

N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES  
FACULTE DES SCIENCES EXACTES  
SIDI BEL ABBES

# ***THESE DE DOCTORAT***

*Présentée par*

OMAR SOUILAH

*Spécialité : Physique*

*Option : Simulation en physique des matériaux*

*Intitulée*

**Contribution à la modélisation d'une cellule  
photovoltaïque multijonction à la base de InGaN**

*Devant le jury composé de :*

*Président : Heireche Houari*

*Examineur : Boumia Lakhdar*

*Examineur : Bousahla Anis Abdelmoumen*

*Directeur de thèse : Benzair Abdelnour*

*Co-directeur de thèse : Khashab Hamid*

Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbès.

MCA à l'Université de Tissemsilt.

MCA à l'Université de Sidi Bel Abbès.

Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbès.

Professeur à l'Université de Béchar.

*Année universitaire 2020 - 2021*

## *Remerciements*

---

*Avant tout je tiens mes remerciements à mon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage.*

*Je voudrais remercier tout particulièrement mes directeurs de thèse Abdelnour Benzair et Hamid Khachab, de m'avoir permis d'effectuer cette thèse. Je les remercie pour leur disponibilité tout au long de ce travail, pour leurs conseils et suggestions avisés sans lesquels ce travail n'aurait pas abouti, ainsi que pour tous leurs efforts pour que ce travail se fasse dans les meilleures conditions. Je veux qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude.*

*Je tiens à remercier M. Heïreche Houari de m'avoir fait l'honneur d'être le président du jury.*

*J'adresse de sincères remerciements à M. Boumia Lakhdar et M. Bousahla Anis Abdelmoumen d'avoir accepté de relire ce travail de thèse et d'en être examinateurs.*

*Mes plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire, tout particulièrement M. Benmoussa Dennai, M. Bouziane Azeddine et M. Khachai Houari, pour leur professionnalisme, leur disponibilité et leur gentillesse.*

*Je remercie encore une fois M. Benmoussa Dennai, maître de conférences à l'Université de Béchar, de participer au jury de cette thèse en qualité de membre invité.*

*Pour finir, je tiens à remercier toute ma famille et mes amis qui ont continué à me soutenir avec leurs prières. Un merci tout particulier à ma chère mère, qui m'a soutenue tout au long de mes années d'études et à ma chère épouse, qui a toujours été mon soutien.*

*...Omar Souïlah*

## *Dédicace*

---

*Je dédie ce travail :*

*A toute ma famille, surtout ma chère mère, ma femme, mes frères, mes sœurs, mes enfants : ALA, HADJER, AHMED*

*AMINE, IKRAM et ABDELMOUNIM.*

*A Monsieur Abderrahmane Benlahcen et sa famille.*

*A mes amis.*

*A tous qui m'ont aidé de loin ou de près.*

*à ...*

*...Omar Souilah*

# *Résumé*

---

Les semiconducteurs à base des matériaux III-N connaissent actuellement un intérêt croissant dans le développement des cellules PV à cause de nombreux avantages.

Parmi ces semi-conducteurs, on trouve principalement les alliages  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  dont l'énergie du gap varie d'une façon continue de 0,7 eV à 3,4 eV. Cela fournit un ajustement presque parfait pour réaliser des cellules solaires multijonctions. elles atteignent des rendements de conversion plus élevés et qui peuvent dépasser 40%.

Les structure multijonctions se basent sur l'utilisation de plusieurs jonctions, tout en empilant des matériaux possédants des gaps décroissants afin d'exploiter la quasi-totalité du spectre d'absorption.

Dans ce contexte s'inscrit ce travail, et qui a comme objectif l'étude par simulation numérique des performances des cellules solaires multijonctions à base de  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en vue d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule étudiée.

Nous définissons une cellule de référence de structure non standard de type (p-i-n/p-i-n) avec un ensemble de paramètres physiques, afin d'analyser leurs influences sur les performances électriques de la cellule (réponse spectrale, photocourant, tension en circuit ouvert, rendement, ...). Dans ce travail, des cellules solaires à base de  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  sous la jonction (PN / PN) et (PIN / PIN) ont été étudiées numériquement à l'aide d'AMPS-1D. Cette analyse met en évidence une efficacité optimale de 28,88% pour la structure (PN / PN) et 40,328% pour la structure (PIN / PIN).

**Mots clés :** Cellule solaire, InGaN, multijonction, PIN, simulation, AMPS-1D, performances.

# *Abstract*

---

Semiconductors based on III-N materials are currently experiencing increasing interest in the development of PV cells because of many advantages. Among these semiconductors, we find mainly the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  alloys whose gap energy varies continuously from 0.7 to 3.4 eV. This provides an almost perfect fit for making multi-junction solar cells. they achieve higher conversion efficiency which can exceed 40%. Multi-junction structures are based on the use of multiple junctions, while stacking materials with decreasing gaps in order to exploit almost the entire absorption spectrum.

This work falls within this context, and which has as its objective the study by numerical simulation of the performance of multi-junction solar cells based on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  in order to optimize the physical and geometric parameters of the cell studied.

We define a reference cell of non-standard type structure (PIN / PIN) with a set of physical parameters, in order to analyze their influences on the electrical performance of the cell (spectral response, photocurrent, open circuit voltage, efficiency, ...). In this work, solar cells based on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  under the junction (PN / PN) and (PIN / PIN) were investigated digitally using AMPS-1D. This analysis shows an optimal efficiency of 28.88% for the structure (PN / PN) and 40.328% for the structure (PIN / PIN).

**Keywords:** solar cell, InGaN, multijunctions, PIN, simulation, AMPS-1D, performance.

## المخلص

تشهد أشباه الموصلات القائمة على مواد  $III-N$  حاليًا اهتمامًا متزايدًا في تطوير الخلايا الكهروضوئية بسبب مزاياها العديدة. و من بين أشباه الموصلات هذه، نجد بشكل أساسي سبائك  $In_xGa_{1-x}N$  التي تختلف فجوة طاقتها باستمرار من 0,7 إلى 3,4 إلكترون فولط. و هذا ما يوفر ملائمة مثالية تقريبًا لصنع خلايا شمسية متعددة الوصلات، يجعلها تحقق مردود تحويل عالي يمكن أن يتجاوز 40%.

تعتمد الخلايا متعددة الوصلات على استخدام وصلات متعددة بفجوات متناقصة لأجل استغلال طيف الامتصاص بأكمله تقريبًا.

يندرج هذا العمل في هذا السياق، والذي يهدف إلى دراسة المحاكاة العددية لأداء الخلايا الشمسية متعددة الوصلات المصنوعة أساسًا من سبائك  $In_xGa_{1-x}N$  من أجل تحسين المعايير الفيزيائية والهندسية للخلية المدروسة.

نحدد خلية مرجعية لهيكل من النوع غير القياسي ( $PIN / PIN$ ) مع مجموعة من المعايير الفيزيائية، من أجل تحليل تأثيرها على الأداء الكهربائي للخلية (الاستجابة الطيفية، التيار الضوئي، جهد الدائرة المفتوحة، الكفاءة، ....). في هذا العمل، تم فحص الخلايا الشمسية القائمة على  $In_xGa_{1-x}N$  ذات الوصلة ( $PN / PN$ ) و ( $PIN / PIN$ ) رقميًا باستخدام  $AMPS-1D$ . يوضح هذا التحليل كفاءة مثلى بنسبة 28.88% للهيكल ( $PN / PN$ ) و 40.328% للهيكل ( $PIN / PIN$ ).

**الكلمات المفتاحية:** الخلية الشمسية،  $InGaN$ ، الوصلات المتعددة،  $PIN$ ، المحاكاة،  $AMPS-1D$ ، الأداء.

# Table des matières

---

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>I. Généralités sur les Cellules solaires</b>	
I.1 Introduction .....	6
I.2 Semiconducteur .....	6
I.2.1 Niveau de Fermi .....	6
I.2.2 Semiconducteur intrinsèque .....	7
I.2.3 Semiconducteur extrinsèque .....	8
I.2.3.1 Semi-conducteurs de type P .....	8
I.2.3.2 Semi-conducteurs de type N .....	8
I.3 Le spectre solaire .....	8
I.4 Nombre d'air-masse .....	11
I.5. Les cellules photovoltaïques .....	12
I.5.1 L'effet photovoltaïque .....	12
I.5.2. La conversion photovoltaïque .....	12
I.5.2.1. Jonction PN – Modèle de Shockley .....	12
I.5.2.2. La jonction PIN .....	15
I.5.2.3. L'interaction photon/semi-conducteur.....	16
I.5.2.4. La cellule photovoltaïque .....	18
I.5.2.5. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	19
I.5.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	20
I.5.3.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	20
I.5.3.2. Caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque.....	21
I.5.3.3. Paramètres de la cellule solaire.....	21
I.5.4. Limite théorique des cellules solaire .....	24
I.5.4.1 Limite théorique de $J_{cc}$ .....	24
I.5.4.2 Limite théorique de $V_{co}$ .....	25
I.5.4.3 Limite théorique de FF et $\eta$ .....	26
I.5.4.4 Limite théorique pour une cellule tandem .....	27
I.6. Conclusion .....	28
Bibliographies du chapitre I	

## II. Nitrure de Gallium-Indium (InGaN)

## Table des matières

---

II.1 Introduction .....	31
II.2 Nitrures-III .....	31
II.3. Propriétés structurelles.....	32
II.3.1 Structure cristalline .....	32
II.3.2 Polarité .....	35
II.3.3 Défauts structuraux.....	35
II.4. Propriétés électriques .....	37
II.4.1. Polarisation spontanée et piézoélectrique .....	37
II.4.1.1 Polarisation spontanée .....	37
II.4.1.2. Polarisation piézoélectrique .....	39
II.4.1.3. Polarisation totale.....	40
II.4.2. Structure de bande d'énergie.....	40
II.4.3. Propriétés électroniques.....	41
II.4.3.1 Densité d'état d'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	41
II.4.3.2 Gap d'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	42
II.4.3.2 Longueur de diffusion.....	45
II.4.3.3 Mécanisme de recombinaison.....	45
II.4.3.3.1 Recombinaisons Shockley-Read-Hall.....	46
II.4.3.3.2 Recombinaisons radiatives.....	46
II.4.3.3.3 Recombinaisons Auger.....	47
II.5. Propriétés thermiques.....	47
II.5.1. Conductivité thermique.....	47
II.5.2. Expansion thermique.....	48
II.6. Propriétés optiques.....	49
II.6.1 Indice de réfraction.....	49
II.6.2 Coefficient d'absorption.....	52
II.7. Dopage.....	53
II.7.1 Dopage de type N.....	54
II.7.2 Dopage de type P.....	54
II.8. Elaboration d'InGaN.....	54
Conclusion.....	56
Bibliographie de chapitre II	

### III. Etat de l'art des Cellules solaires à base d'InGaN



## Table des matières

---

III.1. Introduction.....	60
III.2. Record de Filières du photovoltaïque.....	60
III.3. Potentiel et défis d'InGaN pour le photovoltaïque .....	62
III.4. Cellules solaires à base d'InGaN.....	63
III.5. Etat de l'art des Cellules solaires à base d'InGaN.....	65
III.5.1. Cellules solaires à jonction (PN, PIN).....	65
III.5.1.1 Cellules solaires à homojonction .....	65
III.5.1.2 Cellules solaires à hétérojonction.....	68
III.5.2 Cellules solaires à multijonctions.....	72
III.6. Conclusion.....	76

Bibliographie de chapitre III

### **IV. Modélisation des cellules solaires à simple jonction à base d'InGaN**

IV.1. Introduction.....	80
IV.2. Les cellules multijonctions.....	80
IV.3. Modélisation des cellules à simple jonction PN et PIN à base d'InGaN..	81
IV.3.1. Le logiciel de simulation AMPS-1D.....	81
IV.3.2. Utilisation de l'AMPS-1D.....	82
IV.3.2.1. Propriétés générales du dispositif et du matériau.....	83
IV.3.2.2. Conditions environnementales.....	83
IV.3.2.3. Paramètres de modélisation.....	84
IV.3.3. Avantages et inconvénients de l'AMPS-1D.....	84
IV.3.4. Paramètres de modélisation.....	85
IV.3.5 Modélisation des cellules à simple jonction PN.....	87
IV.3.5.1 Description de la structure PN.....	87
IV.3.5.1 Procédure de modélisation.....	88
IV.3.5.2. Effet du dopage de la couche émettrice.....	88
IV.3.5.3. Effet d'épaisseur de la couche émettrice.....	90
IV.3.5.4. Performances de la cellule $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{N}$ .....	91
IV.3.5.5. Performances de la cellule $\text{In}_{0,81}\text{Ga}_{0,19}\text{N}$ .....	92
IV.3.6. Modélisation des cellules à simple jonction PIN.....	93
IV.3.6.1. Description de la structure PIN étudiée.....	93
IV.3.6.2. Procédure de modélisation.....	94
IV.3.6.3 Performances de la cellule PIN $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{N}$ .....	96

## Table des matières

---

IV.3.3.4 Performances optimales de la cellule PIN $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ .....	96
IV.3.7 Comparaison entre la structure PN et PIN.....	97
IV.4. Conclusion.....	98
Bibliographie de chapitre IV	

### V. Modélisation des cellules tandems à base d'InGaN

V.1. Introduction.....	100
V.2. Modélisation d'une cellule tandem à base d'InGaN .....	100
V.2.1 Modélisation de la structure tandem PN/PN.....	100
V.2.1.1. Description de la structure tandem PN/PN.....	100
V.2.1.2. Procédure .....	102
V.2.1.3. Résultats et discussions .....	102
V.2.1.4. Performances des cellules tandem (A) et (B).....	106
V.2.2 Modélisation de la structure tandem PIN/PIN.....	106
V.2.2.1 Description de la structure tandem PIN/PIN.....	106
V.2.2.2. Résultats et discussions.....	108
V.2.2.3. Effet d'épaisseur de la couche intrinsèque .....	110
V.2.2.4. Effet du taux d'Indium de la couche intrinsèque.....	112
V.2.2.5. Performances des cellules tandem (C), (D) et (E).....	112
V.2.3. Comparaison aux résultats de la littérature.....	113
V.2.4. Limitations technologiques.....	114
V.2.5. Modélisation des défauts structuraux.....	114
V.3. Conclusion .....	118
Bibliographies du chapitre V	
Conclusion Générale .....	122

# Liste des figures

<b>Figure Int.1:</b> La consommation mondiale d'énergie primaire .....	1
<b>Figure Int.2:</b> L'énergie solaire dans le monde .....	2
<b>Figure I-1 :</b> Le soleil.....	8
<b>Figure I-2 :</b> Rayonnement du soleil .....	10
<b>Figure I-3 :</b> Définition de l'air mass $AM_x$ .....	11
<b>Figure I-4:</b> Spectre solaire .....	12
<b>Figure I-5 :</b> Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction PN à l'équilibre...13	
<b>Figure I-6:</b> Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.....14	
<b>Figure I-7:</b> Schéma d'une cellule photovoltaïque.....19	
<b>Figure I-8:</b> Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.....20	
<b>Figure I-9:</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....20	
<b>Figure I-10:</b> Caractéristique (I-V) d'une cellule solaire.....21	
<b>Figure I-11:</b> Flux de photons (en noir) et densité de courant maximale correspondant à chaque énergie de gap (en bleu) pour le spectre solaire AM1.5G.....25	
<b>Figure I-12:</b> Limite théorique de $V_{oc}$ calculée en fonction de $E_g$ selon le modèle Green, Kiess, ainsi qu'une estimation pour la structure p-i-n.....26	
<b>Figure I-13:</b> Limite théorique de FF (a) et de $\eta$ (b) pour une jonction p-n calculées en se basant sur le modèle de Green et Kiess, ainsi qu'une estimation pour p-i-n...27	
<b>Figure I-14:</b> Limite théorique du rendement d'une cellule tandem calculée selon le Modèle de Kiess (a) et de Green (b).....27	
<b>Figure II-1:</b> Tableau de Mendeleïev.....31	
<b>Figure II-2 :</b> Structure wurtzite, exemple du GaN.....33	
<b>Figure II-3 :</b> Structure cubique zinc-blende exemple du GaN.....34	
<b>Figure II-4:</b> La première zone de Brillouin pour une structure a) WZ b) ZB.....35	
<b>Figure II-5:</b> Energie de formation des défauts natifs dans GaN sous conditions riches en azote en fonction du niveau de Fermi. $E_F = 0$ correspond au maximum de la bande de valence.....36	

<b>Figure II-6:</b> Energie de formation des défauts natifs dans InN sous conditions riches en Indium en fonction du niveau de Fermi. ....	37
<b>Figure II-7:</b> Illustration schématique de la polarité dite Ga-face (à gauche) et la polarité dite N-face (à droite) pour le GaN.....	38
<b>Figure II-8 :</b> Diagramme de bande calculé à partir de la théorie de structure électronique des quasi-particules .....	41
<b>Figure II-10:</b> Evolution du gap du GaN en fonction de la température.....	43
<b>Figure II-11:</b> Evolution du gap de l'InN en fonction de la température.....	43
<b>Figure II-12:</b> Schéma de la recombinaison Shockley-Read-Hall avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous.....	46
<b>Figure II-13:</b> Schéma de la recombinaison radiative.....	47
<b>Figure II-14:</b> Schéma de la recombinaison Auger.....	47
<b>Figure II-15:</b> Variation de l'indice de réfraction dans l'InGaN, l'AlGaN et l'InAlN.....	50
<b>Figure II-16 :</b> Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.....	50
<b>Figure II-17:</b> Courbe de transmission et de réflexion du GaN.....	52
<b>Figure II-18:</b> Courbes d'absorption de couches d'InGaN élaborées avec différentes compositions d'Indium.....	53
<b>Figure III-1:</b> Rendements record dans les différentes filières photovoltaïques.....	60
<b>Figure III-2:</b> L'adaptabilité de la largeur de la bande interdite de l'InGaN au spectre solaire AM0.....	63
<b>Figure III-3:</b> Performance attendues (a) et diagrammes de bandes (b) pour une cellule à dix jonctions en InGaN.....	64
<b>Figure III.4:</b> Schéma de la cellule solaire PIN à double hétérojonction proposée par Zeng et al.....	66
<b>Figure III.5</b> Caractéristiques J-V et P-V de la cellule solaire PIN à base d'InGaN avec différents configuration de contact semi-transparent.....	66
<b>Figure III-6:</b> Schéma de la cellule solaire PIN proposée par Cai et al.....	67
<b>Figure III-7:</b> Caractéristiques J-V de la cellule solaire PIN à base d'InGaN en fonction compositions d'indium.....	67

<b>Figure III-8:</b> Schéma de la cellule solaire pin homojonction proposée par Islam et al.....	<b>68</b>
<b>Figure III-9:</b> Caractéristiques J-V de la structure comprenant une couche active a) $In_{0,25}Ga_{0,75}N$ et b) $In_{0,16}Ga_{0,84}N$ .....	<b>68</b>
<b>Figure III-10:</b> Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Jani et al.....	<b>69</b>
<b>Figure III-11:</b> Caractéristique J-V obtenue par Jani et al.....	<b>69</b>
<b>Figure III-12:</b> Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Neufeld et al.....	<b>69</b>
<b>Figure III-13:</b> Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire pin à base d' $InGaN/GaN$ obtenue par Neufeld et al.....	<b>69</b>
<b>Figure III-14:</b> Structure de cellule solaire $InGaN / GaN$ avec 12 périodes de 3nm d'épaisseur $In_xGa_{1-x}N$ 0,35QWet 17nmGaN barrière.....	<b>70</b>
<b>Figure III-15:</b> Schéma de la structure de cellule solaire PIN étudiée par Çakmak et al.....	<b>70</b>
<b>Figure III-16:</b> Schéma de la structure de cellule solaire à puits quantiques étudiée par Zheng et al.....	<b>71</b>
<b>Figure III-17:</b> Caractéristique J-V obtenue par Zheng et al.....	<b>71</b>
<b>Figure III.18</b> Schéma de la structure de cellule solaire à puits quantiques $InGaN/GaN$ étudiée par Liu et al.....	<b>72</b>
<b>Figure IV.1 :</b> Principe de la cellule multijonctions.....	<b>80</b>
<b>Figure IV.2</b> Fenêtre d'AMPS-1D pour introduire les paramètres des matériaux.....	<b>83</b>
<b>Figure IV-3:</b> Le spectre solaire AM1.5G utilisé dans ce travail par l'AMPS-1D.....	<b>83</b>
<b>Figure IV-4:</b> Fenêtre d'AMPS-1D pour introduire le flux du spectre solaire et coefficients d'absorption des matériaux.....	<b>85</b>
<b>Figure IV-5:</b> Structure de la cellule: a) 53% d'Indium, b) 81% d'Indium.....	<b>87</b>
<b>Figure IV-6:</b> Densité du courant de court circuit de la cellule $In_{0,53}Ga_{0,47}N$ en fonction dopage de l'émetteur $N_A$ ( $N_A = 0.25N_D$ ) .....	<b>89</b>
<b>Figure IV-7:</b> Tension à circuit ouvert de la cellule $In_{0,53}Ga_{0,47}N$ en fonction de dopage de l'émetteur $N_A$ ( $N_A = 0.25N_D$ ).....	<b>89</b>

<b>Figure IV-8:</b> Rendement de la cellule $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ en fonction de dopage de l'émetteur $N_A$ .....	<b>90</b>
<b>Figure IV-9:</b> Densité du courant de court circuit de la cellule $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ en fonction d'épaisseur de l'émetteur $d_E$ .....	<b>90</b>
<b>Figure IV-10:</b> Rendement de la cellule $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ en fonction d'épaisseur de l'émetteur $d_E$ .....	<b>91</b>
<b>Figure IV-11:</b> Caractéristique courant-tension de la cellule $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ .....	<b>92</b>
<b>Figure IV-12:</b> Caractéristique courant-tension de la cellule $In_{0.81}Ga_{0.19}N$ .....	<b>92</b>
<b>Figure IV-13:</b> Structure PIN: a) 53% d'Indium, b) 81% d'Indium.....	<b>93</b>
<b>Figure IV-14:</b> Le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert de la cellule Homojonction ( PIN $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ ) en fonction d'épaisseurs intrinsèque ....	<b>94</b>
<b>Figure IV-16:</b> Rendement de la cellule homojonction (PIN $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ ) en fonction d'épaisseurs intrinsèque.....	<b>94</b>
<b>Figure IV-17:</b> Courant de court circuit et Tension à circuit ouvert de la cellule PIN ( $In_{0.81}Ga_{0.19}N$ ) en fonction d'épaisseurs $d_i$ de la couche intrinsèque.....	<b>95</b>
<b>Figure IV-18:</b> Rendement de la cellule homojonction PIN ( $In_{0.81}Ga_{0.19}N$ ) en fonction d'épaisseur $d_i$ de la couche intrinsèque.....	<b>95</b>
<b>Figure IV-19:</b> Caractéristiques courant- tension et puissance-tension obtenus avec les paramètres optimaux de la cellule PIN $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ .....	<b>96</b>
<b>Figure IV-20:</b> Caractéristiques courant- tension et puissance-tension obtenues avec les paramètres optimaux de la cellule PIN $In_{0.81}Ga_{0.19}N$ .....	<b>97</b>
<b>Figure IV-21:</b> Caractéristiques courant- tension obtenues avec les paramètres optimaux des cellules $In_{0.53}Ga_{0.47}N$ et $In_{0.81}Ga_{0.19}N$ pour les deux structures.....	<b>98</b>
<b>Figure V-1:</b> Structure de cellules PN/PN: 1) sans jonction tunnel, 2) avec jonction tunnel.....	<b>101</b>
<b>Figure V-2:</b> Densité de courant de court circuit en fonction du dopage $N_A$ pour différentes épaisseurs $d_E$ . 1) Cellule (A) sans TJ. 2) Cellule (B) avec TJ.....	<b>103</b>
<b>Figure V-3:</b> Tension à circuit ouvert en fonction de dopage $N_A$ de la couche P pour différentes épaisseurs $d_E$ . 1) Cellule (A) sans TJ. 2) Cellule (B) avec TJ.....	<b>103</b>

