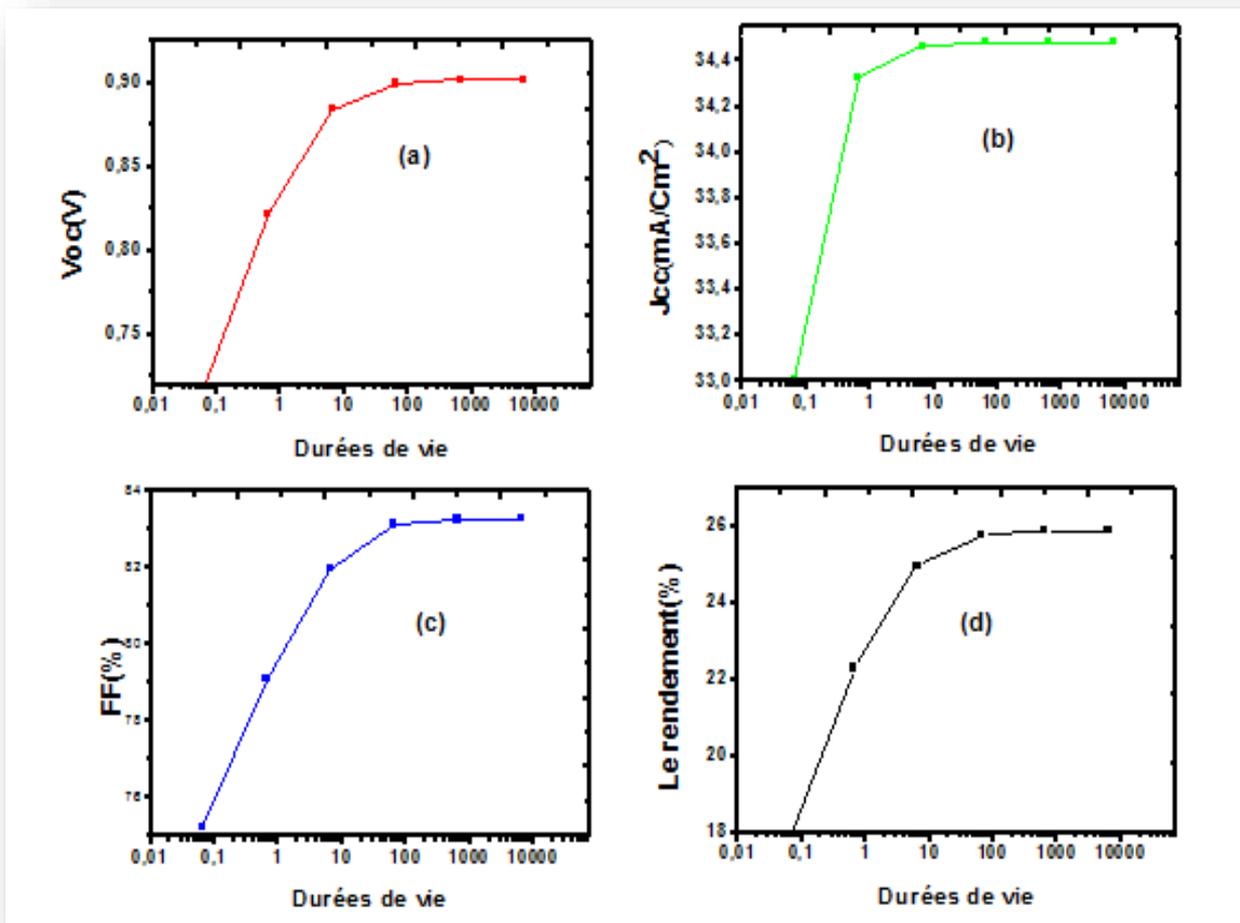


Figure III.25 : l'effet de la durée de vie des porteurs minoritaires dans l'émetteur sur J_{cc} ; V_{oc} ; FF ; η .

D'après la **Figure (III.25)**, on remarque que tous les paramètres de sortie présentent une augmentation considérable avec l'augmentation de la durée de vie des porteurs minoritaires. l'augmentation de la durée de vie des porteurs minoritaires cause une diminution du taux de recombinaison (**Figure III.26**), et par conséquent l'augmentation du collection de charge et donc l'augmentation du courant de court-circuit et le rendement.