<b>Figure V-4:</b> Rendement en fonction de dopage $N_A$ de la couche P pour différentes épaisseurs $d_E$ . 1) Cellule (A) sans TJ. 2) Cellule (B) avec TJ.....	<b>104</b>
<b>Figure V-5:</b> Densité de courant de court circuit et Tension à circuit-ouvert de la structure (B) en fonction d'épaisseur de la jonction tunnel $d_{JT}$ .....	<b>105</b>
<b>Figure V-6:</b> Rendement de la structure (B) en fonction d'épaisseur $d_{JT}$ de la jonction tunnel.....	<b>105</b>
<b>Figure V-7:</b> Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de 1) la cellule (A), 2) la cellule (B) obtenues avec les paramètres optimaux.....	<b>106</b>
<b>Figure V-8:</b> Structure PIN/PIN : 1) cellule (C) sans TJ, 2) cellule (D) avec TJ.....	<b>107</b>
<b>Figure V-9:</b> Densité de courant de court-circuit en fonction de dopage $N_A$ pour différentes épaisseurs $d_E$ . 1) la cellule (C) 2) la cellule (D).....	<b>108</b>
<b>Figure V-10:</b> Tension à circuit ouvert de 1) la cellule (C), 2) la cellule (D) en fonction de dopage de $N_A$ pour différentes épaisseurs $d_E$ .....	<b>108</b>
<b>Figure V-11:</b> Rendement : 1) des cellules (C) et (D) en fonction du dopage $N_A$ de la couche P pour différentes épaisseurs $d_E$ .....	<b>109</b>
<b>Figure V-12:</b> Densité de courant de court-circuit et tension à circuit-ouvert en fonction d'épaisseurs intrinsèque 1) cellule (C) ; 2) cellule (D).....	<b>110</b>
<b>Figure V-13:</b> Rendement en fonction d'épaisseur $d_i$ de la couche intrinsèque 1) de la cellule (C), 2) de la cellule (D).....	<b>111</b>
<b>Figure V-14:</b> Caractéristiques densité de courant-tension de la cellule solaire (D) obtenues avec différentes concentrations d'Indium dans l'alliage $In_xGa_{1-x}N$ de la couche intrinsèque de la cellule supérieure.....	<b>112</b>
<b>Figure V-15:</b> Structure (E).....	<b>112</b>
<b>Figure V-16:</b> Caractéristiques densité de courant- tension et puissance-tension de 1) la cellule (C), 2) la cellule (D) et 3) la cellule (E) obtenues avec les paramètres optimaux.....	<b>113</b>
<b>Figure V-17:</b> Densité d'états des queues de bandes et du défaut dans le gap de l' $In_{0,53}Ga_{0,47}N$ .....	<b>115</b>
<b>Figure V-18:</b> Interface pour introduire les différents paramètres de la simulation de : a) défauts profonds b) queues de bandes.....	<b>116</b>
<b>Figure V-19:</b> Evolution du $J_{CC}$ et du $V_{CO}$ de la cellule (E) pour différentes largeur à mi-hauteur des défauts gaussiens.....	<b>116</b>

<b>Figure V-20:</b> Evolution du Rendement et Facteur de forme de la cellule (E) pour différentes largeur à mi-hauteur des défauts gaussiens.....	<b>116</b>
<b>Figure V-21:</b> Caractéristiques courant-tension de la cellule (E) pour différentes concentration des défauts profonds de type donneur.....	<b>117</b>
<b>Figure V-22:</b> Evolution du $J_{CC}$ et du $V_{CO}$ de la cellule (E) pour différentes concentrations des défauts profonds de type donneur.....	<b>118</b>
<b>Figure V-23:</b> Evolution du Rendement et Facteur de forme de la cellule (E) pour différentes concentration des défauts profonds de type donneur.....	<b>118</b>
<b>Figure V-24:</b> Evolution du $J_{CC}$ et du $V_{CO}$ de la cellule (E) pour différentes énergies d'Urbach des queues de bandes.....	<b>119</b>
<b>Figure V-25:</b> Evolution du Rendement et Facteur de forme de la cellule (E) pour différentes énergies d'Urbach des queues de bandes.....	<b>119</b>



## Liste des tableaux

<b>Tableau II-1 :</b> Paramètres structuraux $a$ , $c$ et $u$ pour le GaN et l'InN.....	33
<b>Tableau II-2:</b> paramètre de maille cubique du GaN et InN.....	34
<b>Tableau II-3:</b> polarisation spontanée du GaN et InN données dans la littérature.....	39
<b>Tableau II-4:</b> Les coefficients piézoélectriques du GaN et InN.....	39
<b>Tableau II-5:</b> Valeur du paramètre de courbure reporté par différents groupes en fonction de l'épaisseur de la couche, la composition en indium ou l'état de contrainte de la couche.....	42
<b>Tableau II-6:</b> Evolution du gap de GaN et InN en fonction de la température.....	44
<b>Tableau II-7:</b> Evolution du gap de GaN et InN en fonction de la pression.....	44
<b>Tableau II-8:</b> Résumé des propriétés thermiques du GaN et de l'InN.....	48
<b>Tableau II.9:</b> Caractéristiques physiques des substrats utilisés pour croissance du GaN..	55
<b>Tableau III-1:</b> Rendement des cellules multijonctions sous un spectre solaire AM1.5.....	65
<b>Tableau III-2</b> Rendement des cellules multijonctions sous un optimum de concentration...	65
<b>Tableau III-3</b> Etat de l'art de cellule solaire homojonction à base d'InGaN.....	73
<b>Tableau III-4</b> État de l'art de cellule solaire hétérojonction à base d'InGaN.....	74
<b>Tableau III-5.</b> État de l'art des cellules solaires multijonctions à base d'InGaN.....	76
<b>Tableau IV-1:</b> Paramètres utilisés dans le calcul de la mobilité des porteurs en fonction de la concentration de dopage dans cette étude.....	87
<b>Tableau IV-2:</b> Paramètres du matériau $In_xGa_{1-x}N$ à 300 °K pour une concentration de 53% et 81% d'Indium.....	88
<b>Tableau IV-3:</b> Paramètres du matériau $In_xGa_{1-x}N$ à 300 °K.....	93
<b>Tableau V-1:</b> Paramètres du matériau $In_xGa_{1-x}N$ à 300°K pour la cellule (A).....	101
<b>Tableau V-2:</b> Paramètres du matériau $In_xGa_{1-x}N$ à 300°K pour la cellule (B).....	102
<b>Tableau V-3</b> Valeurs optimales des paramètres des cellules tandem (A) et (B).....	106
<b>Tableau V-4:</b> Paramètres du matériau $In_xGa_{1-x}N$ à 300 °K pour les structures (C) et (D)..	107
<b>Tableau V-5</b> Valeurs optimales des paramètres des cellules tandem (C) et (D).....	113

---

---

# INTRODUCTION GENERALE

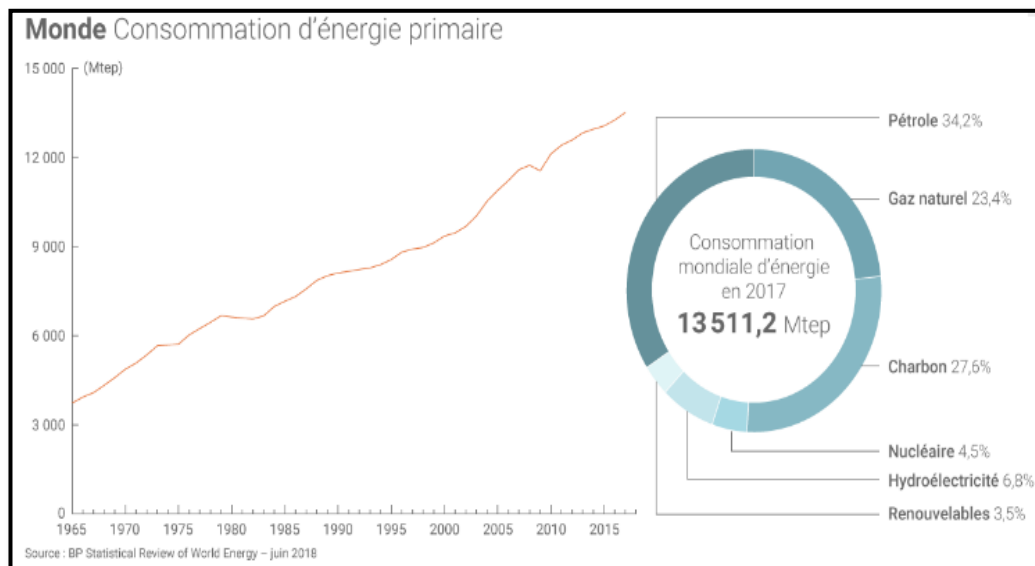
---

---

## Introduction Générale

La consommation mondiale d'énergie continue à hausser à cause de la croissance économique d'une part, et la croissance démographique d'une autre part. Les ressources conventionnelles telles que le charbon et le pétrole brut sont limités et produisent des gaz à effet de serre. Les concentrations atmosphériques globales de dioxyde de carbone, le méthane et les oxydes d'azote ont nettement augmenté, et le réchauffement dû à ces gaz devrait augmenter comme les humains ajoutent plus de gaz à effet de serre [1].

On peut constater de la Figure Int.1 que la consommation mondiale d'énergie primaire a doublé au cours des 40 dernières années.



**Figure Int.1** La consommation mondiale d'énergie primaire (Connaissance des Énergies, d'après BP Statistical Review of World Energy) [2].

En 2018, L'Agence internationale de l'énergie avait déjà fait état d'une hausse de la consommation mondiale d'énergie de 2,1% en 2017, et confirme que toutes les sources d'énergie ont été davantage consommées l'an dernier dans le monde, y compris le charbon (+ 1%, sous l'effet de la hausse de la demande en Inde) pour la première fois depuis 2013. Au total, les énergies fossiles auraient encore compté pour 85,2% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017 selon les dernières données de BP (85,5% en 2016). Le pétrole reste de loin la principale source d'énergie du mix énergétique mondial (34,2%), avec une hausse de la consommation de 1,7 million de barils par jour (Mb/j) en 2017. Le développement des énergies

renouvelables hors hydroélectricité a été particulièrement important (+ 16,6%) mais celles-ci ne comptaient encore que pour 3,5% de la consommation d'énergie primaire dans le monde en 2017. La part de l'énergie nucléaire reste pour sa part relativement stable (4,5% en 2017). [2]

Actuellement, la plupart des pays au monde consomment plus d'énergie qu'ils en produisent, particulièrement en Europe. Cette balance énergétique déficitaire peut être expliquée par une forte augmentation de la consommation par rapport à la production qui ne cesse de diminuer, notamment à cause de l'épuisement des gisements de pétrole. Effectivement, les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, les réserves de ces derniers sont estimées à une cinquantaine d'années [3].

Le développement d'énergie renouvelable est une des solutions les plus prometteuses pour le futur énergétique de l'humanité. Le principal avantage de ces énergies renouvelables est qu'elles sont de sources illimitées, généralement fournies par des sources naturelles permanentes telles que le soleil, le vent, les chutes d'eau, en plus elles n'ont pas d'effet polluant comme le gaz à effet de serre, ce qui permet une réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). D'après la figure 2 on peut remarquer que l'énergie solaire (thermique, Photovoltaïque et thermique à concentration) ne fait seulement que 0,7% de l'énergie consommée dans le monde.

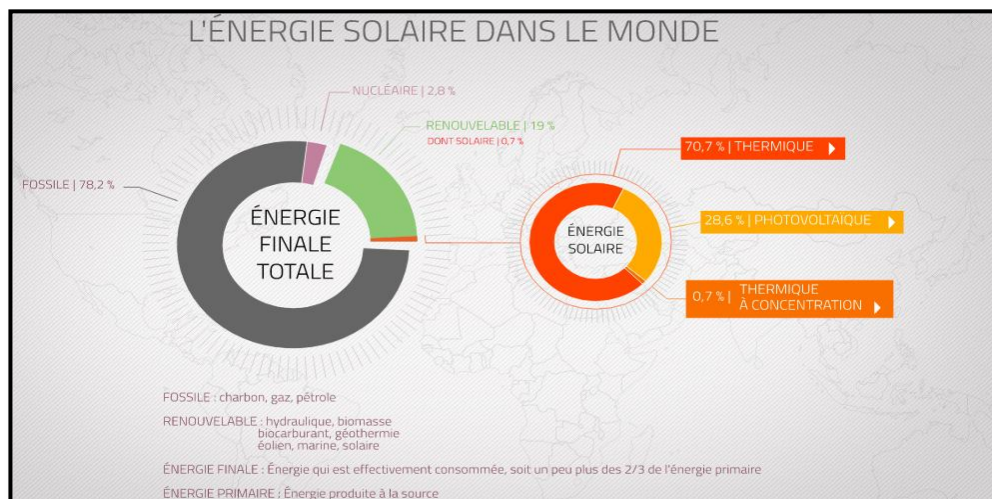


Figure Int.2: L'énergie solaire dans le monde. [4]

D'après le dernier rapport de l'Agence internationale de l'énergie (rapport 2017 publié en mars 2018), la croissance des énergies renouvelables est plus rapide que celle des énergies fossiles. Leur part dans la consommation mondiale atteint 25 % du

total, dont un quart pour l'énergie solaire. Pour autant, la demande d'autres sources d'énergie comme le charbon a également augmenté. Plus généralement, la demande mondiale d'électricité a augmenté de 3,1 % en 2017 [4].

Énormément recherches scientifiques ont été réalisées pour passer des énergies de stocks à des énergies renouvelables. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque est considérée comme la solution la plus prometteuse pour la production d'électricité. Cependant, cette technologie est largement dominée par le silicium qui souffre toujours d'un faible rendement et d'un coût relativement élevé [5]. Pour cela, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques font l'objet des recherches afin d'une meilleure exploitation de l'énergie solaire. La recherche de nouvelles structures et des matériaux capables d'avoir un meilleur coefficient d'absorption des spectres lumineux (comme les matériaux III-N qui connaissent actuellement un intérêt croissant dans le développement des cellules PV à cause de nombreux avantages), afin d'obtenir des meilleurs rendements avec un coût relativement bas [6].

La solution prometteuse de technologie solaire photovoltaïque (PV), qui répond au besoin du monde de sources d'énergie peu coûteuses, fiables et durables est l'utilisation des cellules à jonctions multiples, chacune étant responsable de l'absorption d'une gamme différente de longueurs d'onde dans le spectre solaire.

En tant que nouvelle technologie, les cellules solaires multi-jonctions III-V, offrent des rendements extrêmement élevés par rapport aux cellules solaires traditionnelles constituées d'une seule couche de matériau semi-conducteur. La forte demande pour le photovoltaïque à rendement élevé a récemment suscité un intérêt considérable pour les cellules solaires à jonctions multiples basées sur des semi-conducteurs III-V. Selon une technologie particulière, les cellules solaires multi-jonctions sont capables de générer environ deux fois plus d'énergie dans les mêmes conditions que les cellules solaires traditionnelles en silicium. Malheureusement, les cellules solaires multi-jonctions étant très coûteuses, elles sont principalement utilisées dans les applications à hautes performances telles que les satellites. Cependant, à notre avis, avec la technologie du concentrateur, la cellule tandem jouera un rôle sur le futur marché de l'énergie [7].

L'un des matériaux III-N, qui connaissent actuellement un intérêt croissant dans le développement des cellules PV à cause de nombreux avantages, auquel nous nous

intéressons est le nitrure de gallium et d'indium (InGaN), qui a une bande interdite variable de 0,7 à 3,4 eV et qui couvre la quasi-totalité du spectre solaire, particulièrement prometteur pour le photovoltaïque, en plus de son application déjà développée pour les diodes électroluminescentes [8, 9]

L'objectif principal de ce travail est l'étude par simulation numérique des cellules solaires tandem à base de  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  de structure non standard de type (p-i-n/p-i-n) avec le logiciel AMPS 1D en vue d'optimiser leurs paramètres technologiques ensuite l'étude d'effet des défauts structuraux sur la structure optimisée pour contribuer à l'obtention d'une cellule solaire tandem à base de  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  avec un rendement optimal et avec des meilleures performances. Les simulations numériques permettent de prédire les performances d'une cellule solaire avec une facilité de modification des paramètres de la cellule à moindre coût. Cela permet par conséquent de tester des structures innovantes plus facilement. C'est donc évidemment un atout majeur pour valider les structures cellules solaires avant d'effectuer des tests physiques. Ce qui permet de limiter le nombre de prototypes à fabriquer, permettant ainsi de faire des économies d'argent et de temps.

Ce manuscrit est développé selon cinq chapitres. Le premier chapitre donne des notions de base sur les semiconducteurs et le photovoltaïque ainsi que le spectre solaire, puis, explique le fonctionnement d'une cellule solaire.

Le deuxième chapitre décrit le matériau InGaN, ses caractéristiques, ses principales propriétés et sa croissance, puis, ses paramètres importants et ses différentes mises en œuvre.

Le troisième chapitre expose les rendements records de photovoltaïque et l'état de l'art du matériau InGaN et ses différentes mises en œuvre.

Ensuite, le quatrième chapitre, où la description du simulateur AMPS-1D et la simulation des cellules solaires conventionnelles PN et PIN à base d'InGaN sont étudiées et qui seront les composantes de base des cellules solaires multijonctions étudiées dans ce travail.

Enfin, les résultats d'études des cellules solaires tandem à base d'InGaN sont développés dans le cinquième chapitre.

**Bibliographies**

- [1] R. Alley et al., "Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers," Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, France, Feb. 2007.
- [2]. <https://www.connaissancedesenergies.org> . visité le : 24/12/2018
- [3] B. Multon, "L'énergie sur la terre: analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique," from: <https://eduscol.education.fr> visité le 14/09/19
- [4]<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/actualites/veille/revues-de-presse/lenergie-solaire-dans-le-monde>
- [5] Green, M. A. (2005). Third generation photovoltaics, Berlin, Springer.
- [6] Ashraful Ghani Bhuiyan, Kenichi Sugita, Akihiro Hashimoto, and Akio Yamamoto InGaN Solar Cells: Present State of the Art and Important Challenges IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 2, NO. 3, JULY 2012
- [7] Gui jiang Lin, Jingfeng Bi, Minghui Song, Jianqing Liu, Weiping Xiong and Meichun Huang (January 16th 2013). III-V Multi-Junction Solar Cells, Optoelectronics, Sergei L. Pyshkin and John M. Ballato, IntechOpen, DOI: 10.5772/50965. Available from: <https://www.intechopen.com/books/optoelectronics-advanced-materials-and-devices/iii-v-multi-junction-solar-cells>
- [8] SP DenBaars, D Feezell, K Kelchner, S Pimputkar, CC Pan, CC Yen, S Tanaka, Y Zhao, N Pfaff et R Farrell. Development of gallium-nitride-based lightemitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays . Acta Materialia 61.3 (2013), p. 945951.
- [9] S Nakamura. Nobel Lecture : Background story of the invention of efficient blue InGaN light emitting diodes . Reviews of Modern Physics 87.4 (2015), p. 1139.

---

CHAPITRE I

**GENERALITE SUR  
LES CELLULES  
SOLAIRES**

---



## Généralités sur les Cellules solaires

### I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons donné des notions les plus simples sur les semi-conducteurs et le photovoltaïque (PV) ainsi que le spectre solaire, en tant que source d'énergie, car l'éclairement est un facteur climatique très important dans le domaine d'énergie photovoltaïque. Enfin, nous avons présenté les limites théoriques des cellules solaires.

### I.2 Semiconducteur

Les matériaux solides peuvent être rangés en trois groupes qui sont les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. La recherche sur les matériaux semi-conducteurs a commencé au début du 19<sup>ème</sup> siècle. Parmi les semi-conducteurs étudiés et les plus célèbres, le silicium Si et le germanium Ge de la colonne IV du tableau périodique qui sont composés d'atomes identiques, mais d'autres, comme l'arséniure de gallium GaAs (III-V), le nitrure de gallium-indium (InGaN), sont composés d'atome d'éléments différents. La composition de semi-conducteurs permet d'accéder à des propriétés électriques et optiques que n'ont pas les semi-conducteurs purs.

Un semi-conducteur est un isolant pour une température de 0K. Cependant ce type de matériau ayant une énergie de gap plus faible que l'isolant, aura de par l'agitation thermique ( $T=300K$ ), une bande de conduction légèrement peuplée d'électrons et une bande de valence légèrement dépeuplée. Sachant que la conduction est proportionnelle au nombre d'électrons pour une bande d'énergie presque vide et qu'elle est proportionnelle au nombre de trous pour une bande presque pleine, on déduit que la conduction d'un semi-conducteur peut être qualifiée de «mauvaise» [1]. On peut dire qu'un semi-conducteur est un isolant mais qui peut devenir un conducteur très facilement en excitant les électrons de valence : ce qui peut se faire en chauffant le matériau, ou en l'éclairant, ou en le soumettant à une tension électrique bien définie.

Pour un conducteur, l'interpénétration des bandes de valence et de conduction implique qu'il n'existe pas d'énergie de gap. La bande de conduction est alors partiellement pleine (même aux basses températures) et ainsi la conduction du matériau est « élevée ».

#### I.2.1 Niveau de Fermi

Le niveau de Fermi  $E_f$ , correspond au plus haut niveau énergétique occupé par un électron à zéro Kelvin (0K). La probabilité d'occupation d'un niveau énergétique E, par un électron

obéit à la statique de Fermi-Dirac, défini par l'équation (I.1). La probabilité d'occupation de l'énergie  $E$  par un trou est  $1 - f(E)$  [2].