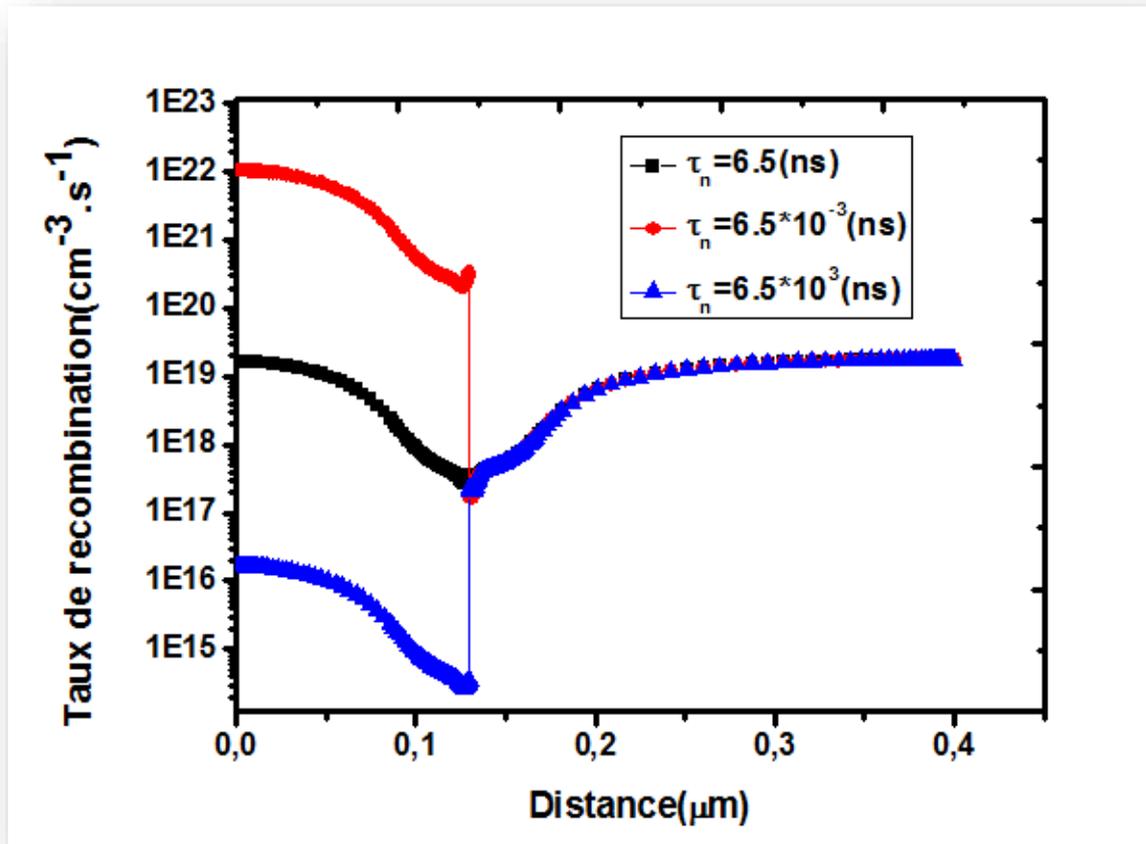


Figure III.26 : Profile de recombinaison

III.5.8. Effet de température sur les paramètres électrique de la cellule

La figure III.27 présente la variation de l'énergie du gap du matériau InGaN avec la température, qui est varié entre 280 et 400 (k), on utilisant l'équation I.34 et I.35 avec ses paramètres présentés en tableau I.2.

La caractéristique électrique $J(V)$ et le rendement quantique externe (EQE) obtenus sont présentés, respectivement dans les Figures III.28 et III.29. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le Tableau III.13, et présentés sous forme de courbes dans les Figures III.30, (a), (b), (c) et (d).

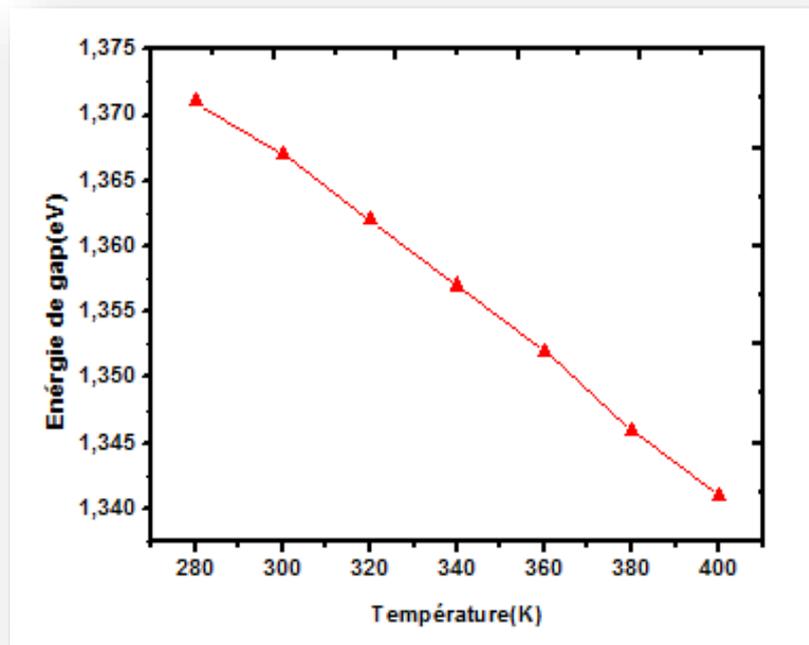


Figure III.27 : L'énergie du gap du matériau InGaN avec la température.