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)} \quad (\text{I.1})$$

$E_f$  le niveau de Fermi [eV].

$K$  la constante de Boltzmann  $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$ .

$T$  la température  $K$ .

Notons tout d'abord qu'à température absolue  $T = 0^\circ K$ , la bande de valence est saturée alors que la bande de conduction est vide d'électrons : il n'y'a donc pas de porteurs de charge. Lorsque la température augmente, les électrons sont excités et passent de la bande de valence à la bande de conduction tout en laissant dans la bande de valence des états inoccupés qui constituent la population de trous.

## I.2.2 Semiconducteur intrinsèque

Un semiconducteur intrinsèque est un semiconducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que de l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence [2]. Cette situation conduit à une condition de neutralité électrique pour le semi-conducteur intrinsèque, écrite pour le nombre volumique de porteurs de charge :

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (\text{I.2})$$

Où  $n_i$  représente la concentration intrinsèque des porteurs de charges dans un semi-conducteur,  $n_0$  et  $p_0$  sont des paires électron-trou. Un semi-conducteur intrinsèque n'est en général pas dégénéré et la conduction d'équilibre peut être exprimée par la loi d'action des masse qui peut être exprimée par [2,3]:

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (\text{I.3})$$

Avec 
$$n_0 = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{KT}\right) \quad (\text{I.4})$$

et 
$$p_0 = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{KT}\right) \quad (\text{I.5})$$

$$\text{soit} \quad n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{KT}\right) \quad (\text{I.6})$$

où  $E_g$  est l'énergie du gap de semiconducteur.

$K$  est la constante de Boltzmann.

Alors, la concentration intrinsèque des porteurs de charges dans un semi-conducteur est:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (\text{I.7})$$

$N_C$  et  $N_V$  sont les densités effectives d'état qui peuvent s'exprimer par :

$$N_C = \frac{2}{h^3} (2\pi m_n^* K T)^{3/2} \quad (\text{I.8})$$

$$N_V = \frac{2}{h^3} (2\pi m_p^* K T)^{3/2} \quad (\text{I.9})$$

Où  $m_n^*$  et  $m_p^*$  sont les masses effectives des électrons et des trous.

### I.2.3 Semiconducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques ou optoélectroniques.

#### I.2.3.1 Semi-conducteurs de type P

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteur d'une concentration  $N_A$ .

#### I.2.3.2 Semi-conducteurs de type N

Un semi-conducteur de type N est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type donneur d'une concentration  $N_D$ .

### I.3 Le spectre solaire:



*Figure I-1 : Le soleil.*

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années. Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à 63 500 kW/m<sup>2</sup>). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de 300 000 km à la seconde, dénommée vitesse de la lumière.

Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre avec une puissance d'environ 1 367 W/m<sup>2</sup>. C'est ce qu'on appelle la constante solaire [4]. La Terre, une petite boule comparée au Soleil, intercepte une si faible partie de l'énergie radiante du soleil, que les rayons du soleil ainsi stoppés paraissent constituer un faisceau parallèle. Cette énergie, est la plus abondante sur terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse, elle-même à l'origine des énergies fossiles. C'est l'ensemble de la vie sur Terre qui dépend de cette source énergétique. Heureusement pour l'humanité, selon les astronomes, le soleil ne devrait pas s'éteindre avant 5 autres milliards d'années [5].

Les théories actuelles présentent le rayonnement solaire comme une émission de particules. Ce flux est constitué de particules, appelées photons, qui atteignent la terre avec de différentes longueurs d'ondes à chacune de ces longueurs d'onde correspond une énergie spécifique décrite par la relation [2]:

$$E ( J ) = h \nu \quad (\text{I.10})$$

Avec, 
$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.11})$$

- $h$  : constante de Planck;  $h=6,62.10^{-34}$  J.s.
- $\lambda$  : longueur d'onde [m].
- $\nu$  : fréquence [Hz].
- $c$  : Vitesse de la lumière [m/s].

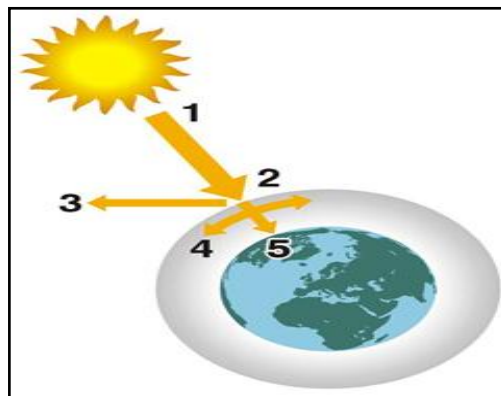
ou avec la relation simplifiée [3]:

$$E ( eV ) = \frac{1,24}{\lambda ( \mu m )} \quad (\text{I.12})$$

La répartition énergétique des différentes longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique du Soleil est appelé spectre solaire illustré dans la figure I-4.

Avec sa température d'émission de 5 500°C, le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences (courtes longueurs d'onde).

La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le soleil. 49 % du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe au-delà du rouge visible, dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible. [5]



**Figure I-2 : Rayonnement du soleil [5]**

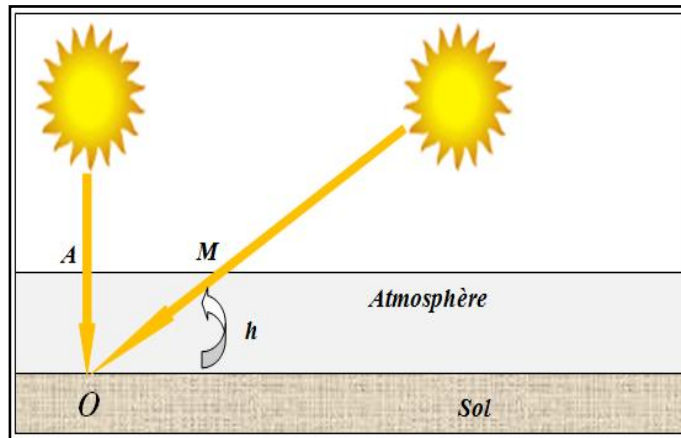
Avec:

1. Puissance émise par le soleil : 63 500 kW/m<sup>2</sup>.
2. Constante solaire : 1 370 W/m<sup>2</sup>.
3. Rayonnement réfléchi.
4. Rayonnement absorbé et diffusé.
5. Rayonnement solaire à la surface de la Terre (max : 1 000 W/m<sup>2</sup>).

Au moins 35 % du rayonnement solaire intercepté par la Terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Une partie du rayonnement qui atteint la Terre a été diffusée dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus, appartenant notamment à la frange bleue du spectre visible qui est responsable de la couleur bleue du ciel clair). D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire. Le reste du rayonnement atteint directement la surface.

## I.4 Nombre d'air-masse

On appelle masse d'air (ou Air Mass en anglais) [4], le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (**figure I-3**). Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil  $h$ .



**Figure I-3** : Définition de l'air mass  $AM_x$ .

À l'aide des points  $O$ ,  $A$  et  $M$  et cet angle  $h$  représentés à la figure (I-3), on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \Leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{I.13})$$

donc l'air mass (AM) est:

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.14})$$

La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension  $AM_x$ ,  $x$  étant [4]:

$$x = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.15})$$

Citons, à titre d'exemple :

- AM1: position du Soleil au zénith;  $h=90^\circ$ , (au niveau de la mer).
- AM2: le Soleil à  $30^\circ$ .
- AM1.5: le Soleil à  $41.8^\circ$  par convention.
- AM0: désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales).

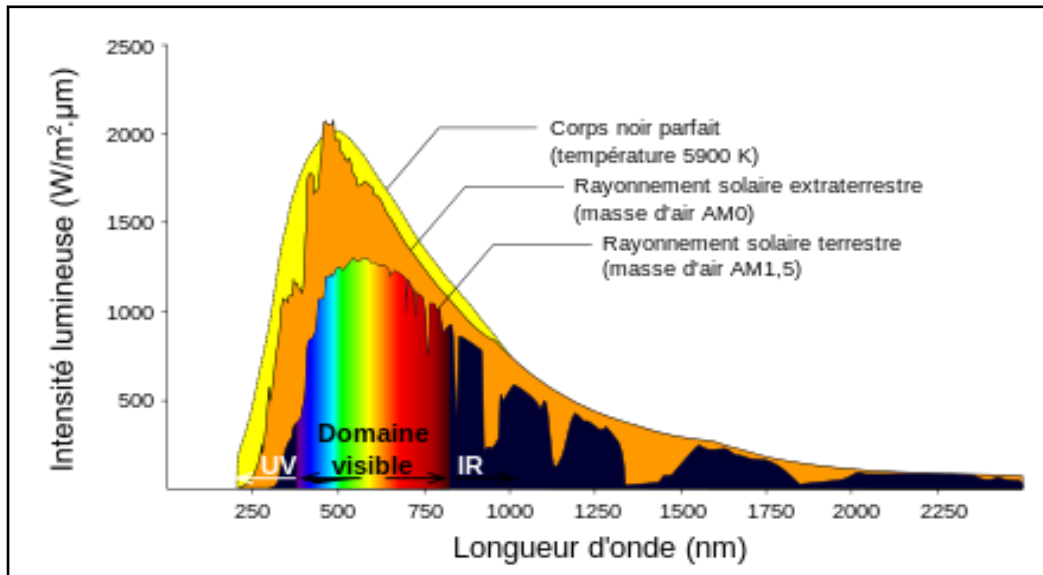


Figure I-4: Spectre solaire [6]

Outre la composition de l'atmosphère, le facteur le plus important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit traverser. Le rayonnement solaire reçu à la surface varie donc au cours du temps en fonction de la position du Soleil et de la couverture nuageuse. La puissance solaire maximale à la surface de la Terre est d'environ  $1\,000\text{ W/m}^2$  pour une surface perpendiculaire aux rayons.

## I.5. Les cellules photovoltaïques

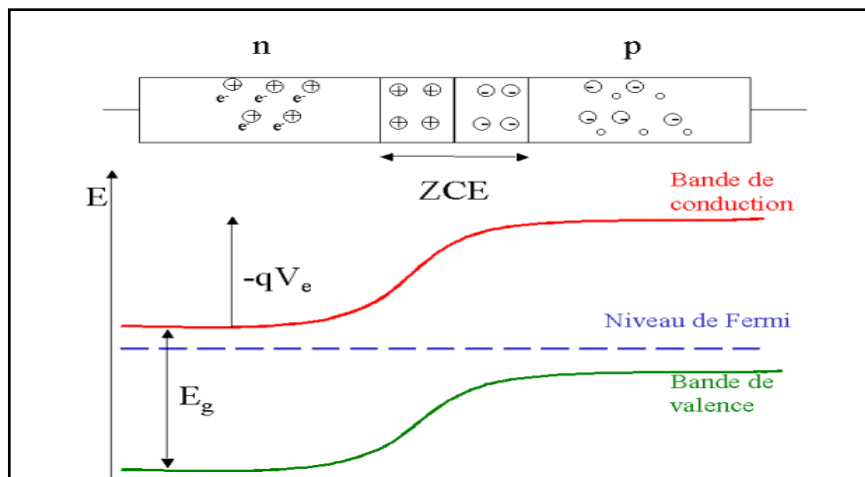
### I.5.1 L'effet photovoltaïque

La naissance de l'effet photovoltaïque était en 1839 par le savant Français Alexandre Edmond Becquerel qui a obtenu une tension électrique générée par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur [7]. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Elle utilise pour ce fait des modules photovoltaïques composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation de l'énergie solaire en produisant du courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction PN au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif. [8]

### I.5.2. La conversion photovoltaïque

### I.5.2.1. Jonction PN – Modèle de Schockley

La formation d'une jonction réalisée par une couche de semi-conducteur dopée P et une autre couche dopée N ( Si ces derniers sont faits du même matériau, on parle alors d'homojonction et s'ils sont composés de matériaux différents, on parle d'hétérojonction) représente le principe de base de la cellule solaire. La création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur permet de séparer les électrons et les trous qui sont générés par l'absorption de lumière dans le matériau. Lors de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone p et les trous vers la zone n (alignement du niveau de Fermi), afin de tendre vers un équilibre thermodynamique. Le dipôle, créé aux bords de la jonction, entraîne la formation d'un champ électrique qui s'oppose à l'équilibre, et à tout déplacement de charges. La polarisation de la jonction en direct permet alors de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel et donc l'intensité de champ électrique, permettant ainsi le passage des porteurs. A l'opposé, une polarisation inverse augmente la hauteur de barrière. [2]



**Figure I-5 :** Schéma de principe et diagramme de bande d'une jonction PN à l'équilibre.

Pour une jonction PN, la relation entre la tension aux bornes de la jonction et la densité du courant circulant au travers à l'obscurité est donnée par la relation (I- 16) [2]:

$$J_{obs} = J_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (I.16)$$

Avec :

$J_{obs}$  : Densité de courant à l'obscurité.

$n$  : Facteur d'idéalité de la diode. (La jonction PN est considérée idéale lorsque  $n=1$ )



$K$  : Constante de Boltzmann.

$q$  : Charge électronique.

$T$ : Température de la jonction PN en Kelvin.

$J_0$  : Densité de courant de saturation de la diode (nommé dans d'autres ouvrages  $J_s$ ), appelée aussi la densité de courant des porteurs minoritaires, qui est donnée par :

$$J_0 = q \cdot \left( \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \cdot n_p + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \cdot p_n \right) \quad (\text{I.17})$$

avec

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} ; \quad p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (\text{I.18})$$

L'équation (1.16) représente la relation  $J(V)$  pour une jonction PN à l'obscurité. Si l'on met cette jonction sous illumination, un courant photogénéré, courant de porteurs minoritaires, circulera en sens opposé au courant induit par la polarisation directe de la jonction. Alors, la relation  $J(V)$  pour une jonction sous illumination est donnée par [9]:

$$J = J_{obs} - J_{lum} = J_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) - J_{lum} \quad (\text{I.19})$$

où  $J_{lum}$  est la densité de courant photogénéré.

- ◆ Le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion.
- ◆ Le courant de génération thermique est dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.

Trois équations décrivant le transport de charges dans un semi-conducteur ont été données par Shockley [10]:

- Les équations des courants de conduction sous l'effet d'un champ électrique et de diffusion pour les électrons et les trous s'expriment par:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \vec{\nabla}n \quad (\text{I.20})$$

$$\vec{J}_p = q p \mu_p \vec{E} - q D_p \vec{\nabla} p \quad (\text{I.21})$$

Avec :

$n$ : Concentration d'électrons libres [ $cm^{-3}$ ].

$p$ : Concentration de trous libres [ $cm^{-3}$ ].

$\mu_n, \mu_p$  : Mobilité des électrons et des trous respectivement [ $cm^2.V^{-1}.S^{-1}$ ].

$D_n, D_p$  : Coefficient de diffusion des électrons et des trous respectivement [ $cm^2.S^{-1}$ ].

- Les équations de continuité concernent les phénomènes de génération de porteurs et de recombinaison:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \text{div}(J_n) \quad (\text{I.22})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{q} \text{div}(J_p) \quad (\text{I.23})$$

$G_n, G_p$  : Taux de génération des électrons et des trous respectivement.

$R_n, R_p$  : Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

- L'équation de Poisson décrit la dépendance du champ électrique en fonction de la densité de charges et de dopants:

$$\Delta \Psi = - \frac{q}{\varepsilon} (N_d^+ - N_a^- + p - n) \quad (\text{I.24})$$

Avec :

$\Psi$  : Potentiel électrostatique.

$\varepsilon$  : Permittivité diélectrique.

$N_d^+$  : Densité de donneurs ionisés.

$N_a^-$  : Densité d'accepteurs ionisés.

### I.5.2.2. La jonction PIN:

Une jonction pin se compose de trois régions dopées différemment, comme son nom l'indique, il existe une couche intrinsèque ou non dopée prise en sandwich entre une région dopée p et une région dopée n. La structure PIN est largement utilisée. La cellule solaire à structure PIN est l'un des axes de ce travail.

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque est illustré sur la figure (I.5), qui représente le fonctionnement d'une jonction PN où la zone de charge d'espace créée est une région dépourvue de porteurs libres qui se comporte comme une zone intrinsèque I. Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions P, I et N, leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés. Dans les régions électriquement neutres P et N, les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique, dirigé de la partie chargée positivement à la partie chargée négativement, vers la région où ils deviennent majoritaires [2]. Il y a donc une séparation des porteurs dans la ZCE vers les régions p et n. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération. Pour que le photocourant soit essentiellement créé dans la ZCE, on augmente artificiellement l'épaisseur de cette zone intrinsèque.

Notons que la structure de jonction PIN est destinée à supporter une tension inverse élevée [11]. En conséquence, elle présente une barrière de potentiel plus importante que la diode Schottky et que la diode PN. La différence fondamentale entre les diodes PIN et Schottky réside dans le fait que le fonctionnement fait appel aux porteurs majoritaires dans la diode Schottky, alors que ce sont les deux types de porteurs majoritaires et minoritaires qui interviennent dans la diode PIN [12].

### **I.5.2.3. L'interaction photon/semi-conducteur:**

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou *gap*, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure (I-6) présente les différentes transitions possibles selon la nature du *gap*. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des *k*, il s'agit d'un *gap* direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (Figure I-6 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium par exemple, le *gap* est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce

à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (Figure I-6 (b)).

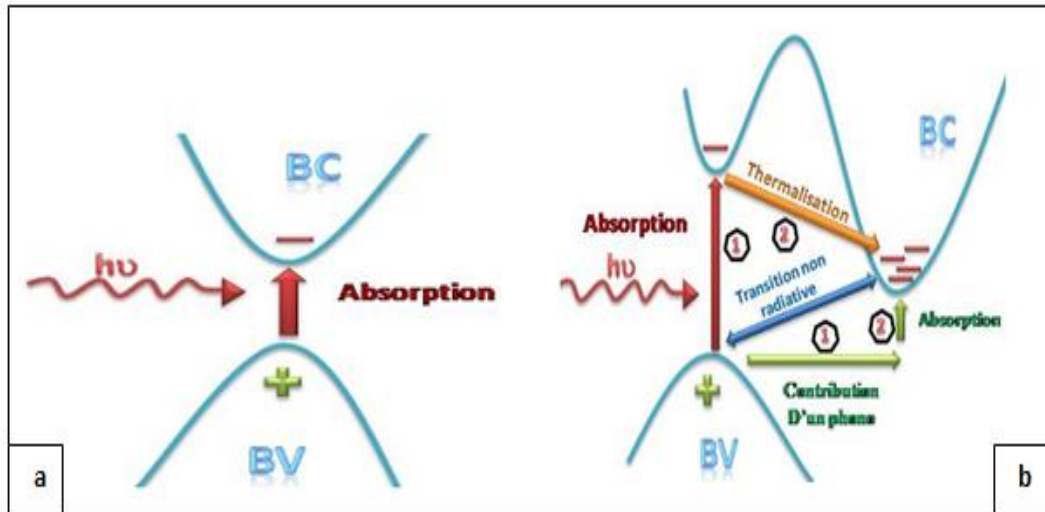


Figure I-6: Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.

a) semi-conducteur à gap direct      b) à un gap indirect [9]

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption  $\alpha$ .

Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde donnée par la loi de Lambert [10]:

$$I = I_0 \exp(-\alpha z) \tag{I.25}$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi K_{s/c}}{\lambda} \tag{I.26}$$

Avec:

$I_0$  : Intensité lumineuse incidente.

$I$  : Intensité lumineuse transmise.

$Z$  : Profondeur (cm).

$\alpha(cm^{-1})$  : Coefficient d'absorption dépendant de la longueur d'onde  $\lambda$  et de  $K_{s/c}$  coefficient d'extinction du matériau.

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer les deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur.

L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté  $G$  : il s'agit du taux de création de paires électron-trou (en  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{S}^{-1}$ ). Les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p et trous dans un matériau de type n) sont métastables et n'existeront, en moyenne, que pour un temps égal à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires. Cette grandeur définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent pas et est liée à la longueur de diffusion  $L_{n,p}$  ainsi qu'au coefficient de diffusion  $D_{n,p}$  du matériau par la relation :

$$L_{n,p} = \sqrt{D_{n,p} \tau_{n,p}} \quad (\text{I.27})$$

#### I.5.2.4. La cellule photovoltaïque:

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par effet photovoltaïque [2], qui se base sur les processus suivants:

- Les "grains de lumière" - les photons - heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules .
- Ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière, ce qui correspond à la création des paires (électron / trou) dans le matériau semi- conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

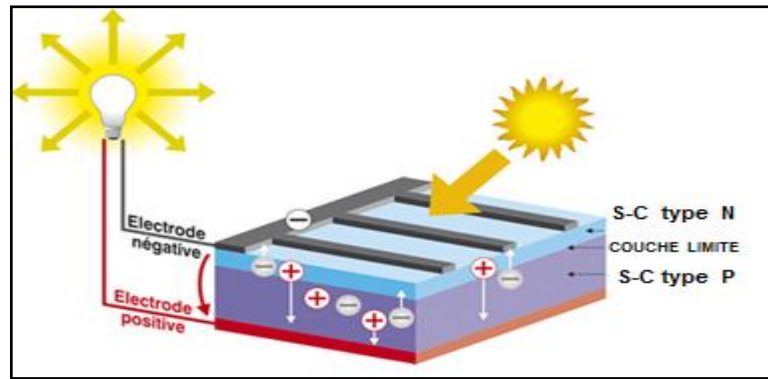


Figure I-7: Schéma d'une cellule photovoltaïque [5].

### I.5.2.5. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité qui se base sur la production et du transport dans un matériau semi-conducteur des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN est donc formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones P et N, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite cèdent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure ( I- 8 ). Les photons incidents créent des porteurs dans les régions N, P et la zone de charge d'espace. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres N et P, les photoporteurs minoritaires diffusent.

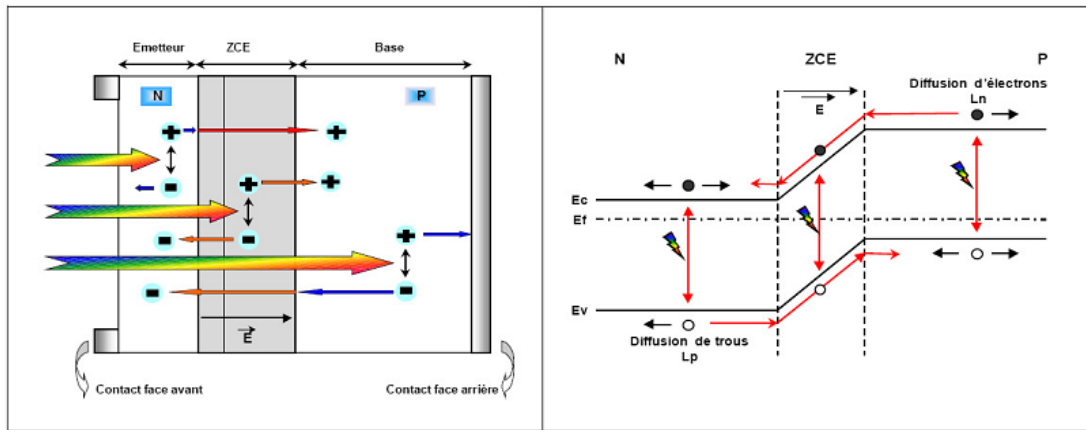


Figure I-8: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [13].

Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Les porteurs donnent naissance à un photocourant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photocourant résultant  $I_{ph}$  qui contribue au courant inverse de la diode.

### I.5.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:

#### I.5.3.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque:

Une cellule solaire réelle peut être schématisée par la figure (I-9). Elle propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque. on y retrouve le générateur de courant  $I_{ph}$ , correspondant au courant photogénéré opposé au courant d'obscurité  $I_{obs} = I_d$  de la diode polarisée en direct, ainsi que des résistances  $R_s$ ,  $R_{sh}$  et la résistance de charge .

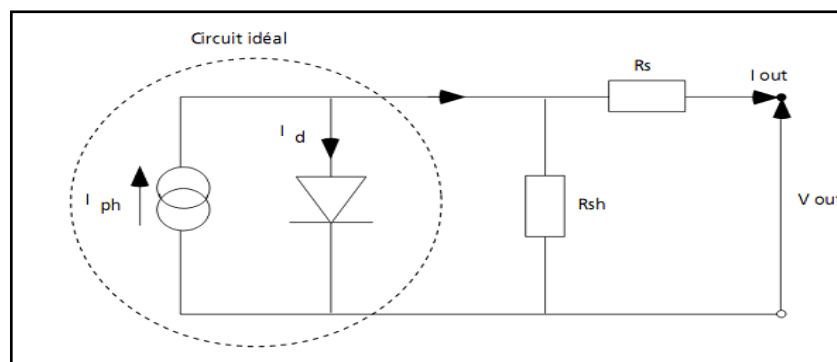


Figure I-9: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [2]

### I.5.3.2. Caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque:

Sous éclairement la diode ne passe plus par l'origine des coordonnées, il existe une région dans laquelle le produit  $VI$  est négatif, la diode fournit de l'énergie. Si on se limite à cette région active et si on compte positivement le courant inverse la caractéristique  $I(V)$  est représenté dans la figure (I-10). [2]

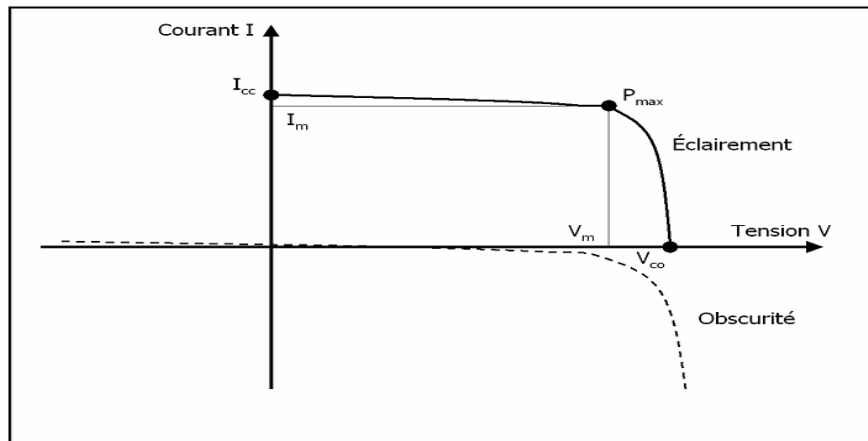


Figure I-10: Caractéristique (I-V) d'une cellule solaire. [2]

Sous éclairement la relation  $I(V)$  pour une cellule idéale est :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (I.28)$$

Pour une cellule non-idéale, les résistances série  $R_S$  et parallèle  $R_P$  (ou  $R_{sh}$ ) ont une influence sur la relation entre le courant  $I$  et la tension  $V$  qui s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{nKT}\right) - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad (I.29)$$

### I.5.3.3. Paramètres de la cellule solaire:

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- ❖ Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  .
- ❖ La tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  .
- ❖ Le facteur de forme  $FF$  .
- ❖ Le rendement de conversion d'énergie  $\eta$  .
- ❖ La réponse spectrale  $RS$  .

a. Courant de court-circuit  $I_{CC}$  (obtenu pour  $V=0$ ) :



Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température. [2]

$$I_{CC} \approx I_{ph} \quad (\text{I.30})$$

**b. Tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  (obtenu pour  $I = 0$ ):**

La tension de circuit ouvert exprimée en V est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. [2]

$$V_{CO} = \frac{n.KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (\text{I.31})$$

Où  $I_0$  est le courant de saturation.

**c. Puissance débitée:**

La puissance fournie par la photopile est donnée par le produit  $V.I$  : [10]

$$P = VI = V \left[ I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \right] \quad (\text{I.32})$$

Cette puissance est maximum au point  $P_m$  (Figure II-5), défini par  $dP/dV = 0$ , soit:

$$I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) - I_0 \frac{qV}{KT} \left( e^{\frac{qV}{KT}} \right) = 0 \quad (\text{I.33})$$

La tension  $V_m$  et le courant  $I_m$  au point  $P_m$  sont donnés par :

$$\left( 1 + \frac{qV_m}{KT} \right) \left( e^{\frac{qV_m}{KT}} \right) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \quad (\text{I.34})$$

$$I_m = \left( I_0 \frac{qV_m}{KT} \right) \left( e^{\frac{qV_m}{KT}} \right) \quad (\text{I.35})$$

La puissance débitée est alors donnée par le produit  $V_m \cdot I_m$  qui s'écrit :

$$P_m = V_m \cdot I_m = FF \cdot V_{CO} \cdot I_{CC} \quad (\text{I.36})$$

#### d. Facteur de forme $FF$

Le paramètre  $FF$  est le facteur de remplissage ou facteur de forme, il mesure le caractère rectangulaire de la courbe I-V. Il varie de 0,25 pour une cellule à faible rendement à 0,9 pour une cellule idéale [2].

$$FF = \frac{P_m}{V_{CO} I_{CC}} = \frac{V_m I_m}{V_{CO} I_{CC}} \quad (I.37)$$

#### e. Rendement de conversion $\eta$

Le rendement de la photopile est donné par le rapport de la puissance maximum disponible à la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot V_{CO} I_{CC}}{P_{inc}} \quad (I.38)$$

L'expression (II-20) montre que les performances d'une photopile résultent directement des valeurs des trois paramètres  $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$  et  $FF$ . Ces paramètres sont fonction d'une part de propriétés spécifiques du matériau telles que le gap, les coefficients d'absorption et de réflexion, la longueur de diffusion des porteurs ou la vitesse de recombinaison en surface, et d'autre part de paramètres technologiques tels que la profondeur de la jonction, la largeur de la zone de charge d'espace ou la présence de résistances parasites. Ainsi par exemple la nature et la valeur du gap jouent un rôle majeur.

#### f. Réponse spectrale d'une cellule solaire

La réponse spectrale  $RS$  d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident [14].

La réponse spectrale  $RS$  est donnée par la relation suivante [15]:

$$RS = \frac{I_{CC}(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} \quad (A/W) \quad (I.39)$$

Le rendement quantique externe  $EQE$  de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par [16]:

$$RS(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} \cdot EQE(\lambda) = 0,808 \cdot \lambda \cdot EQE(\lambda) \quad (I.40)$$

Le rendement quantique interne  $IQE$  de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe  $EQE$  par l'équation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (I.41)$$

Où  $R(\lambda)$  représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde  $\lambda$ .

### 1.5.4. Limite théorique des cellules solaires

Les performances limites des cellules solaires ont été étudiées par plusieurs groupes dont le célèbre travail de Shockley et Queisser [17]. Il y a aussi des travaux plus récents, comme celui de M.Green [18] et de H.Kiess [19]. Nous n'allons pas trop détailler, mais nous exposons ces limites basons sur le travail de F.Meillaud et al. [20].

#### 1.5.4.1 Limite théorique de $J_{cc}$

La limite de  $J_{cc}$  est obtenue avec l'hypothèse que tout photon ayant une énergie supérieure à  $E_g$  est absorbé et crée une paire électron-trous, et que l'efficacité de collection des porteurs est 100%. Autrement dit,  $J_{cc}$  est calculé, pour chaque  $E_g$ , par l'intégration mathématique du flux de photons du spectre solaire entre  $E_g$  et l'infini.

$$J_{limite} = q \cdot \int_{\lambda_g}^{\infty} N_{ph}(\lambda) \cdot d\lambda = q \cdot \int_{E_g}^{\infty} N_{ph}(E) \cdot dE \quad (I.42)$$

où  $\lambda_g$  est la longueur d'onde correspondant à  $E_g$ ,  $N_{ph}$  est le flux de photons, qui est exprimé en  $[m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1}]$  s'il est en fonction de longueur d'onde, ou  $[m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot eV^{-1}]$  s'il est en fonction de l'énergie. La Figure I-10 montre le flux de photons du spectre solaire AM1.5G et la densité du courant maximale que l'on peut en obtenir à chaque énergie.

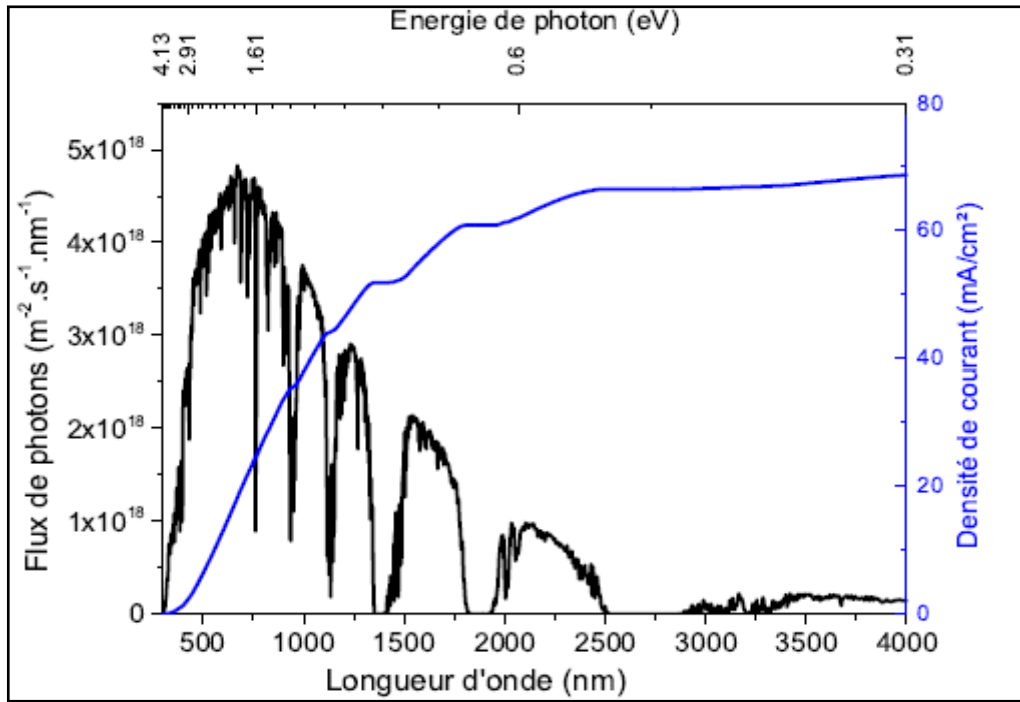


Figure I-11: Flux de photons (en noir) et densité de courant maximale correspondant à chaque énergie de gap (en bleu) pour le spectre solaire AM1.5G [20]

### 1.5.4.2 Limite théorique de $V_{co}$

Selon l'équation (1-19), et sachant que  $J(V_{co}) = 0$ , nous avons :

$$V_{co} = nkT \ln\left(\frac{J_{lum}}{J_0}\right) \tag{1.43}$$

Ou  $J_0$  est donné par l'équation (1.24), mais il peut être simplifié par :

$$J_0 = J_{00} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{nkT}\right) \tag{1.44}$$

Par comparaison avec le modèle de Green [18], Meillaud et al. [20] obtiennent  $J_{00}^{Green} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ [mA/cm}^2\text{]}$  ; alors qu'en comparant avec le modèle de Kiess [19] ils obtiennent :

$$J_{00}^{Kiess} = 4 \cdot 10^5 \cdot E_g^2 \text{ [mA/cm}^2\text{]} ; E_g \text{ en [eV]} \tag{1.45}$$

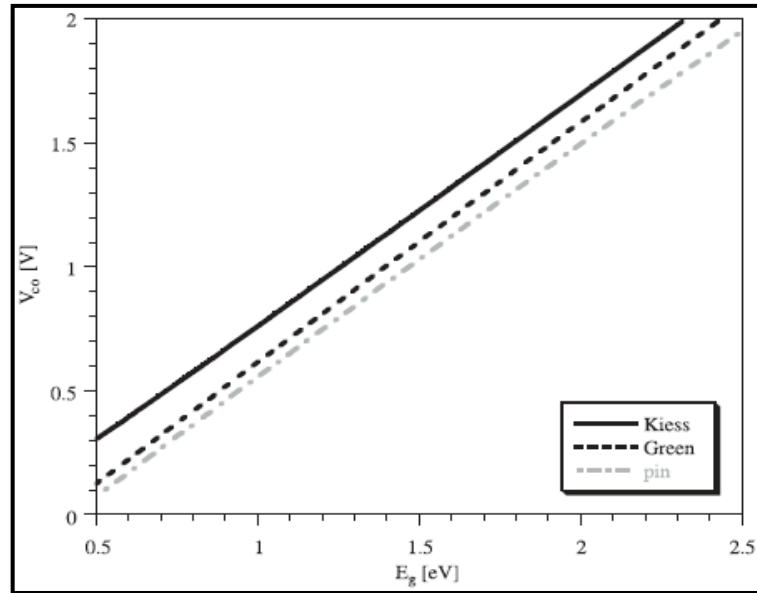
Pour une jonction p-i-n, Meillaud et al. [26] estiment que :

$$J_{00} = J_{00}^{Green, Kiess} + J_{00}^{p-i-n} \tag{1.46}$$

ou  $J_{00}^{p-i-n}$  représente les recombinaisons additionnelles dans la région intrinsèque. Ils estiment cette contribution à  $5.10^4 [mA/cm^2]$ . Pour des raisons de simplification, ils ne prennent en compte que  $J_{00}^{p-i-n}$  pour le calcul de la limite théorique de  $V_{co}$ . Par contre, l'équation utilisée dans le cas d'une structure p-i-n est :

$$J = J_{lum} - J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - J_{rec} \quad (1.47)$$

où  $J_{rec}$  représente une source de courant de recombinaison dans la zone intrinsèque, et ils l'estiment à  $0,8J_{lum}$  pour  $V = V_{co}$ . Le facteur d'idéalité,  $n$ , est estimé à 1 pour une jonction p-n et à 2 pour une jonction p-i-n. En utilisant ces valeurs, la limite théorique pour le  $V_{co}$  est donnée dans la Figure (I-12).



**Figure I-12:** Limite théorique de  $V_{co}$  calculée en fonction de  $E_g$  selon le modèle Green, Kiess, ainsi qu'une estimation pour la structure p-i-n. [20]

### 1.5.4.3 Limite théorique de FF et $\eta$

La limite théorique de FF est calculée selon l'équation (1.37). Le  $J_{Pmax}$  et  $V_{Pmax}$  sont obtenus par le calcul du point maximal du produit  $J.V$  de l'équation (1.19). En utilisant l'équation (1-38), nous pouvons déduire la limite théorique du rendement en fonction de  $E_g$ . La Figure I-13 montre les limites théoriques de FF et  $\eta$ . Le rendement théorique optimal est obtenu avec  $E_g$  de  $\sim 1,4eV$ .

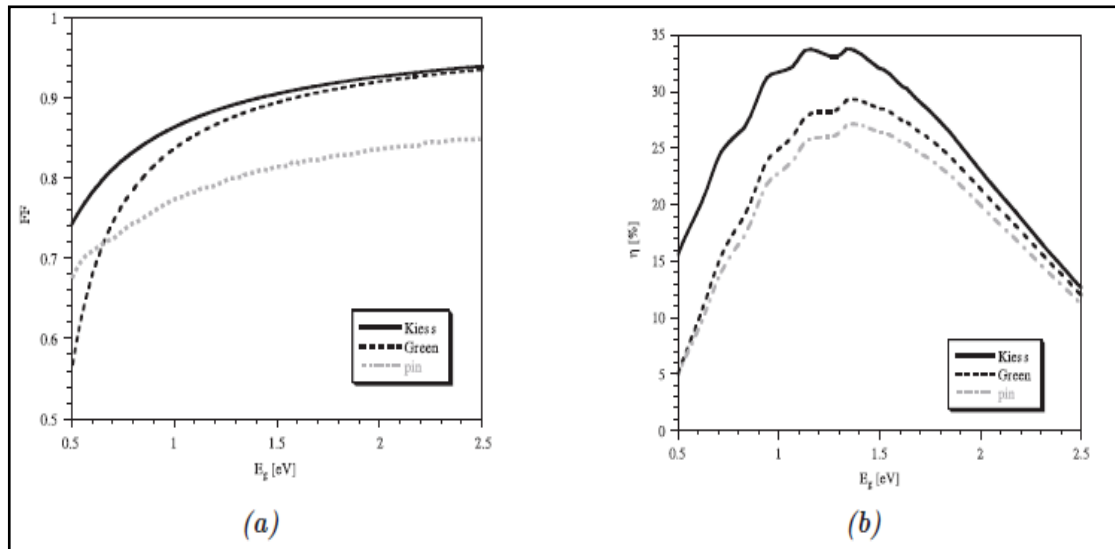


Figure I-13: Limite théorique de FF (a) et de  $\eta$  (b) pour une jonction p-n calculées en se basant sur le modèle de Green [18] et Kiess [19], ainsi qu'une estimation pour la jonction p-i-n [20].

### 1.5.4.4 Limite théorique pour une cellule tandem

Pour le calcul de la limite théorique du rendement d'une cellule tandem, Meillaud et al. [20] considèrent une adaptation du courant entre les deux jonctions, et que le spectre transmis par la jonction supérieure est totalement absorbé par la jonction inférieure dans la limite de son  $E_g$ . La Figure (I-14) montre le résultat de ces calculs basés sur le modèle de Green [18] et Kiess [19].

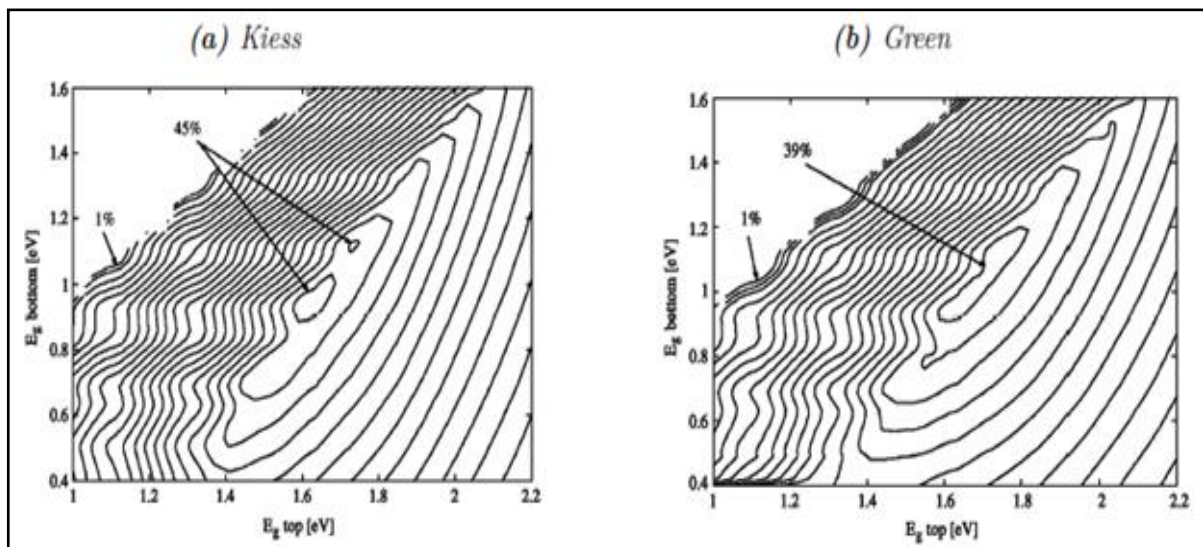


Figure I-14: Limite théorique du rendement d'une cellule tandem calculée selon le modèle de Kiess (a) et de Green (b). [20]

## **I.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base sur les matériaux semi-conducteurs et les mécanismes d'interaction photon-électron dans les semi-conducteurs ainsi que le spectre solaire, puis le principe de conversion photovoltaïque. Ensuite, nous avons décrit la cellule solaire et ses différents paramètres électriques (courant de court circuit, tension de circuit ouvert, facteur de forme, rendement et réponse spectrale). Enfin, nous avons présenté les limites théoriques des cellules solaires basées sur des travaux plus récents.

**Bibliographies du chapitre I**

- [1] N. SERVAGENT. Capteurs à semi-conducteurs et applications Physique des semi-conducteurs .disponible de: <http://www.optique-ingenieur.org> .
- [2] Henry Mathieu .Hervé Fanet \_Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques 6<sup>e</sup> édition © Dunod, Paris, 2009 ISBN 978-2-10-054134-8.
- [3] S. M. SZE, Physics of semiconductor Devices, 2<sup>ème</sup> édition , John Wiley & Sons, 1981.
- [4]A. Labouret et M. Viloz. Énergie solaire photovoltaïque. Dunod, 5<sup>ème</sup> édition, 2010.
- [5] <https://www.lenergiesolaire.be/> (Consulté le 17mars2019).
- [6] <http://www.planetoscope.com/solaire/856-chiffre-d-affaires-du-secteur-solaire-mondial.html>. (Consulté le 18 mars 2014).
- [7] Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule. Ed. Techniques ingénieur.
- [8] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, “A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power ,” J. Appl. Phys., vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954.
- [8] A. Labouret and M. Viloz. Energie solaire photovoltaïque - 4ème édition. Dunod, Octobre 2009. Google-Books-ID : PtaPEVAC9bgC.
- [9] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [10] Y. Veschetti, Modélisation , caractérisation et réalisation de nouvelles structures Photo-voltaïques sur substrat de silicium mince, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I. Octobre 2004.
- [11] Runhua Huang, «Conception, suivi de fabrication et caractérisation électrique de composants haute tension en SiC », docteur, école doctorale : électronique électrotechnique automatique, formation doctorale : génie électrique, l’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.
- [12] Emmanuel Gatard « Analyse des phénomènes physiques dans les diodes p-i-n : Contribution à la modélisation électrothermique pour les applications de puissance RF et hyperfréquences », Thèse de doctorat De L’université De Limoges,2006.