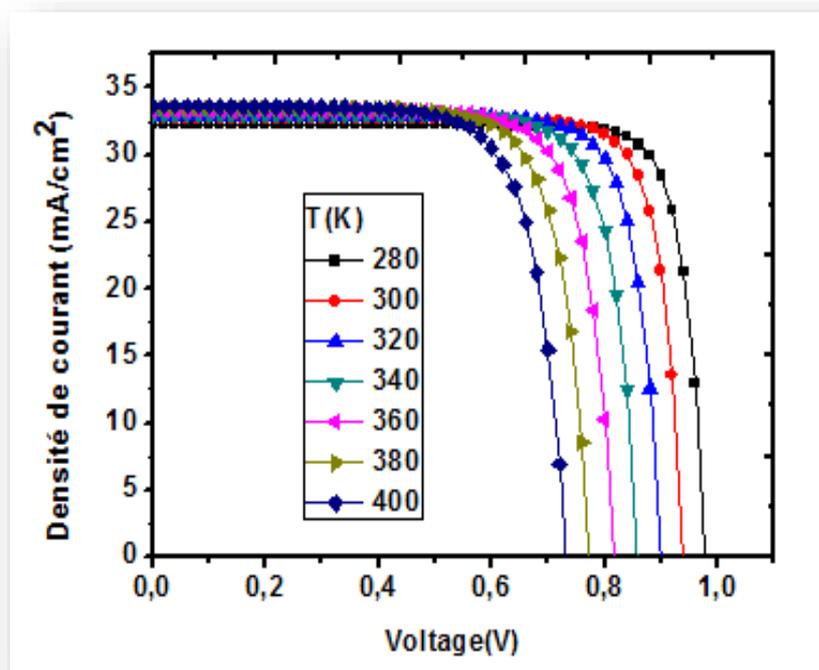


Figure III.28 : Caractéristique J(V) avec l'effet de la température.

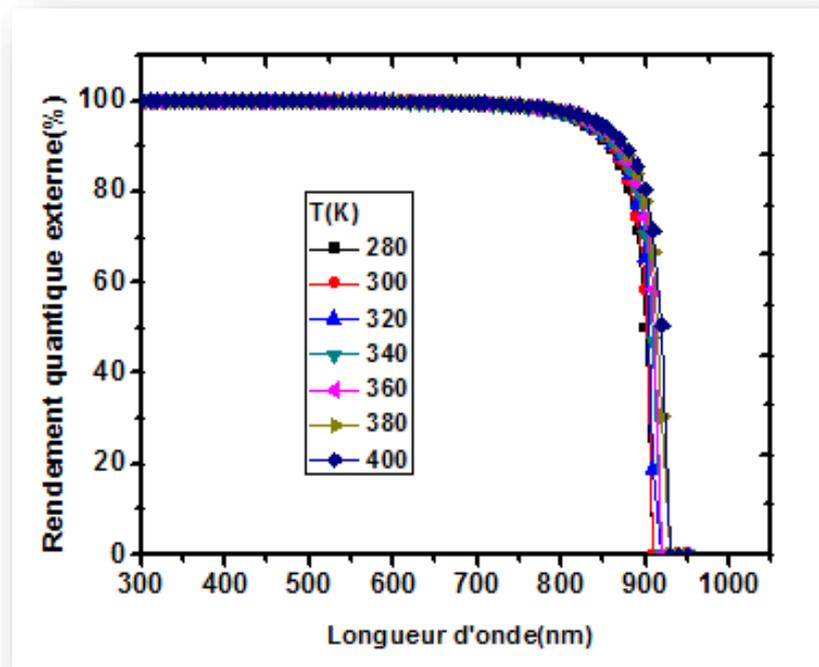


Figure III.29 : Rendement quantique externe avec l'effet de la température.

Tableau III.12 : L'effet la de température sur les caractéristiques de la cellule

T(k)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF%	η %
280	0.9769	32.213071	84.08	26.46
300	0.9395	32.652215	82.64	25.35
320	0.8989	32.863154	81.20	23.99
340	0.8588	33.006346	79.63	22.57
360	0.8165	33.294009	78.10	21.23
380	0.7736	33.480859	76.39	19.79
400	0.7313	33.589059	74.59	18.32

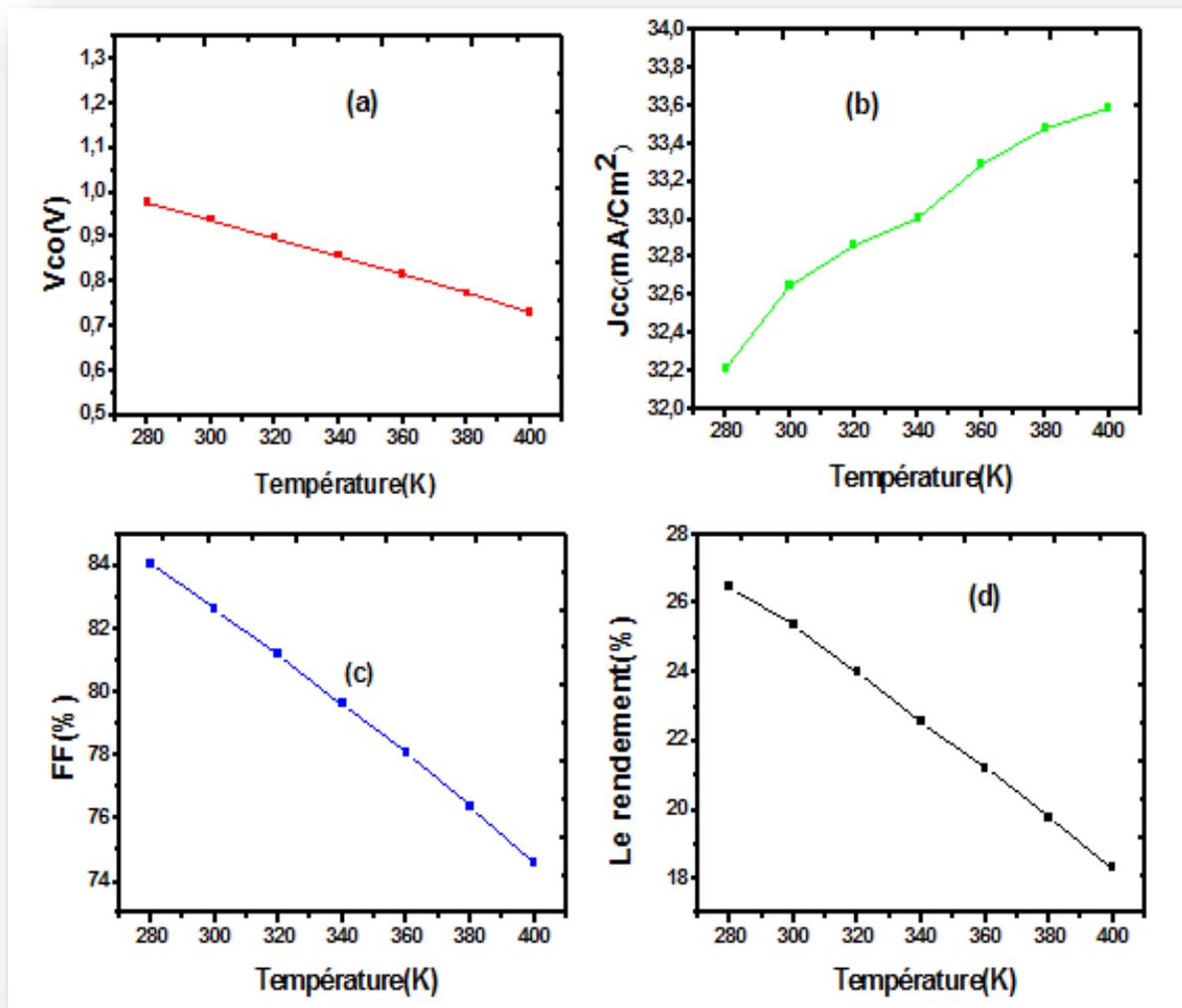


Figure III.30 : l'effet de température sur Jcc ;Voc ;FF ; η .

La Figure III.27, montre que l'énergie du gap diminue avec l'augmentation de la température d'après l'équation (L.35)

La Figure III.30, montre une légère augmentation de (Jcc) avec la température, et on remarque que le V_{co} diminue avec l'augmentation de la température, ceci est expliqué par l'augmentation de la densité intrinsèque n_i qui très sensible à la température [Eq.(L.27)] , et l'augmentation de la densité intrinsèque cause l'augmentation du courant de saturation (I_s) [Eq.(L.26)], et par conséquent (V_{co}) diminue fortement [Eq(L.25)], cette diminution cause la dégradation du rendement de conversion, comme illustré dans la Figure III.30 (d).

III.5.9. Effet de la densité du piège profond des électrons sur les paramètres électrique de la cellule

Dans cette partie on va étudié l'effet de pièges profond de type donneur sur les paramètres de sortie de la cellule. La densité du piège profond donneur est variable entre $N_t=10^{12}-5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ avec le niveau $E_t=0.46 \text{ eV}$ par rapport a E_v et avec les sections efficaces de capture ($\sigma_n=10^{-12} \text{ cm}^{-2}$, $\sigma_p=10^{-14} \text{ cm}^{-2}$).

La caractéristique électrique $J(V)$ et le rendement quantique externe (EQE) obtenus sont présentés, respectivement dans les **Figures III.31** et **III.32**. Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le **Tableau III.13**, et présentés sous forme de courbes dans les **Figures III.33, (a), (b), (c) et (d)**.