- [13] S. Quoizola, Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium méso poreux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût, Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2003.
- [14] L. Lui, N. Chen, Y. Wang, Y. Bai, M. Cui, F. Gao, Chinese Science Bulletin, vol. 54, no.3 (2009) 353-357.
- [15] S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt and R. Corkish, Applied Photovoltaics, Earthscan, London, UK (2012).
- [16] T Markvart, L Castañer - McEvoy's Handbook of Photovoltaics (Third Edition), Fundamentals and Applications, Elsevier (2017) 3-28.
- [17] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," J. Appl. Phys., vol. 32, p. 510, jun 1961.
- [18] M. A. Green, "Solar cells : Operating principles, technology, and system applications," Englewood Cliffs, 1982.
- [19] H. Kiess, "On the ultimate efficiency of solar cells," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 38, no. 1-4, pp. 45–55, 1995.
- [20] F. Meillaud, A. Shah, C. Droz, E. Vallat-Sauvain, and C. Miazza, "Efficiency limits for single-junction and tandem solar cells," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 90, no. 18-19, pp. 2952–2959, 2006.

---

CHAPITRE II  
NITRURE DE  
GALLIUM ET  
D'INDIUM

---

# Nitru de Gallium-Indium (InGaN)

## II.1 Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons l'alliage du Nitru de Gallium et d'Indium ( $In_xGa_{1-x}N$ ), l'axe de notre travail, composé des matériaux binaires GaN et InN qui appartient aux nitru de d'éléments III, c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne III.A du tableau de Mendeleïev représenté sur la figure II-1. Nous allons présenter leurs caractéristiques structurales, électriques et optiques puis leurs dopages N et P ainsi que sa croissance.

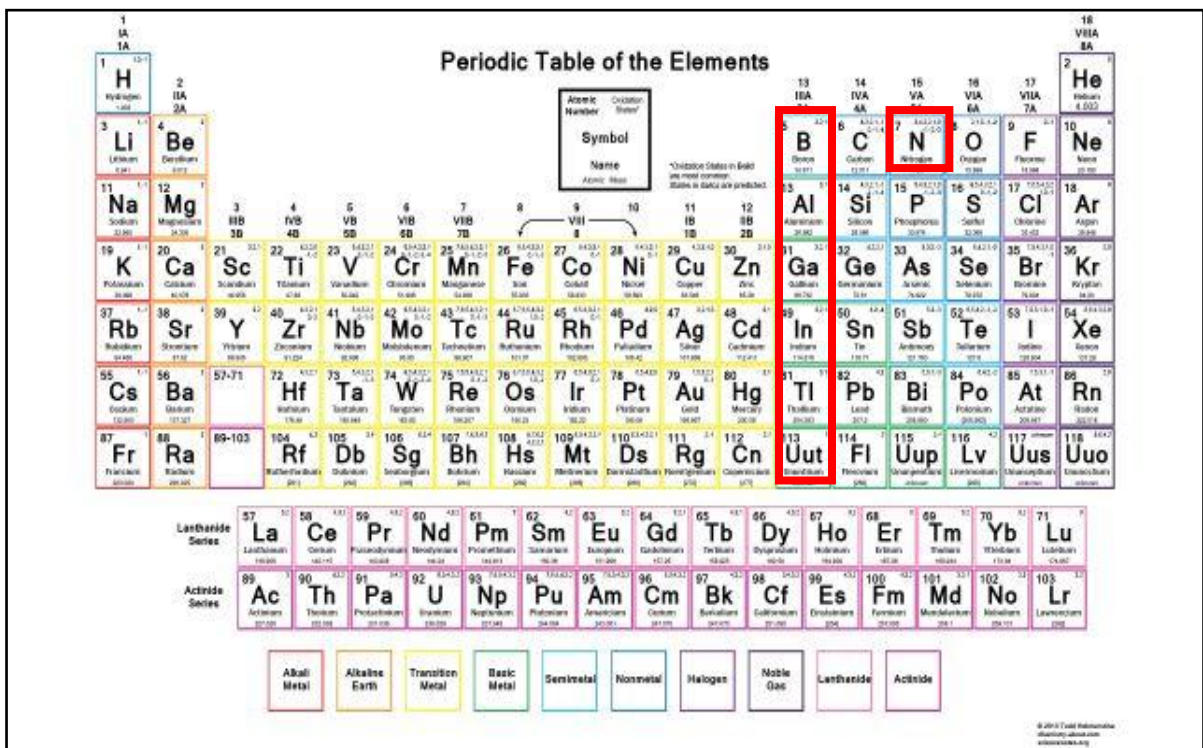


Figure II-1: Tableau de Mendeleïev. [1]

## II.2 Les nitru de-III

Les nitru de-III sont hâtivement étudiés parce qu'ils sont des semiconducteurs qui ont des propriétés remarquables : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance [2].

En 1932, Johnson et al. [3] avaient synthétisé le binaire GaN pour la première fois. En 1938, Juza et Hahn [4] déterminèrent sa structure cristalline comme étant la wurtzite dans les conditions normales de température et de pression. Depuis, le GaN fut largement,

étudié surtout dans les deux dernières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle, grâce à ses applications pour les diodes électroluminescentes et les détecteurs dans l'ultra violet (UV) [5,6].

Le binaire InN fut synthétisé, pour la première fois en 1972, par un procédé de pulvérisation radiofréquence. Malheureusement, les résultats obtenus ont montré que ce matériau avait une mobilité électronique très réduite. 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 [7]. Cependant, l'utilisation de la technique de dépôt chimique en phase vapeur a permis de produire des couches d'InGaN et AlInN améliorées au niveau de la luminescence. L'avancée majeure est venue d'échantillons fabriqués par épitaxie par jet moléculaire (MBE) présentant une bonne qualité cristalline [8,9], c'est-à-dire avec une faible concentration de porteurs libres (moins de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) et une grande mobilité électronique (plus de  $2.10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ). Le gap d'énergie du binaire InN à température ambiante convergea alors vers 0,64 eV [10]. Ce faible gap de nitrure d'indium dans l'infrarouge étend la couverture spectrale des nitrures qui couvrent maintenant de l'ultraviolet lointain avec l'AlN de 6.2 eV [11], à l'infrarouge moyen avec l'InN de 0.7 eV, en passant par l'ultraviolet proche avec le GaN de 3.39 eV et le visible avec les alliages InGaN ou AlInN [12].

Le ternaire InGaN était déposé, pour la première fois en 1972 par Osamura et al. [13] utilisant la technique de plasma à rayon d'électrons sur deux genres de substrat, le saphir et le quartz. Cependant, les couches produites étaient poly-cristallines et le gap d'énergie de l'InN fut mesuré à 1,95 eV laissant supposer que le matériau produit n'était pas de très bonne qualité. En 2002, Wu et al. [14] présentèrent des films de haute qualité cristalline et un gap pour l'InN à 0,77 eV. Ils déterminèrent alors la courbure de bande du gap de l'InGaN comme étant 1,43 eV. La croissance de l'InGaN étant maîtrisée dans les années 2000. Depuis, cet alliage est devenu un axe de recherche très important surtout dans le domaine de photovoltaïque. Aujourd'hui, les efforts de recherche se focalisent sur ses verrous, qui sont le substrat, le dopage de type P, la dislocation de phases dans les couches et les états de surfaces [15].

## II.3. Propriétés structurelles

### II.3.1 Structure cristalline

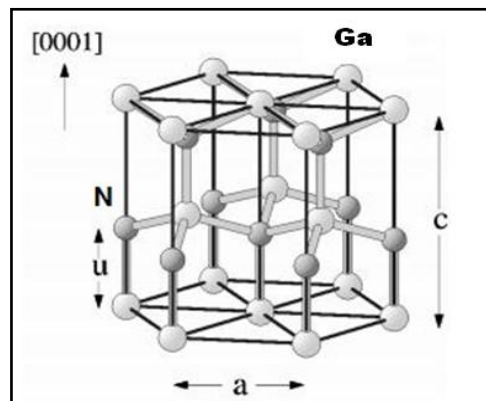
Les nitrures-III se cristallisent sous deux formes, soit en Wurtzite (WZ), soit en Zinc-blende (ZB), la première est une structure hexagonale stable dans les conditions

ambiantes, elle 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 occupés l'un par les atomes d'Azote et l'autre par les atomes de (Gallium ou Indium) selon l'axe  $c$  [16]. 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. Ces paramètres pour les deux binaires GaN et InN sont présentés dans le tableau II-1. Notons que les paramètres  $a$  et  $c$  sont mesurés expérimentalement et le paramètre  $u$  est déterminé à partir de simulations.

**Tableau II-1** : Paramètres structuraux  $a$ ,  $c$  et  $u$  pour le GaN et l'InN.

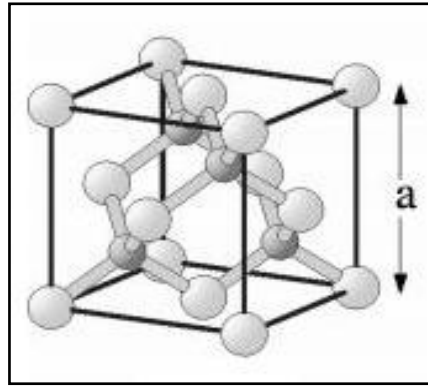
Matériau	$a$ (Å)	$c$ (Å)	$u$
	[17]	[17]	[18]
GaN	3.189	5.185	0.377
InN	3.54	5.70	0.378

Ces valeurs reviennent aux matériaux massifs et qu'elles peuvent différer en cas des couches épitaxiées à cause, surtout, de contraintes, de défauts et d'impuretés. La Figure II-2 illustre le GaN sous structure wurtzite.



**Figure II-2** : Structure wurtzite, exemple du GaN [19].

La deuxième structure des nitrures-III est la structure cubique (ZB: Zinc-Blende), il est possible de la faire croître sous certaines conditions de pression et de température et sur un substrat cubique. La structure zinc-blende, en prenant l'exemple du GaN, est présentée dans la Figure II-3.



**Figure II-3 :** Structure cubique zinc-blende exemple du GaN [19]

Notons que la structure cubique (ZB) présente théoriquement, par rapport à la structure hexagonale, de meilleures propriétés électriques comme une plus grande mobilité, des propriétés isotopiques (dues à sa symétrie cubique) et un fort gain optique. [20]

**Tableau II-2:** paramètre de maille cubique du GaN et InN.

Matériau	GaN	InN
$a$ (Å)	4.52 [16]	4.986 [16]

Les paramètres de maille d'alliage ternaires  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  peuvent être calculés selon la loi de Vegard qui relie la composition  $x$  d'Indium et les valeurs des paramètres de maille de leurs composés binaires correspondants:

$$a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x \cdot a_{\text{InN}} + (1 - x) \cdot a_{\text{GaN}} \quad (\text{II.1})$$

$$c_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x \cdot c_{\text{InN}} + (1 - x) \cdot c_{\text{GaN}} \quad (\text{II.2})$$

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

$a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}$ ,  $a_{\text{InN}}$  et  $a_{\text{GaN}}$ : paramètre de maille, en (Å), dans le plan des alliages  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , InN et GaN respectivement.

$c_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}$ ,  $c_{\text{InN}}$  et  $c_{\text{GaN}}$ : paramètre de maille, en (Å), hors du plan des alliages  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , InN et GaN respectivement.

Pour décrire une structure, on utilise l'espace réciproque qui correspond à l'espace des vecteurs d'onde décrivant la périodicité du réseau cristallin. Dans l'espace réciproque, la maille élémentaire de l'espace direct s'identifie à la première zone de Brillouin. Cette dernière peut être définie comme le volume délimité par des surfaces issues de l'ensemble des points équidistants de l'atome et de ses plus proches voisins. La figure II-4 montre la

zone de Brillouin pour une structure WZ et ZB. Certains points de haute symétrie revêtent un intérêt particulier, se sont les points critiques. Parmi ceux-ci, le centre de la zone de Brillouin est appelé le point  $\Gamma$  (Gama).

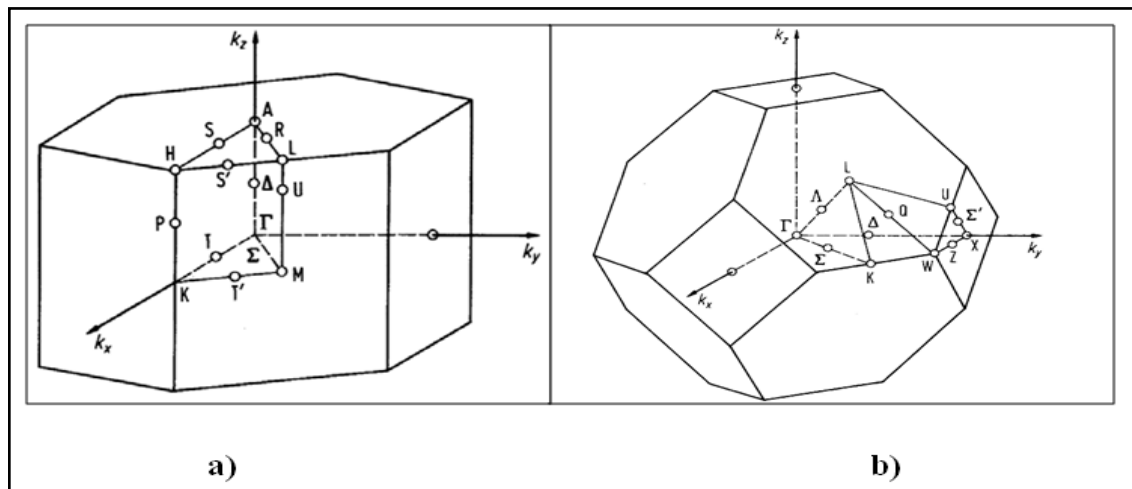


Figure II-4: La première zone de Brillouin pour une structure a) WZ b) ZB. [21]

### III.3.2 Polarité

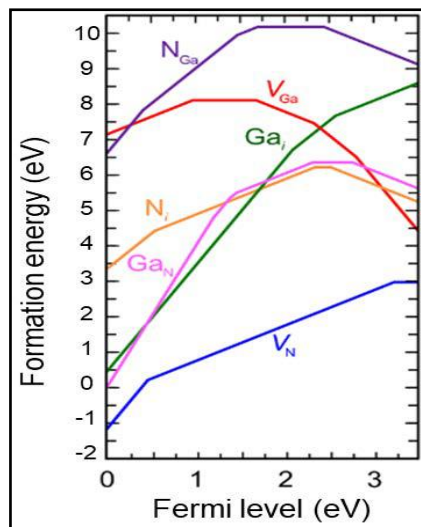
La polarité est une propriété structurale des nitrures dans la phase wurtzite. Cette structure est dite non centrosymétrique, c'est-à-dire que les barycentres de deux sous-réseaux ne se superposent pas, créant ainsi une polarisation interne (spontanée) et une polarisation piézoélectrique. La polarité de la couche dépend de plusieurs facteurs, notamment du substrat utilisé, des couches de nucléation ainsi que du mode de croissance. L'axe de croissance généralement choisi dans le cas des nitrures est perpendiculaire au plan de base [0001]. Prenant l'exemple de GaN, cette polarité étant définie par l'orientation des liaisons de l'atome de gallium. Dans le cas où ce dernier possède trois liaisons dans le sens opposé à celui de la croissance, le matériau est dit de polarité Ga. À l'inverse, le matériau est dit de polarité N.

### II.3.3 Défauts structuraux

L'évolution industrielle des composants à base de nitrures est bornée à cause de la grande densité de défauts structuraux, présente fréquemment dans les couches épitaxiées. Les défauts structuraux peuvent être rangés en deux catégories : les défauts ponctuels (lacunes, anti-sites, impuretés par substitution et défauts interstitiels) et les défauts étendus qui sont généralement des dislocations dues au substrat en désaccord de maille [22].

Des études réalisées par Lyons et al.[23] leur permettront à décrire Les propriétés des différents types de défauts (lacunes, défauts interstitiels, les anti-sites) présents dans le matériau InGaN ainsi que l'interaction entre les défauts et les impuretés. La figure II.5

représentant les courbes d'énergie de formation des différents défauts en fonction du niveau de Fermi dans les conditions de croissance riche gallium. Le niveau de Fermi égal à 0 eV représente le haut de la bande de valence (conditions de fort dopage P) et le niveau de Fermi situé à 3,4 eV (gap du GaN), représente le bas de la bande de conduction (conditions de fort dopage N). Ces résultats montrent que les lacunes d'azote ( $V_N$ ) sont statistiquement présentes dans GaN et que les lacunes de gallium sont plutôt présentes dans le cas d'un dopage P. En plus des défauts ponctuels, il apparaît dans InGaN, lors de la croissance du matériau, une forte concentration de dislocations due à l'utilisation de substrats fortement désaccordés.

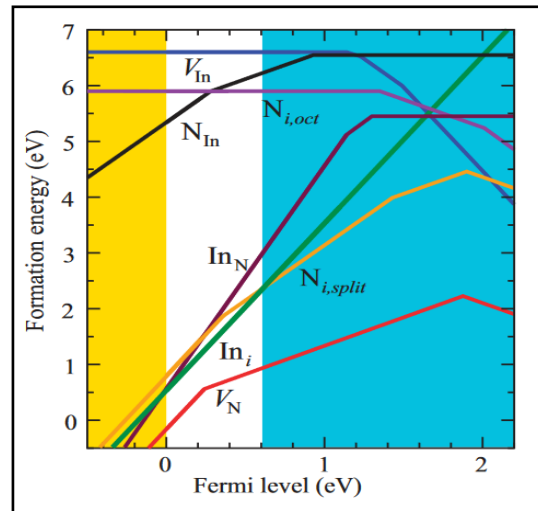


**Figure II-5:** Energie de formation des défauts natifs dans GaN sous conditions riches en azote en fonction du niveau de Fermi.  $E_F = 0$  correspond au maximum de la bande de valence [23].

Pour le binaire InN, des travaux sont réalisés par Janotti et al. [24]. Ils ont trouvé que les lacunes d'azote ( $V_N$ ) sont présentes, tout comme dans le binaire GaN, et qui sont majoritaires dans les couches InN de type P. Les autres défauts (les lacunes d'indium, les interstitiels, les anti-sites) possèdent des énergies de formations plus élevées et sont donc moins favorables dans InN.

Feng-Qi et al. [25] ont calculé les énergies de formations des défauts ponctuels dans InN de type wurtzite en considérant différentes conditions de croissance. Ils ont montré que dans les conditions riches en azote, ce sont les atomes d'azote interstitiels qui sont les plus favorables et dans les conditions riches en Indium les lacunes d'azote ( $V_N$ ) ont des énergies de formation bien plus faibles que les autres défauts.





**Figure II-6:** Energie de formation des défauts natifs dans InN sous conditions riches en indium en fonction du niveau de Fermi.  $E_F = 0$  correspond au maximum de la bande de valence [24].

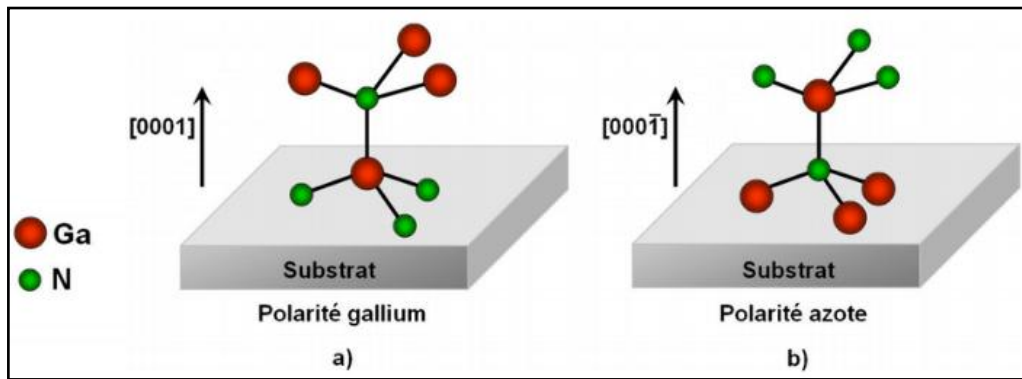
## II.4. Propriétés électriques

### II.4.1. Polarisation spontanée et piézoélectrique

Dans la structure wurtzite, l'absence de la superposition des barycentres des charges positives avec celui des charges négatives, possède des conséquences importantes sur les propriétés de polarisation. Dans les nitrures d'éléments III, deux types de polarisations sont observés, l'une existant à l'équilibre, la polarisation interne (spontanée) et l'autre sous l'action d'une contrainte extérieure, la polarisation piézoélectrique.

#### II.4.1.1 La polarisation spontanée

La polarisation interne sépare spatialement les électrons et les trous, ce qui va créer une accumulation de charge aux extrémités de la couche perpendiculairement à l'axe  $c$  (interface substrat/couche epitaxiée ou surface de la couche epitaxiée). Cette accumulation de charges peut changer les propriétés électriques et la réactivité du matériau. Il est donc important de connaître le sens de cette polarisation afin de pouvoir la contrôler. Ceci est possible avec le procédé de croissance. En effet, si la première couche atomique déposée est composée d'azote, alors la dernière sera composée d'atomes de gallium (exemple de GaN). On aura ainsi un excès de trous à la surface. Cette configuration est appelée polarisation Ga et la direction de croissance sera  $[0001]$ . Inversement, si la première couche est composée de gallium, la dernière sera composée d'azote et présentera donc un excès d'électrons [26]. On aura alors une polarisation N et l'axe de croissance sera  $[000\bar{1}]$ , comme le montre la Figure II-7.



**Figure II-7:** Illustration schématique de la polarité dite Ga-face (à gauche) et la polarité dite N-face (à droite) pour le GaN [27].