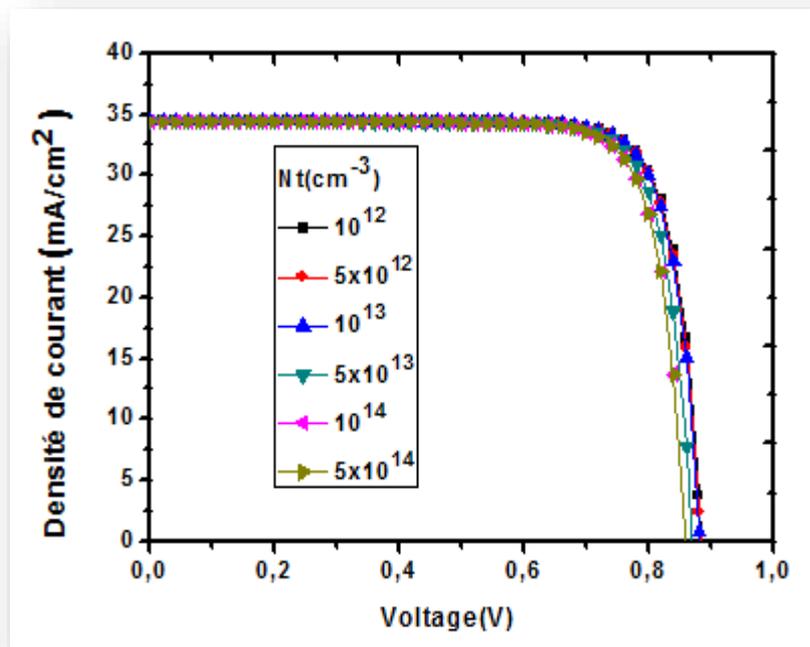


Figure III.31 : Caractéristique $J(V)$ avec l'effet de la densité du piège profond des électrons.

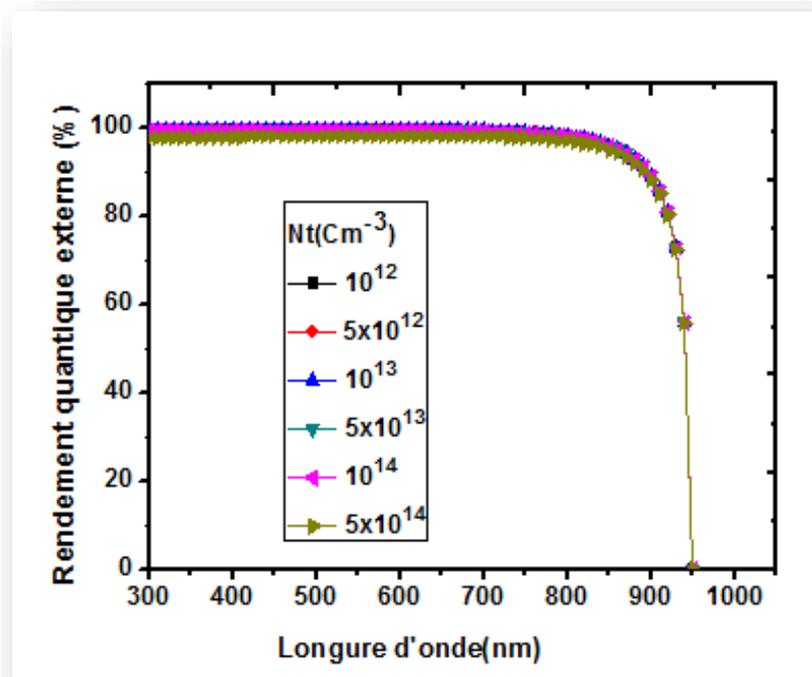


Figure III.32 : Rendement quantique avec l'effet de la densité du piège profond des électrons.

Tableau III.13: L'effet de la densité du piège profond des électrons sur les paramètres de sortie de la cellule solaire en InGaN.

$N_t(\text{cm}^{-3})$	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
10^{12}	0,8838	34,463525	81,97	24,97
5×10^{12}	0,8824	34,459359	81,94	24,92
10^{13}	0,8807	34,454153	81,91	24,86
5×10^{13}	0,8688	34,412577	81,72	24,43
10^{14}	0,8586	34,360790	81,40	24,02
5×10^{14}	0,8181	33,953677	79,71	22,14