Le traitement de surface avant la croissance, le procédé de croissance et la conception du composant sont donc très importants pour orienter la polarisation dans la direction désirée. La polarisation spontanée peut également interagir dans le comportement d'un composant. Par exemple, si le champ associé à la polarisation du matériau sépare spatialement les électrons et les trous, réduisant ainsi la probabilité de recombinaisons radiatives, la polarisation va améliorer les performances du composant [28]. Au contraire, une mauvaise conception peut dégrader les performances, par exemple, si le champ électrique créé par la polarisation est opposé à la direction des porteurs (les électrons sont alors « bloqués » dans le matériau P et les trous dans le matériau N, le courant collecté est donc réduit). Cette polarisation spontanée pour l'alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  est calculée par la loi de Vegard en fonction de la composition d'indium [26]:

$$P_{sp}^{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x \cdot P_{sp}^{\text{InN}} + (1 - x) \cdot P_{sp}^{\text{GaN}} - b \cdot x \cdot (1 - x) \quad (\text{II.3})$$

Où  $x$  est la composition d'indium

$b$  est le paramètre de courbure

$P_{sp}^{\text{InN}}$  et  $P_{sp}^{\text{GaN}}$  sont les polarisations spontanées d'InN et de GaN respectivement.

Le Tableau II.3 regroupe les valeurs données à ces paramètres dans la littérature. Notons que Bernardini et Fiorentini ont rapporté un paramètre de courbure de  $b = 0,037 \text{ C.m}^{-2}$  pour l'InGaN [29].

**Tableau II-3:** polarisation spontanée du GaN et InN données dans la littérature.

Matériau	GaN		InN	
$P_{sp}$	-0,029 [26]	-0,034 [29]	-0,032 [26]	-0,042 [29]

### II.4.1.2. La polarisation piézoélectrique

Les nitrures-III possèdent également un caractère piézoélectrique qui est défini comme la création d'un champ électrique suite à une déformation mécanique, et réciproquement comme la création de déformations mécaniques lorsqu'on applique un champ électrique à un matériau. Ceci est dû au manque de symétrie dans la structure cristalline, à la nature fortement ionique des liaisons chimiques et aux déformations présentes dans le cristal (dues au désaccord de maille entre le matériau et le substrat, par exemple) [20]. Cette polarisation piézoélectrique n'est pas orientée forcément dans la même direction que la polarisation spontanée. Elle dépend des propriétés du matériau, elle peut s'exprimer sous la formule suivante [26]:

$$P_{pz} = e_{33}\epsilon_3 + e_{31}(\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (\text{II.4})$$

Avec

$e_{33}$  et  $e_{31}$  les coefficients piézoélectriques du matériau [ $\text{C.m}^{-2}$ ], ces coefficients pour le GaN et l'InN donnés dans la littérature sont regroupés dans le tableau II-4.

$\epsilon_1$  est la déformation dans le plan (supposée isotopique), définie par:

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = (a - a_0)/a_0 \quad [\text{sans dimension (s.d.)}]$$

$\epsilon_3$  représente la déformation selon l'axe c, définie par:  $\epsilon_3 = (c - c_0)/c_0$  [s.d.]

$a_0$  et  $c_0$  sont les paramètres de maille à l'équilibre [ $\text{\AA}$ ]

**Tableau II-4:** Les coefficients piézoélectriques du GaN et InN

Matériau	GaN		InN
$e_{31}$	-0,49 [26]	-0,49 [26]	-0,57 [26]
$e_{33}$	-0,73 [26, 30]		-0,97 [26]

De même que pour la polarisation interne, la polarisation piézoélectrique dans les couches va créer des électrons et des trous qui vont s'accumuler aux surfaces perpendiculaires à la polarisation piézoélectrique. En fonction de la déformation subie et de l'orientation de la

polarisation spontanée, ces charges peuvent s'additionner ou se soustraire aux charges produites par la polarisation spontanée.

Pour l'alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , la polarisation piézoélectrique ( $P_{pz}$ ) est estimée avec la relation linéaire suivante [26]:

$$P_{pz}^{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x \cdot P_{pz}^{\text{InN}} + (1 - x) \cdot P_{pz}^{\text{GaN}} \quad (\text{II.5})$$

Avec  $x$  est la concentration d'Indium.

$P_{pz}^{\text{InN}}$  et  $P_{pz}^{\text{GaN}}$  sont les polarisations piézoélectriques d'InN et de GaN respectivement.

### II.4.1.3. Polarisation totale

En l'absence d'une polarisation externe, la polarisation  $P$  des matériaux à structure wurtzite possède deux composantes, la polarisation interne (ou spontanée)  $P_{sp}$ , et la polarisation piézoélectrique  $P_{pz}$  induite par les déformations présentes dans le matériau.

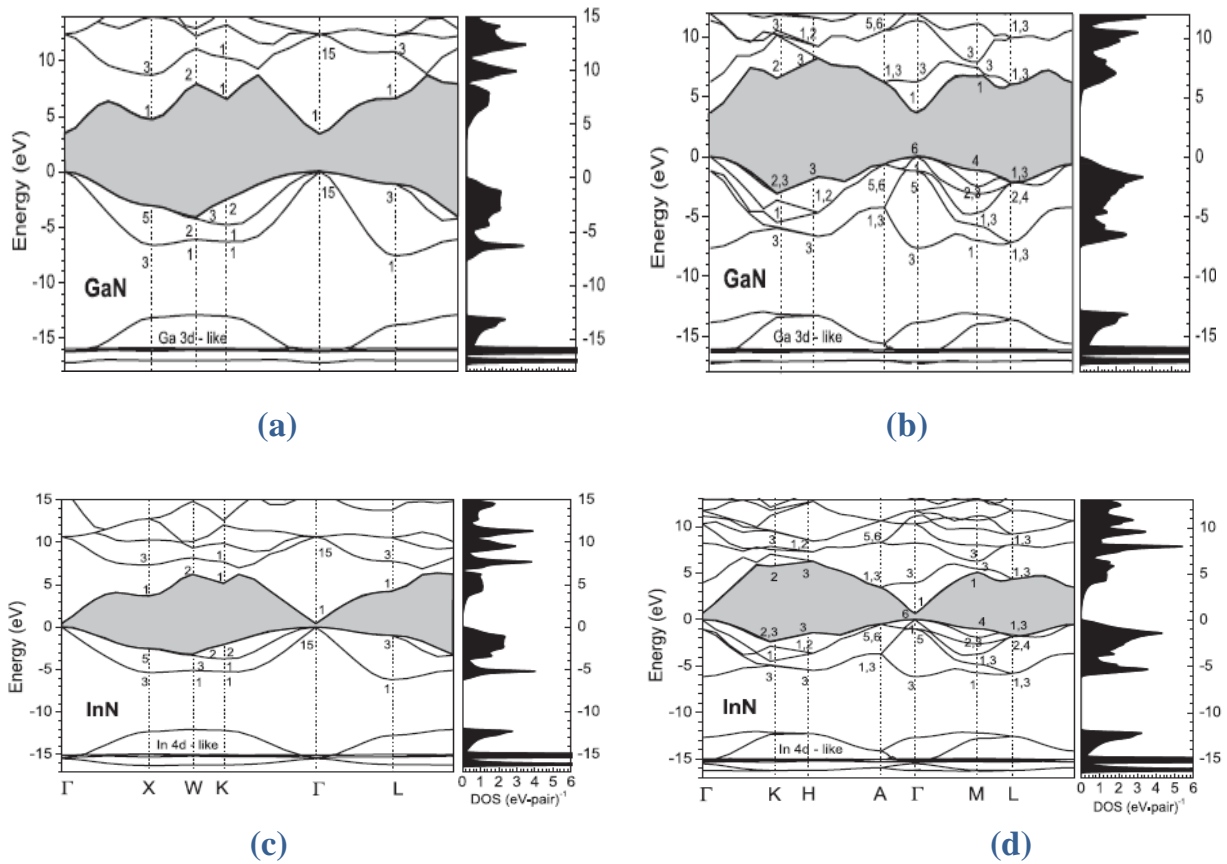
$$\vec{P} = \vec{P}_{sp} + \vec{P}_{pz} \quad (\text{II.6})$$

Elle peut être positive ou négative et son orientation est elle-même définie selon que la structure est en tension ou en compression. En effet, dans le cas où le cristal est en tension, la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique sont de même sens et la polarisation totale augmente. Par contre, si le cristal est en compression, les deux polarisations sont de sens opposés et la polarisation totale diminue.

### II.4.2. Structure de bande d'énergie

Du fait de l'anisotropie de la structure wurtzite et du couplage spin-orbite, le sommet de la bande de valence du GaN est séparé en trois niveaux d'énergie comme on peut le remarquer sur la figure II-8. Cette division résulte de l'énergie due aux interactions spin-orbitales,  $E_{SO}$ , et au champ électrique cristallin,  $E_{Cr}$ . De la même façon, la bande de valence de l'InN présente trois niveaux d'énergie pour ce binaire.

La partie droite représente la densité d'états du GaN et du InN sans l'interaction spin-orbite, Les nombres indiquent les points de haute symétrie en utilisant la notation de Rashba [32]. Le maximum de la bande de valence est pris comme le 0 (zéro) des énergies. Le gap d'énergie interdite correspond à la partie grisée [31].



**Figure II-8 :** Diagramme de bande calculé à partir de la théorie de structure électronique des quasi-particules. a) ZB - GaN, b) WZ – GaN c) ZB - InN et d) WZ - InN [31].

### II.4.3. Les propriétés électriques

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.

#### II.4.3.1 Densité d'état d'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

La densité d'état de l'alliage InGaN pour la bande de conduction et la bande de valence est donnée par les équations suivantes [33]:

$$N_C = [0,9 \cdot x + (1 - x) \cdot 2,3] \cdot 10^{18} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (\text{II.7})$$

$$N_v = [5,3 \cdot x + (1 - x) \cdot 1,8] \cdot 10^{19} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (\text{II.8})$$

Où  $x$  est la concentration d'Indium.

### II.4.3.2 Gap d'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Le gap  $Eg_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}$  de l'alliage ternaire peut aussi s'exprimer selon la loi de Vegard [34]:

$$Eg_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x.Eg_{\text{InN}} + (1 - x).Eg_{\text{GaN}} \quad (\text{II.9})$$

avec  $Eg_{\text{InN}}$  et  $Eg_{\text{GaN}}$  gap de l'InN et GaN respectivement en (eV).

Cependant, beaucoup travaux furent démontré qu'il y'a une certaine déviation entres les valeurs trouvées expérimentalement et celles de la théorie à cause de différents facteurs tel que la taille, le volume, le gap ou la différence électrochimique des éléments constituants l'alliage. Ainsi l'équation caractéristique  $Eg(\text{InGaN}) = f(x)$  de Vegard s'écrira sous la nouvelle forme suivante [33]:

$$Eg_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x.Eg_{\text{InN}} + (1 - x).Eg_{\text{GaN}} + b.x(1 - x) \quad (\text{II.10})$$

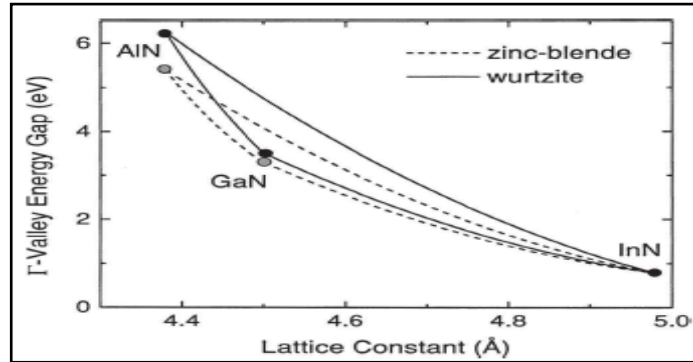
D'où  $b$  [eV] est une constante introduite dans l'équation afin d'apporter une adéquation avec l'expérimentation appelée paramètre de courbure. Les valeurs du paramètre de courbure reportées dans la littérature sont regroupées dans le tableau II-5. Ces valeurs montrent une disparité relativement importante (entre 1,4 et 2,8eV). Il est possible d'attribuer ces variations à plusieurs facteurs tels que la valeur théorique utilisée du gap de InN, l'état de contrainte de la couche ou encore la méthode de mesure de la valeur du gap de l'InGaN,....

**Tableau II-5:** Valeur du paramètre de courbure reporté par différents groupes en fonction de l'épaisseur de la couche, la composition en indium ou l'état de contrainte de la couche.

Technique	Épaisseur d(nm)	Composition d'indium $x$	Eg	b(eV)	État de contrainte	Croissance	Références
XRD	1500	0-0,4	PL OA	2,62 2,59	N.A	MOVPE	Islam 2012 [35]
XRD	N.A.	0-0,1	PL	2,8	N.A	MOVPE	Moret 2009 [36]
XRD	250	$0,61 < x < 1,0$	PL	1,8	Relaxé	MBE	Kurouchi 2004 [37]
N.A	200-7500	0-0,5	OA	1,4	N.A	MBE	Wu 2003 [38]

*Note sur les abréviations* : XRD : diffraction des rayons-X, SIMS : Spectrométrie de masse des ions secondaires, PL : photoluminescence, OT : transmission optique, OA : absorption optique, PR : photoréflexion, MOCVD (MOVPE) : épitaxie en phase vapeur aux organométalliques, MBE : épitaxie par jets moléculaires, N.A: indisponible.

La figure II-9 illustre la Bande interdite en fonction de paramètre de maille des alliages III-N sous les deux structures ZB et WZ.



**Figure II-9:** Bande interdite en fonction de paramètre de maille des alliages III-N [29]

Tandis que le gap d'énergie interdite dépend généralement de plusieurs facteurs physiques comme la température et la pression, donc il est nécessaire de rappeler son évolution en fonction de la température, qui est donnée par l'expression de Varshni suivante [40]:

$$Eg(T) = Eg(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta} \quad (II.11)$$

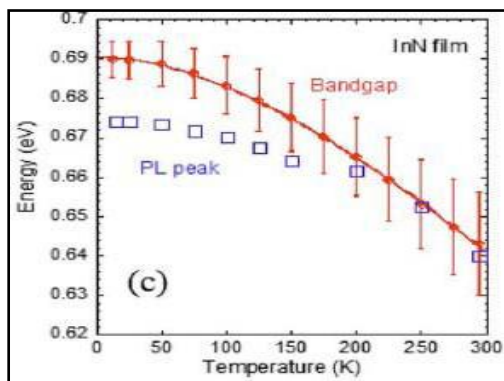
Avec:

$Eg(T)$  gap du matériau à une température donnée [eV].

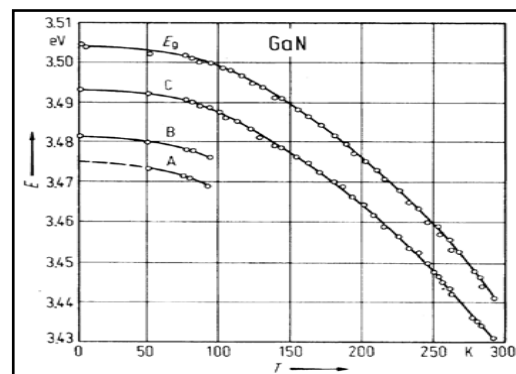
$Eg(0)$  gap du matériau à 0K [eV] ;  $\alpha$  une constante empirique [eV/K<sup>-1</sup>].

$\beta$  une constante associée à la température de Debye [K] ; T température en [K].

Les paramètres  $Eg(0)$ ,  $a$  et  $b$  sont rassemblés dans le tableau II-6 dans le cas du GaN et de l'InN. Les figures II-10 et II-11 présentent la variation des gaps du GaN et de l'InN en fonction de la température.



**Figure II-10:** Evolution du gap du GaN en fonction de la température [41].



**Figure II-11:** Evolution du gap de l'InN en fonction de la température. Les courbes A, B et C font référence aux excitons du même nom [42]

Lors du dépôt de cet alliage sur un autre substrat par la technique d'épitaxie, les paramètres de ce dernier vont influencer l'évolution du gap de l'alliage utilisé à cause du changement créé sur la structure de la couche épitaxiée. Cela est dû à une différence de coefficient d'expansion qui va entraîner une dépendance du gap en fonction de la pression, exprimé par l'équation [43]:

$$Eg(P) = Eg(0).g.P + d.P^2 \quad (\text{II.12})$$

Où:

$Eg(P)$  : Gap d'énergie de l'alliage en fonction de la pression (eV).

$g, d$  : Coefficients de pression (eV/kbar).

$P$  : Pression (Kbar).

Dans les tableaux suivant, on va présenter quelque valeurs de gap d'énergie rapporter par la littérature pour les matériaux GaN et InN sous différentes conditions de température et de pression :

**Tableau II-6:** Evolution du gap de GaN et InN en fonction de la température [44].

	Matériau	$\alpha(eV.K^{-1})$	$\beta(K)$	$Eg(0K)$ (eV)	$Eg(300K)$ (eV)
Vurgaftman	GaN	0.909	830	3.51	3.44
Mayer	InN	0.245	624	0.78	0.75
Bourgov	GaN	0.77	600	3.47	3.39
Wu	InN	0.41	454	0.69	0.64

**Tableau II-7:** Evolution du gap de GaN et InN en fonction de la pression [44].

	Matériau	$g(eV/kbar)$	$d(eV/kbar)$	$Eg(0K)$ (eV)	$Eg(300K)$ (eV)
Morkoç	GaN	4.2	$-1.8 \cdot 10^{-2}$	3.44	3.52
Wei et Zunger	InN	2.1	0	0.75	0.77



### II.4.3.2 Longueur de diffusion

La longueur de diffusion des porteurs, autrement dit la durée de vie des porteurs minoritaires dans le matériau, sert à optimiser les procédés de fabrication des composants électroniques spécialement dans le domaine du photovoltaïque. Physiquement, elle est décrite comme la distance moyenne du parcours de diffusion des porteurs dans le matériau avant sa recombinaison avec un porteur majoritaire. Elle est exprimée par l'équation [45]

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$\tau$  : Temps de vie des porteurs (s)

D : Coefficient de diffusion ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Où:

$$D = \frac{k.T}{q} \mu \quad (\text{II.14})$$

$\mu$ : Mobilité des porteurs ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

k : constante de Boltzmann.

T : température.

q : charge de l'électron.

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.

### II.4.3.3 Mécanisme de recombinaison

Le mécanisme de recombinaison électro-trou peut se faire généralement de trois différentes façons, soit par transition de bande à bande de façon radiative (transition directe), soit de façon non radiative (transition indirectes) par la recombinaison Auger ou bien par la recombinaison assistée par piège, appelé aussi recombinaison Shokley-Read-Hall. Le taux de recombinaison est donné par [34, 46]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{défaut}}} + \frac{1}{\tau_{\text{radiatif}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}} = \sigma \cdot \bar{v} \cdot N_{\text{défaut}} + B_{\text{radiatif}} \cdot n + B_{\text{Auger}} \cdot n^2 \quad (\text{II.15})$$

Avec  $\sigma$  la section efficace de capture [ $\text{cm}^2$ ]

$\bar{v}$  la vitesse moyenne des porteurs libres [ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

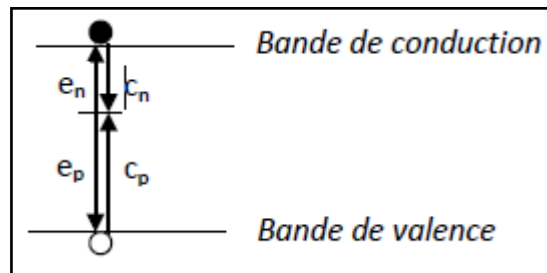
$N_{\text{défaut}}$  la densité de défauts [ $\text{cm}^{-3}$ ]

$n$  la densité d'électrons libres [ $\text{cm}^{-3}$ ]

$B_{\text{radiatif}}$  et  $B_{\text{Auger}}$  des constantes qui dépendent du matériau [ $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et  $\text{cm}^6\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivement]

### II.4.3.3.1 Recombinaisons Shockley-Read-Hall

Le mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) se fait par l'intermédiaire d'un défaut dans le gap (défauts structuraux, impuretés, etc.) qui peut être un centre recombinant pour les porteurs libres. Selon le niveau énergétique introduit par le défaut dans le gap et la section efficace de capture de ce défaut, un type de porteur peut être plus facilement capturé qu'un autre. A noter que le phénomène inverse existe également où un trou ou un électron peuvent être émis. La Figure II-12 présente ces phénomènes de recombinaison avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous. La probabilité d'occupation du défaut dépend du niveau de Fermi,  $E_F$  [46,47].



**Figure II-12:** Schéma de la recombinaison Shockley-Read-Hall avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous.

Ce type de recombinaison est très probable dans les matériaux possédant une forte densité de défauts, ce qui est le cas des nitrures.

### II.4.3.3.2 Recombinaisons radiatives

La recombinaison radiative par transitions inter-bande, ou bande-à-bande, correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence avec émission d'un photon, voir Figure II-13. L'énergie du photon émis correspondra à l'énergie du gap d'énergie interdite du matériau.

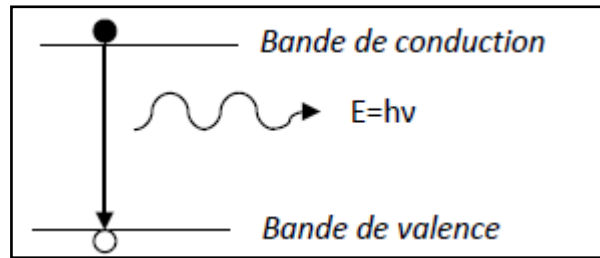


Figure II-13: Schéma de la recombinaison radiative.

Ce type de recombinaison est fréquent dans les matériaux à gap direct. A noter qu'il est à la base de la photoluminescence et des LEDs.

### II.4.3.3 Recombinaisons Auger

Lors d'une recombinaison Auger, un électron et un trou se recombinent en transférant leur énergie cinétique à une autre charge libre (électron ou trou). La Figure II-14 explique ce mécanisme de recombinaison dans le cas d'un transfert à un électron [46,47].

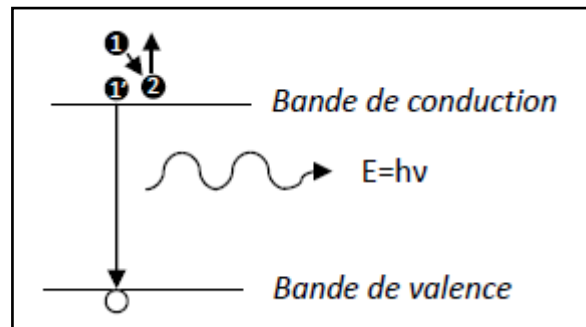


Figure II-14: Schéma de la recombinaison Auger.

L'électron (1) transfère son énergie cinétique à l'électron (2). Ce dernier a donc une énergie plus grande. L'électron 1 se trouve alors en position (1') où il va se recombiner avec un trou en émettant un phonon d'énergie  $h\nu$ . Ce type de recombinaison est peu probable dans les matériaux à grand gap tels que le GaN ou l'InGaN riche en gallium.

## II.5. Propriétés thermiques

### II.5.1. Conductivité thermique :

La conductivité thermique  $k$  d'un matériau représente sa capacité à transférer une quantité de chaleur par unité de temps et par unité de surface sous un gradient de température. La résistance thermique noté  $R_{th}$  est inversement proportionnelle à la conductivité thermique :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi} \quad (\text{II.16})$$

Avec:

$\Delta T$  la différence de température en Kelvin (K)

$\Phi$  le flux résistance thermique de rayonnement en Watts [W]

### II.5.2. Expansion thermique :

Le coefficient d'expansion thermique (CET), nommé aussi  $\alpha$ , décrit la dilatation ou la contraction d'un réseau cristallin à cause d'une variation de température  $\Delta T$ . Dans le plan cristallin, Le coefficient d'expansion thermique (CET) est défini par :

$$\alpha_a = \frac{\Delta a}{\Delta T \cdot a} \quad \text{et} \quad \alpha_c = \frac{\Delta c}{\Delta T \cdot c} \quad (\text{II.17})$$

Avec:

$\Delta a$  et  $\Delta c$  : variation des paramètres de maille suite à une variation de température dans le plan et perpendiculairement au plan [ $\text{\AA}$ ]

$\Delta T$  la variation de température [K].

De plus, le CET dépend également de la stœchiométrie, des défauts étendus, et de la concentration de charges libres dans le matériau. Les mesures effectuées sur la gamme de température 300-900 K indiquent que le coefficient d'expansion thermique moyen du GaN dans le plan est égal à  $\alpha_a = 5,59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , et perpendiculaire à  $\alpha_c = 3,17 \times 10^{-6}$  et  $7,75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  entre 300-700 K et 700-900K, respectivement [40]. La différence du TEC entre le matériau déposé et le substrat peut créer des contraintes lors du refroidissement de la structure à température ambiante après la croissance, entraînant la création de défauts (dislocations) et détériorant ainsi les performances du composant. Les principales propriétés thermiques sont rassemblées dans le Tableau II-8.

**Tableau II-8: Résumé des propriétés thermiques du GaN et de l'InN [44].**

	GaN	InN
Expansion thermique [s.d.]	$\Delta a/a = 5,59 \times 10^{-6}$ $\Delta c/c = 3,17 \times 10^{-6}$	$\Delta a/a = 2,85 \times 10^{-6}$ $\Delta c/c = 3,75 \times 10^{-6}$
Conductivité thermique, $\kappa$ [W.cm-1.K-1] à 300 °K	2,3	0,8
Température de Debye [K]	600	660
Température de fusion [K]	>1993 à 2kbar	1373

## II.6. Propriétés optiques

Les principales propriétés optiques d'un matériau sont le coefficient d'absorption et l'indice de réfraction. Ces deux propriétés sont déterminantes pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un dispositif composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. On peut alors confiner la lumière dans une couche particulière, comme c'est le cas pour les lasers. Cette propriété est aussi très intéressante pour les cellules solaires afin d'augmenter l'efficacité d'absorption de la lumière.

### II.6.1 Indice de réfraction

L'indice de réfraction  $n$  d'un matériau est défini par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide  $c$  sur la vitesse de la lumière dans le matériau  $v$  par :

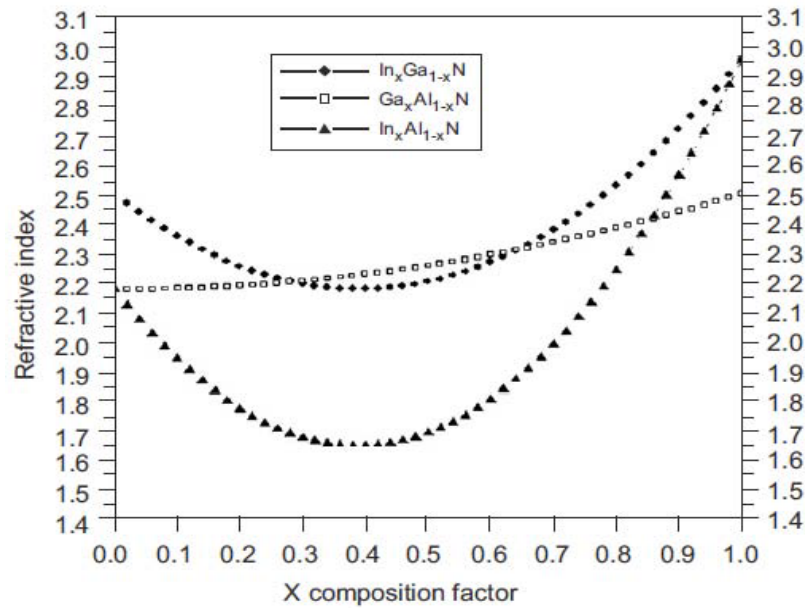
$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II.18})$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante car elle change avec la longueur d'onde  $\lambda$ . Dans le cas du GaN, l'indice de réfraction est égal à environ 2,3 [48], alors que pour l'InN il vaut environ 2,9 dans l'infrarouge [49]. Anani et al. [50] ont estimé expérimentalement la variation de l'indice de réfraction des alliages de nitrures d'éléments III en fonction de l'énergie d'un photon absorbé par le matériau:

$$E_g = \frac{h c}{\lambda} \quad (\text{II.19})$$

Avec  $h$  constante de Planck

Le tracé de l'indice de réfraction en fonction de la composition reporté sur la figure II-15 montre que l'équation qui relie ces valeurs est de type quadratique (existence d'un paramètre de courbure).



**Figure II-15:** Variation de l'indice de réfraction dans l'InGaN, l'AlGaN et l'InAlN [50].

Les coefficients de réflexion et de transmission sont déterminés à travers la relation de Snell-Descartes :

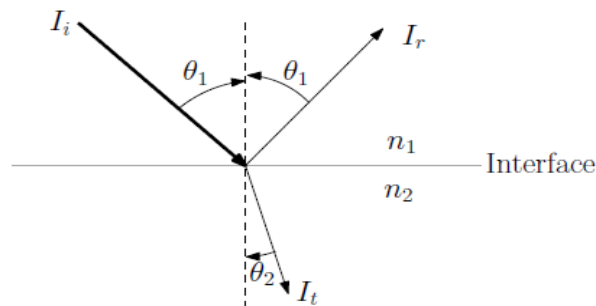
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$n_1$  et  $n_2$  les indices de réfractons de deux milieux [s.d].

$\theta_1$  et  $\theta_2$  les angles des rayons lumineux par rapport à la normale [ $^\circ$ ].

Le rayon incident arrive sur le dioptre avec un angle  $\theta_1$  par rapport à la normale. Une partie du rayon est réfléchié avec le même angle, l'autre partie du rayon est transmise avec un angle  $\theta_2$  par rapport à la normale. Si  $n_1 < n_2$ , donc  $\theta_1 > \theta_2$ , si  $n_1 > n_2$ , donc  $\theta_1 < \theta_2$ . La Figure II-16 représente le schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.



**Figure II-16 :** Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.

Le coefficient de réflexion,  $R$ , (transmission,  $T$ ) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchie,  $I_r$ , (transmise,  $I_t$ ) sur l'intensité incidente,  $I_i$  [51]:

$$R = \frac{I_r}{I_i} ; \quad T = \frac{I_t}{I_i} \quad (\text{II.21})$$

On a alors :

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \quad \text{et} \quad T = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (\text{II.22})$$

La permittivité relative  $\epsilon_r$  d'un matériau, aussi appelée constante diélectrique, décrit la réponse d'un matériau à un champ électrique appliqué et est définie par:

$$\epsilon_r = \chi \cdot \epsilon_0 \quad (\text{II.23})$$

Avec

$\chi$  la susceptibilité du matériau [s.d.].

$\epsilon_0$  la permittivité du vide [ $8,85 \times 10^{-12}$  F.m<sup>-1</sup>].

Elle est reliée à l'indice de réfraction par la relation :

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{II.24})$$

En introduisant la permittivité relative dans les coefficients de réflexion et de transmission, on obtient :

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad \text{et} \quad T = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (\text{II.25})$$

On considérant le dioptre air/GaN, on obtient un coefficient de réflexion de 39% et un coefficient de transmission de 61%. Des courbes expérimentales de transmission et réflexion d'un pseudo substrat de GaN (3,5µm sur saphir) sont présentées sur la figure II.17 [47]. Le seuil de transmission situé autour de 360nm correspond au gap du GaN.

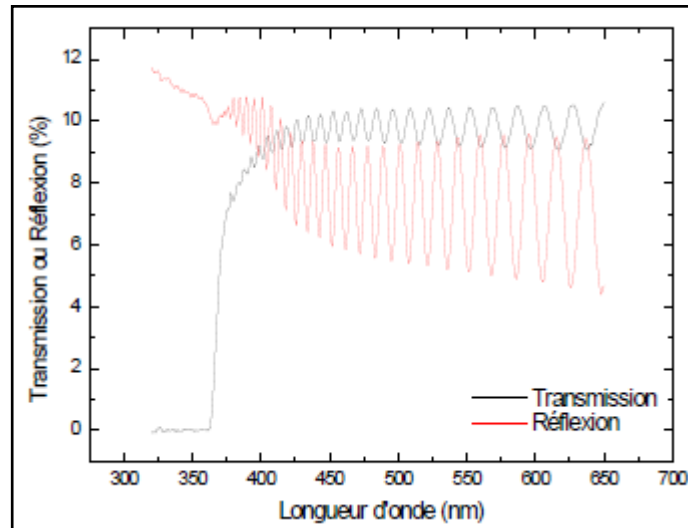


Figure II-17: Courbe de transmission et de réflexion du GaN. [47]

## II.6.2 Coefficient d'absorption

Pour les cellules solaires, le coefficient d'absorption est un paramètre très important puisqu'il va déterminer la quantité de photons absorbés par le matériau et donc la quantité de porteurs pouvant être produits. Donc pour la fabrication des cellules solaires, les matériaux avec de forts coefficients d'absorption sont au premier choix.

L'absorption à travers une couche de semi-conducteur d'épaisseur  $d$  peut être décrite par l'équation suivante [51]:

$$I_t(\lambda) = I_i(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)d} \quad (\text{II.26})$$

Avec

$I_i(\lambda)$  intensité incidente

$I_t(\lambda)$  intensité transmise

$\lambda$  longueur d'onde

$\alpha(\lambda)$  coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [ $\text{cm}^{-1}$ ]

Singh et al.[52] et Trainor et al. [53] ont rapportés un coefficient d'absorption de  $1.10^5 \text{ cm}^{-1}$  pour le GaN et  $5.10^4 \text{ cm}^{-1}$  pour l'InN.

Concernant l'alliage InGaN, Hori et al. [54] ont montré les variations des coefficients d'absorption dans InGaN pour différentes compositions d'indium illustrées sur figure II-18. Les études précédentes ont aussi montré que l'alliage InGaN a un coefficient d'absorption (de l'ordre de  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) dix fois plus élevé que celui du silicium monocristallin. Les



données présentées par ces auteurs dans toute la gamme de composition correspondent au modèle d'absorption suivant :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \cdot \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (\text{II.27})$$

Avec

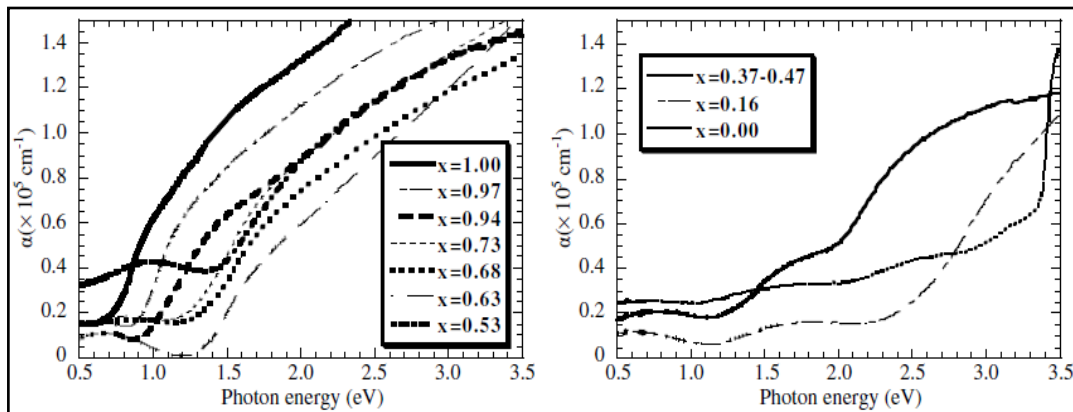
$\alpha(E)$  le coefficient d'absorption de l'alliage.

$E$  [eV] l'énergie des photons.

$E_g$  le gap [eV]

$\alpha_0$  paramètre d'ajustement [ $\text{eV}^{1/2}/\text{cm}^{-1}$ ]

La valeur moyenne de  $\alpha_0$  déduit à partir de ces études est de  $5 \cdot 10^5 \text{ eV}^{1/2}/\text{cm}^{-1}$ .



**Figure II-18:** Courbes d'absorption de couches d'InGaN élaborées avec différentes compositions d'Indium; a) avec des fortes concentrations d'Indium. b) avec des faibles concentrations d'Indium [54].

Ces études ont montré que l'alliage InGaN est un très bon absorbant de lumières grâce à ces propriétés optiques. D'ailleurs, il est un meilleur choix que le silicium (gap indirect) ou tout autre matériau semi-conducteur (gap direct) pour la réalisation d'une cellule solaire à couche mince. Par exemple, à une longueur d'onde de 500nm, il faudrait uniquement 100nm d' $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  contre  $1\mu\text{m}$  de silicium cristallin pour absorber 90% de l'intensité lumineuse [51].

## II.7 Dopage

Les cellules solaires comme quasiment tous les composants électroniques ont comme élément de base une jonction entre une couche de semi-conducteur de type P et une couche de semi-conducteur de type N (jonction PN). Il est donc important d'avoir de bons dopages

type N et P afin d'obtenir des dispositifs efficaces. Les études menées sur les nitrures (GaN, InN et InGaN) montrent une forte concentration d'électrons, généralement de l'ordre de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , leur donnant un caractère intrinsèquement de type N [15] [55]. Ceci est dû aux défauts structuraux, qui ont été proposés comme la principale source d'électrons dans InN, avec au premier rang les lacunes d'azote. [56]. En effet, d'après les calculs, ces dernières ont la plus faible énergie de formation dans GaN et InN [56]. Il a été également supposé que des impuretés comme l'oxygène, le carbone, etc. provenant des procédés de croissance participent au caractère de type N [15] [56] [57] [58]. Schaff *et al.* [55] ont montré que la concentration d'électrons dans InN est dépendante de l'épaisseur de la couche. En effet, la concentration des électrons suit la densité de défauts dus au désaccord de maille, qui diminue avec l'augmentation de l'épaisseur des couches. Ce caractère intrinsèque de type N dans les N-III fait que le dopage de type N est relativement facile à obtenir et que le dopage de type P est plus compliqué à atteindre.

### II.7.1 Dopage de type N

Le dopage de type N dans les nitrures est couramment réalisé avec le silicium. La solubilité du silicium dans le GaN par exemple, est de l'ordre de  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , il est donc adapté au dopage des nitrures, et le dopage N du GaN est actuellement bien maîtrisé.

### II.7.2 Dopage de type P

Le dopage de type P reste toujours un défi majeur pour le développement des nitrures. En effet, du fait du caractère intrinsèque de type N des nitrures (InN, GaN et InGaN), il faut dans un premier temps compenser les électrons en excès présents dans le matériau, avant d'arriver à créer un excès de trous [59]. Le dopage P est généralement obtenu en incorporant du magnésium(Mg) comme accepteur avec un procédé complexe d'activation à haute température. Les résultats expérimentaux donnent une valeur limite à l'incorporation du Mg de quelques  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dans le GaN hexagonal avec une concentration de trous plus faible du fait de la forte énergie d'activation des impuretés Mg. Au-delà, la morphologie est dégradée [60].

## II.8. Elaboration d'InGaN

La différence entre le paramètre de maille du GaN (3,19 Å) et celui de l'InN (3,54 Å) fait un désaccord de maille de 11% entre ces deux binaire [16]. Plusieurs études ont montré que le substrat, le plus convenable, dans la croissance de ces matériaux est le saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) avec lequel le GaN est en désaccord de maille de -16% et l'InN est en

désaccord de +29% [61]. En plus, le coefficient de dilatation thermique est différent entre ces matériaux et le saphir, ainsi qu'entre le GaN et l'InN [44]. Ce qui conduit à la naissance de défauts de dislocation durant la croissance à cause du désalignement des atomes. De plus, la différence de l'enthalpie de formation entre le GaN et l'InN entraîne une ségrégation d'indium vers la surface et induit une séparation de phase (formation des zones contenant différentes compositions d'indium). Ce qui entraîne une réduction en  $V_{co}$  par rapport à la valeur prévue. Le désaccord de maille accompagné de la ségrégation d'indium font qu'après une certaine épaisseur, dite épaisseur critique, la couche contrainte épitaxiée commence à se relaxer au travers des défauts de dislocation où l'indium s'accumule (formation des grains riches en In).

L'élaboration d'une couche massive d'InGaN reste un défi qui tarde le développement des cellules solaires à base de ce matériau. Actuellement, elle est déposée en film mince sur un substrat. En absence d'un substrat en accord de maille avec le matériau InGaN, la croissance épitaxiale de ce dernier à obliger l'utilisation d'une couche tampon pour ajuster les paramètres du substrat et de la couche d'InGaN déposée. Les substrats souvent utilisés sont le saphir ( $Al_2O_3$ ) et le carbure de silicium (SiC), avec une couche tampon de GaN ou d'AlN [62, 63]. Le tableau II.9 [64] résume les principales caractéristiques de ces substrats.

**Tableau II.9:** caractéristiques physiques des substrats utilisés pour la croissance du GaN.

	$Al_2O_3$	6H-SiC	GaN	AlN
Paramètre de maille en Å (à 300K)	4.76	3.08	3.19	3.1
Désaccord paramétrique /GaN	-16%	-3.4%	0%	-2.40%
Coeff. d'expansion thermique ( $10^{-6}/K$ )	5.8	4.46	5.6	2.9

Le nitrure d'aluminium a été aussi étudié pour la croissance d'InGaN. Pourtant, il est également très difficile à fabriquer en couches épaisses. Enfin, d'autres substrats comme le silicium [65] ou le verre pourraient être utilisés comme substrat pour des composants InGaN malgré leur structure très différente, grâce à leur faible coût et leurs diverses applications [47]. Tous ces substrats possèdent des paramètres de maille et des coefficients d'expansion thermique éloignés de ceux de la couche tampon de GaN, induisant ainsi une densité élevée de défauts structuraux qui sont principalement des dislocations qui impactent très fortement les performances d'une cellule solaire [51].

La croissance des nitrures-III, particulièrement le InGaN, se réalise par deux techniques d'épitaxie, l'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE) et l'épitaxie par jet

moléculaire (MBE). Cette dernière s'effectue sous un vide très poussé et consiste à envoyer les éléments qui constituent le matériau par jets de molécules sur un substrat chauffé. La technique MBE permet d'avoir de meilleures qualités cristallines, mais la croissance est beaucoup plus lente. C'est pour cela que la technique MOVPE est la plus utilisée pour la croissance des nitrure-III puisque elle possède de grandes vitesses de croissance. Cette technique consiste à déposer l'élément à épitaxie, sous forme d'organométallique sur le substrat par l'intermédiaire d'un gaz vecteur. Pour l'épitaxie des composés contenant du Gallium, comme GaN, la source organométallique utilisée le plus souvent est le triméthylegallium ( $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ ) avec l'hydrogène comme gaz vecteur [66].

## Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les propriétés structurales, électroniques, optiques et thermiques de l'InGaN. Nous avons vu que l'InGaN se caractérise par un gap direct pouvant varier de 0,77eV (gap de l'InN) à 3,4eV (gap du GaN) couvrant ainsi la totalité du spectre solaire et un coefficient d'absorption élevé. Cet alliage présente un fort potentiel pour la réalisation de cellules solaires. Cependant, qu'il connait plusieurs obstacles comme la grande densité de défauts, la concentration élevée d'électrons "un dopage de type N résiduel", la croissance difficile, le substrat, ... . Dans la suite, nous allons présenter l'état de l'art de la filière InGaN pour les cellules à simple jonction, les cellules tandem à hétérojonction et les cellules multijonctions.