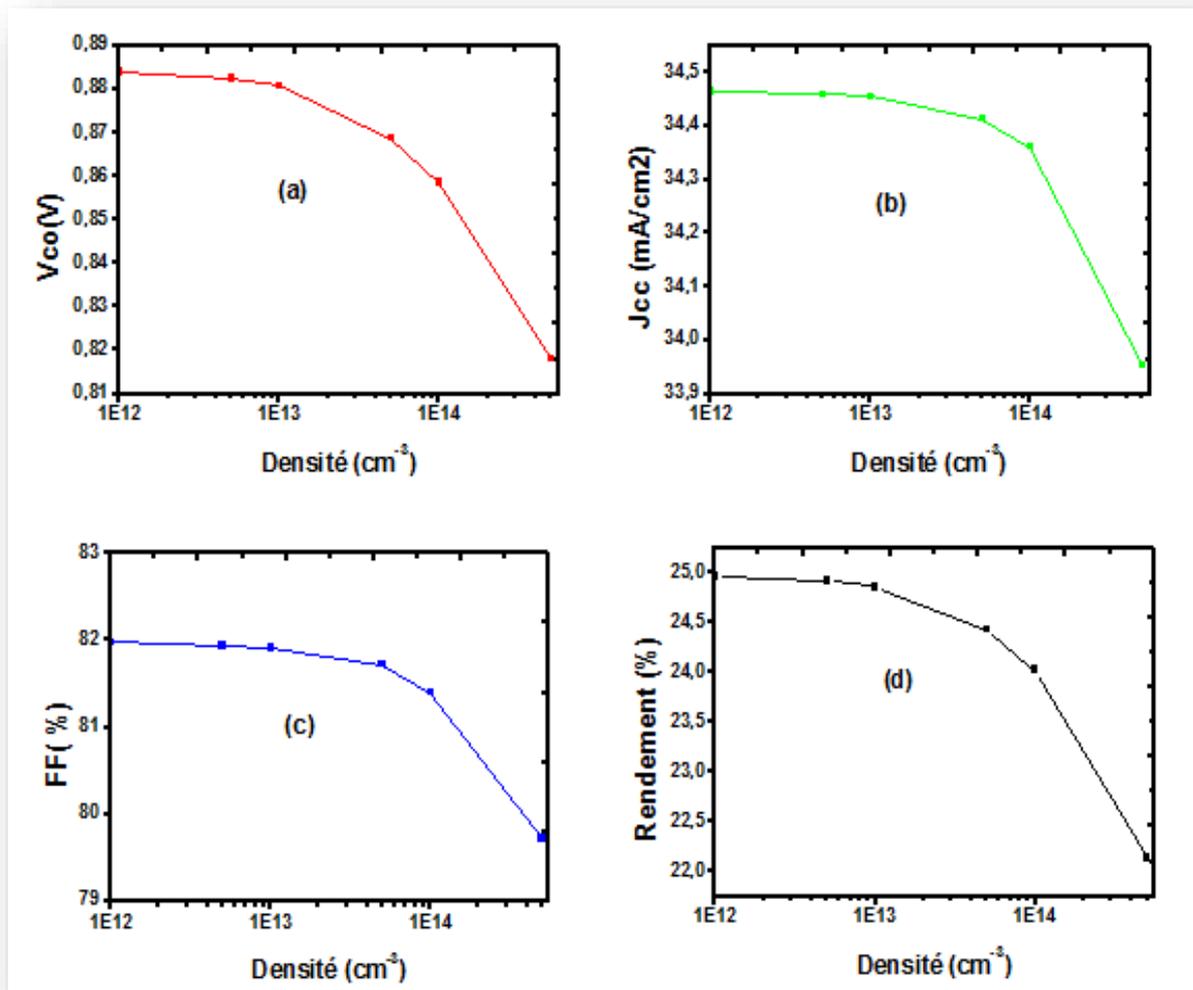


Figure III.33 : Effet de la densité du piège profond de type donneur sur J_{cc} ; V_{co} ; FF; η .

D'après les résultats, on remarque que tous les paramètres de sortie présentent une diminution considérable avec l'augmentation de la densité du piège profond, J_c , V_{co} , FF et η , parce que l'augmentation de la densité de défaut cause la diminution de la durée de vie des porteurs minoritaires et par conséquent la diminution de la collection de charge sur les électrodes et la dégradation de rendement.

Le rendement quantique externe (**Figure III.32**) présente également une diminution considérable sur toute la gamme des longueurs d'onde.

III.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé une cellule solaire a base de $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ ($x=0,65$) de type p-n en utilisant le simulateur SCAPS, avec une étude de l'effet de quelques paramètres, tel que le dopage, l'épaisseur, la durée de vie des porteurs minoritaires, la vitesse de la recombinaison en surface ,la température et les pièges profond sur les caractéristiques électrique de la cellule qui sont: la tension de circuit ouvert (V_{co}) , la densité de courant de court-circuit (J_{cc}) , le facteur de forme (FF) , le rendement de conversion (η) et le rendement quantique(EQE).

Conclusion Générale

Conclusion générale

La conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée.

Parmi les nouveaux matériaux considérés prometteurs pour le photovoltaïque, l'alliage InGaN étudié intensément depuis plus d'une dizaine d'années. Depuis le début des années 2000, il est étudié pour le photovoltaïque grâce à son coefficient d'absorption élevé, à sa bonne tolérance aux rayonnements, et à son large direct et modulable gap d'énergie interdite pouvant couvrir le spectre solaire de l'infrarouge à l'ultraviolet.

Nous avons effectué dans ce mémoire la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension et rendement quantique externe, d'une cellule solaire p-n à base d'InGaN pour une concentration d'indium de 65%. par le logiciel SCAPS.

On a fait également une étude de l'effet de dopage, l'épaisseur, la durée de vie des porteurs minoritaires, la vitesse de la recombinaison en surface, la température et les pièges profond sur les caractéristiques électrique de la cellule qui sont : la tension de circuit ouvert (V_{co}), la densité de courant de court-circuit (J_{cc}), le facteur de forme (FF), le rendement de conversion (η) et le rendement quantique(EQE).

Les résultats obtenus par la simulation sont les suivants : **$J_{cc}=34.46$ (mA/cm²), $V_{co}=0.884V$, $FF=81.98\%$ et $\eta=24.98\%$** , qui sont proche à ceux trouvés dans la littérature [54].

Comme conclusion, on a trouvé que:

- L'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur améliore le rendement électrique de la cellule et le rendement quantique au niveau du longueur d'ondes longues.
- L'augmentation de l'épaisseur de base améliore aussi le rendement électrique et quantique de la cellule.
- l'augmentation du dopage de la base entraine une augmentation dans la tension de circuit ouvert (V_{co}) et par conséquent une augmentation dans le rendement.
- L'augmentation du dopage de l'émetteur entraine une augmentation dans la tension de circuit ouvert(V_{co}) et par conséquent une augmentation dans le rendement.
- La diminution de la vitesse de recombinaison en surface de contact avant améliore le rendement électrique, et le rendement quantique externe(EQE) au niveau du longueurs d'onde courtes.

- La diminution de la vitesse de recombinaison en surface de contact arrière améliore aussi le rendement de conversion et une augmentation dans le rendement quantique externe(EQE) au niveau de longueurs d'onde longues.
- l'augmentation de la durée de vie des porteurs minoritaires augmente le rendement de conversion électrique et le rendement quantique externe(EQE).
- L'augmentation de la température cause une diminution de rendement électrique et le rendement quantique externe(EQE).
- L'augmentation de la densité du piège profond cause une diminution de rendement électrique et le rendement quantique externe(EQE).

Bibliographie

- [1] Bouafia, M., & Deblaoui, L. (2012). Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS). Mémoire de Master professionnel, Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [2] Yahya, A. O. M., Mahmoud, A. O., & Youm, I. (2008). Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. *Revue des Energies Renouvelables*, 11(3), 473-483.
- [3] Lelievre, J. F. (2007). Elaboration de SiNx: H par PECVD: optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques. Thesis of INSA Lyon.
- [4] Garcia Jr, B. (2007). Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas. Naval Post Graduate School, Monterey, California.
- [5] http://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/panneaux-photovoltaïques/2_principe_dune_cellule_photovoltaïque.html
- [6] Hojeij, W. (2007). Réalisation et caractérisations optoélectroniques de cellules photovoltaïques organiques (Doctoral dissertation, thèse de doctorat, Université de Limoges)
- [7] Allem, H. (2009). Etude de l'influence de la couche d'oxyde interfaciale sur les paramètres d'une cellule solaire à conversion photovoltaïque du type MIS (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [8] Charles Kittel : Physique de l'état solide. Edition Dunod, (1998).
- [9] Henry Mathieu : Physique des semiconducteurs et des composants électroniques. Edition Masson, (1998).
- [10] Lasladj, M. (2015). Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiales (Doctoral dissertation).
- [11] Kara Mohamed, W. (2012). Les Structures de bandes électroniques et les propriétés relatives aux semiconducteurs quasi binaires (GaP) 1-x (ZnSe) x (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [12] http://www.optiqueingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_03.html
- [13] Bonnaud, O. (2003). Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs. Université de Rennes, 1, 78.
- [14] https://www.google.com/search?q=https://lewebpedagogique.com/estechno/files/2016/02/LA-JONCTION_PN.pdf&hl=fr&source=lnms&sa=X&ved=0ahUKEwjM_JPpmd3iAhW9DWMBHQHJBs8Q_AUICygA&biw=1366&bih=657&dpr=1

- [15] Hamoudl, Y. (2018). Résolution numérique de la caractéristique I (V) et étude des paramètres d'une cellule photovoltaïque.
- [16] Amina, B. (2013). Etude comparative entre les cellules solaires de type p+-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs (Doctoral dissertation, Université de Biskra-Mohamed Khider).
- [17] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/4007/MPHY81>
- [18]] Mathieu, H. : Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Edition Masson, Paris 1990
- [19] M. J Kerr, "Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells, Thèse de Doctorat, Australian National University, 2002.
- [20] Levchenko, A. (2019). Étude de dispositifs photovoltaïques à hétérojonctions a-Si: H/c-Si: caractérisations vs. simulations en régime modulé de structures planaires et modélisations optoélectroniques de nanofils à structure radiale (Doctoral dissertation, Université Paris Saclay).
- [21] Malle, I. (2014). Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [22] <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1014/6/ChapitreI>
- [23] Sayad, A., & Hmaizia, T. (2018). Technique d'optimisation déterministe pour La résolution de problèmes multidimensionnelles.
- [24] Nichiporuk Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités, Thèse de doctorat, Lyon, 2005.
- [25] Bouzidi, K. (2018). Étude comparative des méthodes d'extraction des paramètres des cellule solaires (Doctoral dissertation).
- [26] Boussaid, M. (2012). Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques
- [27] Mahammed , A. Thème.
- [28] Nouar, A. O. U. N. (2010). Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales (Doctoral dissertation, Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie).
- [29] Helali, K. (2012). Modélisation d'une cellule photovoltaïque: Etude comparative (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [30] Mahfoud, A. (2018). Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement (Doctoral dissertation).

- [31] Mimoune , M. (2016). Étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [32] Mostefaoui, M. A. Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires à base de InGaN (Doctoral dissertation).
- [33] Bernardini, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D. Spontaneous polarization and piezoelectric Communications. 11, 1972, 617.
- [34] <https://www.theses.fr/2012PA112207>.
- [35] A. Dussaigne, " Diodes électroluminescentes blanches monolithiques", thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2005.
- [36] Wright, A.F. and Nelson, J.S. Explicit treatment of the gallium 3d electrons in GaN using the plane-wave pseudopotential method. Physical Review B. 1994, Vol. 50, 2159.
- [37] Mesrane, A., Rahmoune, F., Mahrane, A., & Oulebsir, A. (2015). Design and Simulation of InGaN-Junction Solar Cell. International Journal of Photoenergy, 2015
- [38] Vurgaftman, I., & Meyer, J. N. (2003). Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. Journal of Applied Physics, 94(6), 3675-3696
- [39] Fritsch, D., Schmidt, H., & Grundmann, M. (2004). Band dispersion relations of zinc-blende and wurtzite InN. Physical Review B, 69(16), 165204.
- [40] De Carvalho, L. C., Schleife, A., & Bechstedt, F. (2011). Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes. Physical Review B, 84(19), 195105.
- [41] Wu, J. (2009). When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. Journal of Applied Physics, 106(1), 5.
- [42] Brown, G. F., Ager III, J. W., Walukiewicz, W., & Wu, J. (2010). Finite element simulations of compositionally graded InGaN solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 94(3), 478-483.
- [43] Wu, J., Walukiewicz, W., Yu, K., Ager III, J. W., Haller, E. E., Lu, H., & Schaff, W. J. (2002). Small band gap bowing in In_{1-x}Ga_xN alloys. Applied Physics Letters, 80(25), 4741-4743.
- [44] Yacine, M. (2013). Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco (Doctoral dissertation, Université de Biskra-Mohamed Khider).
- [45] Lahouel, A. Influence de la température sur les caractéristiques d'une cellule solaire à base d'InGaN (Doctoral dissertation).

- [46] Marouf, Y., Dehimi, L., Bouzid, F., Pezzimenti, F., & Della Corte, F. G. (2018). Theoretical design and performance of In_xGa_{1-x}N single junction solar cell. *Optik*, 163, 22-32.
- [47] Chernyak, L., Osinsky, A., Temkin, H., Yang, J. W., Chen, Q., & Asif Khan, M. (1996). Electron beam induced current measurements of minority carrier diffusion length in gallium nitride. *Applied physics letters*, 69(17), 2531-2533.
- [48] Medjdoub, S. Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération (Doctoral dissertation, 04/01/2017).
- [49] Bensmain, F. (2015). Etude théorique sur les applications actuelles du ZnO et les dopages possibles sur ce matériau(Doctoral dissertation).
- [50] Hasni ,C.(2014).Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellules solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS(Doctoral dissertation, Université de Biskra-Mohamed Khider).
- [51] Chadel, A. Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS (Doctoral dissertation, 23-10-2018).
- [52] Touafek, N. (2015). Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn_{1-x}Ga_xSe₂.
- [53]Darga, A.(2015). Formation : Introduction à la Simulation de cellule photovoltaïque.
- [54]Zhang, X., Wang, X., Xiao, H., Yang, C., Ran, J., Wang, C., ... & Li, J. (2007). Simulation of In_{0.65}Ga_{0.35}N s
- [55]Shen, X., Lin, S., Li, F., Wei, Y., Zhong, S., Wan, H., & Li, J. (2008, September). Simulation of the InGa_N-based tandem solar cells. In *Photovoltaic Cell and Module Technologies II* (Vol. 7045, p. 70450E). International Society for Optics and Photonics.
- [56]Benmoussa, D., Hassane, B., & Abderrachid, H. (2013, March). Simulation of In_{0.52}Ga_{0.48}N solar cell using AMPS-1D. In *2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 23-26). IEEE.