## Bibliographie de chapitre II

- [1] <https://www.pinterest.fr>
- [2] I.Gorczyca, A.Svane et N.E. Christensen, Theory of point defects in GaN, AlN, and BN: Relaxation and pressure effects. *Physical Review B*. 1999, Vol. 60, 8147.
- [3] W.C.Johnson, J.B.Parson, et M.C.Crew, Nitrogen Compounds of Gallium-III. *Journal of Physical Chemistry*. 1932, Vol. 36, 2651.
- [4] R.Juzaa et H.Hahn, Über die Kristallstrukturen von Cu<sub>3</sub>N, GaN und InN Metallamide und Metallnitride. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. 1938, Vol. 239, 282.
- [5] I.Akasaki et al. Conductivity control of GaN and fabrication of UV/blue GaN light emitting devices. *Physica B: Condensed Matter*. 1993, Vol. 185, 428.
- [6] S.Zembutsu et M. Kobayashi, The growth of c-axis-oriented GaN films by D.C.-biased reactive sputtering. *Thin Solid Films*. 1985, Vol. 129, 289.
- [8] H. Lu et al. Effect of an AlN buffer layer on the epitaxial growth of InN by molecular-beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2001, Vol. 79, 1489.
- [9] Y. Nanishi, Y.Saito, et T.Yamaguchi, RF-Molecular beam epitaxy growth and properties of InN and related alloys. *Japanese Journal of Appl Phys*. 2003, Vol.42, 2549.
- [10] J.Wu et al. Temperature dependence of the fundamental band gap of InN. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 4457.
- [11] H. Morkoç, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. Vol.1.978-3-527-40837-5.
- [12] F.K. Yam et Z. Hassan, InGaN:An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms. *Superlattices and Microstructures*.2008, Vol.43, 1.
- [13] K. Osamura et al. Fundamental absorption egde in GaN, InN and their alloys. *Solid State Communications*. 1972, 617.
- [14] J.Wu et al. Small band gap bowing in In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>N alloys. *Applied Physics Letters*. 2002, Vol. 80, 4741.
- [15] J.Wu, When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 106, 011101.
- [16] S. Adachi. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* © 2009 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-74369-0
- [17] J.H.Edger, *Properties of Group III Nitrides*. Electronic Materials Information Service (EMIS) Data reviews Series. London : Institution of Electrical Engineers, 1994.
- [18] A.F Wright et J.S. Nelson, Explicit treatment of the gallium 3d electrons in GaN using the plane-wave pseudopotential method. *Physical Review B*. 1994, Vol. 50, 2159.
- [19] C. Stampfl et C. Van de Walle, *Physical Review B*.1999,Vol. 59, 5521.
- [20] L. Liu et J.H. Edgar, Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61.
- [21] Ioffe Physyco-Technical Institut. GaN - Gallium nitride. Electronic archive. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties. [Online] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/index.html>. [visité le: 05-10 2019]
- [22] K.Y. Fong, L. Low, A. Sue et H. Zainuriah, Gallium nitride : an overview of structural defects. In *Optoelectronics-Materials and Techniques*. In Tech, 2011. 30, 128

- [23] J. L. Lyons et C. G. Van de Walle. Computationally predicted energies and properties of defects in GaN. *NPJ Computational Materials*, 3:1, 2017.
- [24] A. Janotti, J. L. Lyons, and C. G. Van de Walle. Hybrid functional calculations of native point defects in InN. *physica status solidi (a)*, 209(1) :65–70, January 2012.
- [25] F. Zhao, J. Shi, et M. Yang, First-Principles Study on Native Defect Complexes in InN. *Communications in Theoretical Physics*, 53(1) :145, 2010.
- [26] F. Bernardini, V. Fiorentini et D. Vanderbilt, Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*. 1997, Vol. 56, R10024.
- [27] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu et M. Murphy, Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn / GaN heterostructures, 1999 vol. 85, no. 6, pp. 3222–3233,.
- [28] S. Mokkapati et C. Jagadish, III-V compound SC for optoelectronic devices. *Materials Today*. 2009, Vol. 12, 22.
- [29] I. Vurgaftman et J.R. Meyer, Band parameters for nitrogen-containing SC. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 3675.
- [30] K. Shimada, T. Sota et K. Suzuki, First-principles study on electronic and elastic properties of BN, AlN, and GaN. *Journal of Applied Physics*. 1998, Vol. 84, 4951.
- [31] C. L. de Carvalho, A. Schleife et F. Bechstedt, Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes. *Physical Review B*. 2011, Vol. 84, 195105.
- [32] E.I. Rashba, *Sov. Phys. Sol. State*. 1960, Vol. 2, 1109.
- [33] A. Mesrane, F. Rahmoune, A. Mahrane et A. Oulebsir, "Design and simulation of InGaIn p-n Junction Solar Cell," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2015
- [34] L. Vegard, "Die konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome," *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, vol. 5, pp. 17-26, 1921.
- [40] Y. P. Varshni, Temperature dependence of the energy gap in semiconductor. *Physica*. 1967.34 149-154
- [41] B. Monemar, Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra. *Physical Review B*. 1974, Vol. 10, 676.
- [42] J. Wu et al. Temperature dependence of the fundamental band gap of InN. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 4457.
- [43] I. Wu, W. Walukiewicz, K. Yu, I. Ager, S. Li, E. Haller, et al., "Universal bandgap bowing in group-III nitride alloys," *Solid State Communications*, vol. 127, pp. 411-414, 2003.
- [44] H. Morkoç, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Materials Properties, Physics and Growth* vol. 1: John Wiley & Sons, 2009.
- [45] Henry Mathieu .Hervé Fanet \_Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques 6e édition © Dunod, Paris, 2009 ISBN 978-2-10-054134-8.
- [46] M. Mimoune, *Etudes des capteurs PV basé les nanotechnologies*. Univ du Québec à Trois Rivières. 2016
- [47] V. George. *Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V*. Univ Paris-Sud 11, 2012.
- [48] GaN-Gallium nitride. *Electronic archive. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties*. Ioffe Physico-Technical Institute. [Online].

- [49] InN - Indium Nitride. New Semiconductor Materials. Characteristics and properties. Ioffe Physico-Technical Institute. [Online].
- [50] M. Anani et al. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N refractive index calculations. *Microelectronics Journal*. 2007, Vol. 38, 262.
- [51] Y. El Gmili. Étude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGa<sub>N</sub> pour le photovoltaïque. Univ de Lorraine. 2013.
- [52] R. Singh, D. Doppalapudi, T. D. Moustakas et L. T. Romano. Phase separation in InGa<sub>N</sub> thick films and formation of InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> double heterostructures in the entire alloy composition. *Applied Physics Letters*, 70(9) :1089–1091, 1997.
- [53] J. W. Trainor et K. Rose. Some properties of InN films prepared by reactive evaporation. *Journal of Electronic Materials*, 3 :821–828, 1974.
- [54] M. Hori, K. Kano, T. Yamaguchi, Y. Saito, T. Araki, Y. Nanishi, N. Teraguchi et A. Suzuki. Optical Properties of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N with Entire Alloy Composition on InN Buffer Layer Grown by RF-MBE. *Physica Status Solidi (b)*, 234(3) :750–754, 2002.
- [55] W.J. Schaff et al. 868, s.l. : *Physica Status Solidi B*, 2008, Vol. 245.
- [56] J. Neugebauer, et C. G. Van de Walle. Atomic geometry and electronic structure of native defects in GaN. *Physical Review B*. 1994, Vol. 50, 8067.
- [57] I. Gorczyca, A. Svane et N.E. Christensen, Theory of point defects in GaN, AlN, and BN: Relaxation and pressure effects. *Physical Review B*. 1999, Vol. 60, 8147.
- [58] C. Stampfl et al. Native defects and impurities in InN: First principles studies using the local-density approximation and self-interaction and relaxation-corrected pseudopotentials. *Physical Review B*. 2000, Vol. 61, 7846.
- [59] S. Hautakangas, J. Oila, M. Alatalo, K. Saarinen, L. Liskay, D. Seghier, et H. P. Gislason. Vacancy defects as compensating centers in Mg-doped GaN. *Physical review letters*, 90(13) :137402, 2003.
- [60] Ph. Agnès. Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus. PhD thesis, 1999.
- [61] A. G. Bhuiyan, K. Sugita, A. Hashimoto et A. Yamamoto, "InGa<sub>N</sub> solar cells : Present state of the art and important challenges," *IEEE J. Photovoltaics*, 2012.vol. 2, no. 3, pp. 276– 293,.
- [62] A. M. Fischer, Y. O. Wei, F. A. Ponce, M. Moseley, B. Gunning et W. A. Doolittle. Highly luminescent, high-indium-content InGa<sub>N</sub> film with uniform composition and full misfit-strain relaxation. *Applied Physics Letters*. 2013.103(13) :131101.
- [63] Chloe A.M. Fabien, Brendan P. Gunning, W. Alan Doolittle, Alec M. Fischer, Yong O. Wei, Hongen Xie, and Fernando A. Ponce. Low-temperature growth of InGa<sub>N</sub> films over the entire composition range by MBE. *Journal of Crystal Growth*, 425 :115–118, 2015. 00002.
- [64] E. Feltin. Hétéro-épitaxie de Nitrure de Gallium sur substrat de silicium (111) et applications. 2003. Google-Books-ID : HN87XwAACAAJ.
- [65] P. Aseev et al. Near-infrared emitting In-rich InGa<sub>N</sub> layers grown directly on Si : Towards the whole composition range. *Applied Physics Letters*, 106(7) :072102, 2015.
- [66] J.Y. Duboz. Matériaux semi-conducteurs à grand gap III-V à base de GaN. Ed. Techniques Ingénieur. 1999.

---

# CHAPITRE III

## ETAT DE L'ART DES CELLULES SOLAIRES A BASE DE InGaN

---



## Etat de l'art des Cellules solaires à base d'InGaN

### III.1. Introduction

Les cellules photovoltaïques présentant les plus hauts rendements, en simple et multijonctions, sont composées de matériaux III-V. L'un de ces matériaux est l'alliage InGaN, possède aussi un fort potentiel pour le photovoltaïque. L'avantage principal de ce dernier est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire. Cet alliage est encore l'objet d'un effort de recherche très important afin d'éliminer les contraintes technologiques et passer au stade de l'application industrielle. Dans ce chapitre, nous allons présenter les rendements records dans les différentes filières du photovoltaïque puis, un état de l'art des cellules solaires à base d'InGaN.

### III.2. Record de Filières photovoltaïques

La Figure III-1 présente les rendements record dans les différentes filières photovoltaïques.

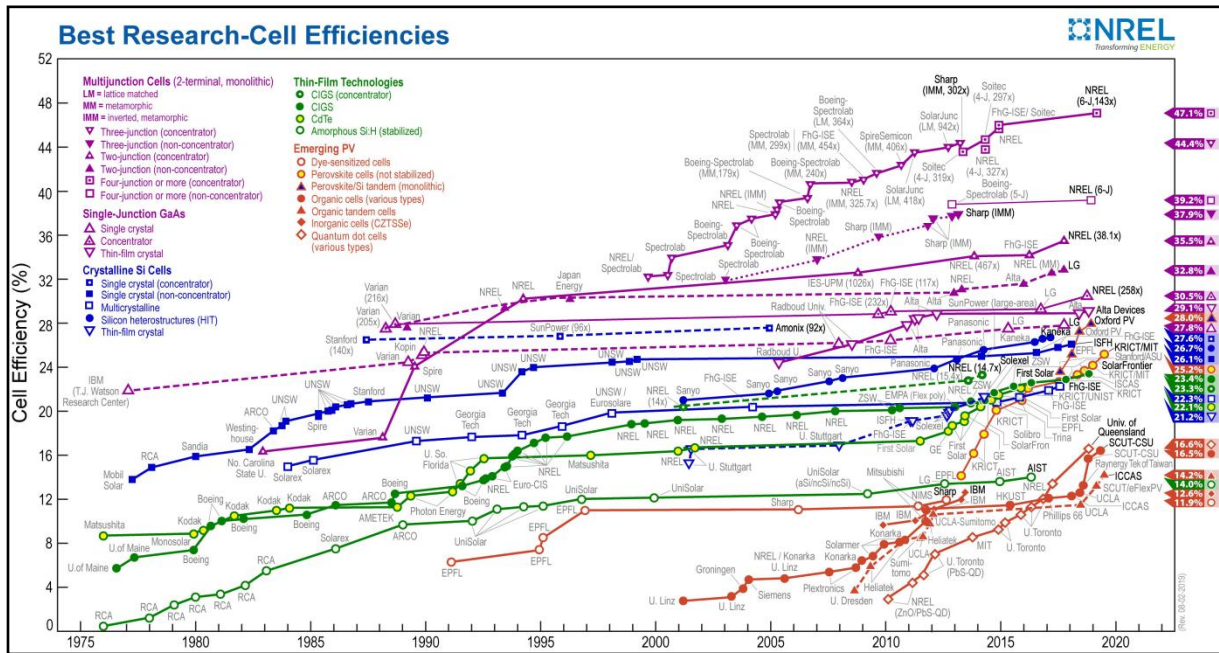


Figure III-1: Rendements de conversion record dans les différentes filières photovoltaïques (Blue : cellules solaires en Si cristallin, Violet: Multijonctions, Vert: couches minces et rouge: technologies émergentes) [1]

A ce jour, le record du monde est actuellement détenu par le NREL, en mars 2019, avec un rendement de 47,1% mesuré sur une cellule à six jonctions en AlGaInP/AlGaAs/ GaAs/(3) GaInAs (2.15/1.72/1.41/1.17/0.96/0.70 eV) de 0,099 cm<sup>2</sup> pour un taux de concentration de 143 X (irradiance directe de 942 kW/m<sup>2</sup>) [2]. Une cellule quadruple jonctions en

GaInP/GaAs;GaInAsP/GaInAs (de 0,0520 cm<sup>2</sup>) était développé par Soitec et le CEA-Leti, en France et l'institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire ISE en Allemagne, avec un rendement record de 46,0% pour un taux de concentration de 508 X [2]. Pour les cellules triple jonctions, le record mondial est actuellement détenu par la société sharp avec un rendement de 44,4% mesuré sur une cellule triple jonctions en InGaP/GaAs/InGaAs de 0,167 cm<sup>2</sup> pour un taux de concentration de 306 X depuis avril 2013 [3]. Cette technologie de cellules multijonctions à base de matériaux III-V présente depuis longtemps les plus hauts rendements. C'est pourquoi elle est aujourd'hui principalement utilisée pour l'alimentation des satellites. Pour les simples jonctions en matériau III-V, le plus haut rendement a été présenté avec le GaAs par l'institut pour les systèmes à énergie solaire de Fraunhofer (FhG-ISE), avec 29,1 % sous 117 soleils.

Le silicium, avec toutes ces filières, reste le dominant du marché des applications PV terrestres. La filière du silicium monocristallin a l'avantage de présenter les plus hauts rendements de conversion avec un record de 27,6 %, réalisé par l'entreprise Amonix sous 92 soleils. Leurs modules commerciaux présentent des rendements entre 12 et 18 %. Cependant, cette filière est la plus coûteuse des filières silicium. Le silicium polycristallin est le matériau le plus répandu pour les panneaux solaires commerciaux grâce à son faible coût et son rendement intéressant. Les rendements des modules commerciaux se situent entre 12 et 15 %. Au niveau de la recherche, le FhG-ISE a rapporté un rendement de 20,4 %.

La filière du silicium en couche mince possède les rendements les plus bas de la filière silicium avec 12,5 % en recherche, obtenu par United Solar et entre 6 et 9 % pour les modules commerciaux. Le silicium en couche mince est un film très fin (quelques centaines de nanomètres) de silicium amorphe hydrogéné formant une jonction P-i-N déposée sur un substrat de verre ou céramique. Malgré son faible rendement, cette technologie possède les coûts de fabrication les plus bas grâce à la faible quantité de matériau nécessaire et à son procédé de fabrication.

La filière des matériaux en couche mince est dominée par le Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, ou CIGS, avec un record à 23,35 % obtenu par Solar Frontier [3]. Depuis son arrivée sur le marché, cette filière est en pleine expansion. Elle présente, en effet, des performances équivalentes au silicium polycristallin avec un coût inférieur grâce à un dépôt rapide nécessitant peu d'énergie (par rapport au silicium polycristallin) et avec la possibilité de couvrir de grandes surfaces. Par ailleurs, les cellules en couches minces présentent un grand intérêt pour des applications photovoltaïques flexibles. Enfin, les cellules photovoltaïques émergentes se caractérisent par la plus haute augmentation de rendement sur ces dernières années. Elles sont

composées des cellules solaires organiques, des cellules à nanostructures et des cellules à colorant (les cellules en pérovskite). Au cours des dernières années, les cellules en pérovskite (Ces films cristallins minces sont fabriqués en mélangeant deux sels peu coûteux et très abondants pour former une encre pouvant être déposée de différentes manières) ont réussi à atteindre des rendements énergétiques proches de ceux des cellules traditionnelles à base de silicium. Cette technologie serait donc en passe de s'imposer au niveau mondial et révolutionner la filière photovoltaïque. En effet, à leurs débuts l'efficacité de ces cellules était de 3,8% et ce chiffre est aujourd'hui monté à 24,2% avec une cellule pérovskite, obtenu par l'institut Coréen de recherche en technologie chimique (KRICT) [3], soit le même ordre de grandeur que les panneaux photovoltaïques classiques.

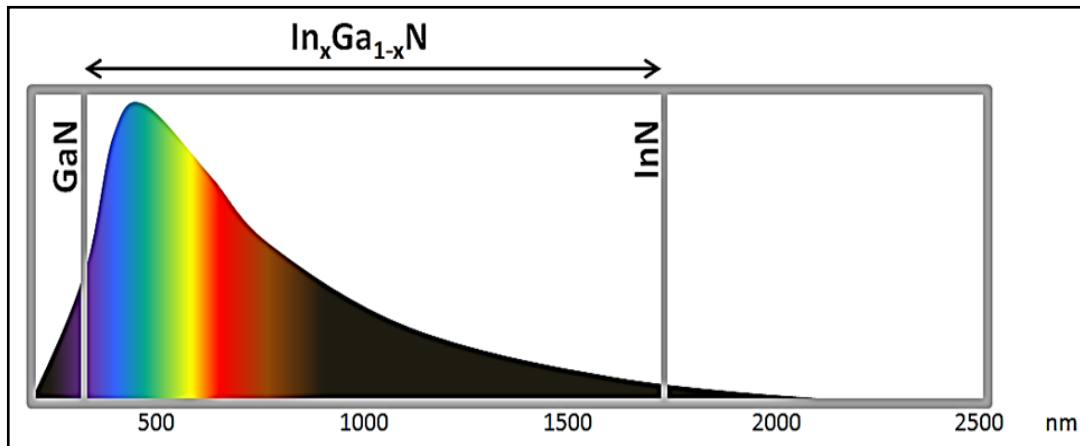
### III.3. Potentiel et défis d'InGaN pour le photovoltaïque

Le nitrure d'indium et de gallium (InGaN), comme nous l'avons présenté dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, est largement utilisé pour les lasers et les diodes électroluminescentes [4,5] et possède un potentiel particulièrement intéressant pour les cellules solaires en couches minces et haut rendement. Ce potentiel réside dans son absorption très élevée [6], sa résistance aux hautes températures et aux radiations [7] et sa largeur de bande interdite modulable pour s'adapter à quasiment tout le spectre solaire [8], comme illustré sur la figure III-2. Ce potentiel de l'InGaN pour le solaire est encore très loin d'être exploité, et les meilleurs rendements actuels sont encore très faibles [10]. Cela est dû notamment à la difficulté d'atteindre les objectifs suivants, les plus concluants :

- ◆ L'élaboration des couches d'InGaN de haute qualité, épaisses et dans une très large gamme de composition d'indium. Les problèmes à résoudre sont liés à la présence de dislocations, la séparation de phase et la densité importante de défauts structuraux [11, 12, 13].
- ◆ Maîtriser le dopage P dont la difficulté est liée à la présence de dopants résiduels, comme pour le BGaN, et au manque de dopants P actifs dans les conditions standards [14,15]. Le magnésium, le dopant P standard des matériaux III-N, nécessite l'utilisation de procédés complexes d'activation à haute température et à un impact sur la qualité des couches.
- ◆ La réalisation des contacts métalliques de qualité, étape aussi essentielle que difficile dans le cas de l'InGaN, à l'instar des autres matériaux III-N [16]. Les procédés sont relativement complexes et devront, dans ce cas, être maîtrisés pour l'InGaN dans une large gamme de composition d'indium.

- ◆ Contrôler l'impact des polarisations piézoélectrique et spontanée dont l'effet est important dans ces matériaux à structure wurtzite [17] et qui, le plus souvent, dégraderont les performances des cellules solaires.

Pour atteindre ces objectifs, ou plus précisément relever ces défis, le travail expérimental rigoureux et méticuleux doit nécessairement être couplé avec un travail de modélisation et de simulation numérique rigoureuse et réaliste. L'objectif est doublé. D'une part, étudier, en utilisant les théories physiques les plus précises, les aspects permettant la levée des défis technologiques, permettant ainsi d'accélérer le développement de cellules solaires. Et, d'autre part, proposer des structures innovantes et réalisables avec des contraintes technologiques actuelles ou accessibles à court ou moyen terme. Le premier aspect est celui de la modélisation et de la simulation numérique stricto sensu et le second aspect celui de la conception ou (design). [18]



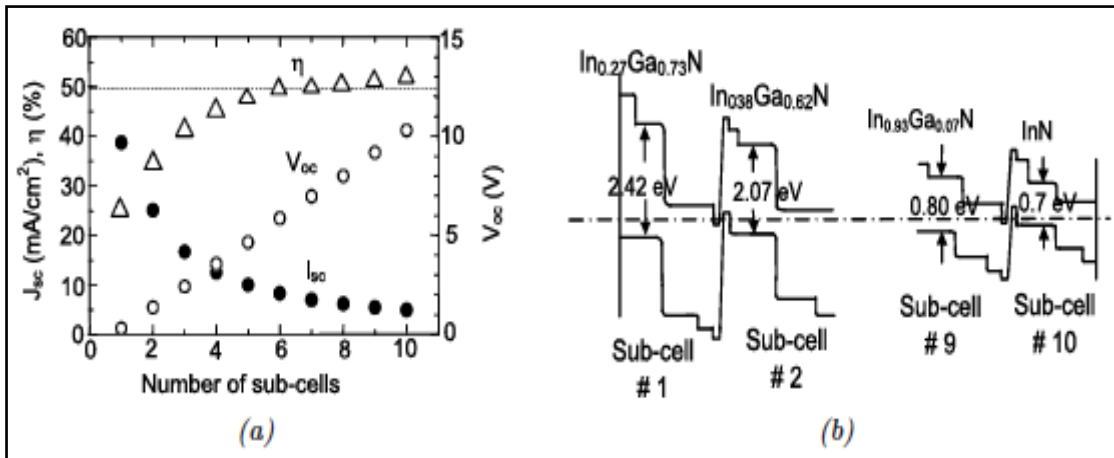
*Figure III-2: L'adaptabilité de la largeur de la bande interdite de l'InGaN au spectre solaire AM0. [18]*

#### III.4. Cellules solaires à base d'InGaN

Le Nitrure de Gallium et d'Indium (InGaN) fut utilisé dans la fabrication des cellules solaire pour la première fois, en 2003, par J. Wu en exposant la particularité de ce matériau à avoir un gap modulable et une résistance aux radiations. Depuis, plusieurs recherches se focalisaient sur ce matériau [19].

Théoriquement, un rendement autour de 50% peut être atteint sous un soleil par une cellule à multijonctions à partir de cinq sous-jonctions, comme montré dans la Figure III-3(a) [20]. Dans cette estimation, une adaptation du photocourant a été présumée dans toutes les sous-jonctions. La tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ) a été calculée par la relation empirique  $V_{co}=(E_g/q)-0,4$  en Volt, où  $q$  est la charge d'un électron, et  $E_g$  correspond à l'énergie de la

bande interdite de chaque sous-jonction. Le  $V_{oc}$  total est la somme des  $V_{oc}$  de toutes les sous-jonctions et le facteur de forme est présumé être de 85%.



**Figure III-3:** Performance attendues (a) et diagrammes de bandes (b) pour une cellule à dix jonctions en InGaN [20]

D'autres recherches théoriques menées dans le même cadre ont donné des très bons résultats pour les différentes cellules multijonctions, hétérojonction et homojonction. Les tableaux (III-1) et (III-2) rassemblent les rendements théoriques obtenus par S. Bremner et al [21], lors d'une étude menée sur une cellule solaire à multijonctions se composant de sept souscellules à base d'InGaN d'abord sous un spectre AM1.5, en suite sous un optimum de concentration. Les résultats, obtenus par S. Bremner, sous un spectre AM1.5, montre que pour une cellule à une seule jonction avec un gap de 1.34 eV, on obtient un rendement de 33.68% et un rendement de 45.71 %, pour une cellule à double jonction avec les gaps 0.94 et 1.60 eV. Tandis que pour une cellule à sept jonctions on a le plus haut rendement de 60.78%. Dans le deuxième cas, sous un optimum de concentration, on a les mêmes résultats, mais avec des meilleurs rendements qui atteignent les 75,09% pour les cellules à sept jonctions. D'après les résultats obtenus par les chercheurs, on peut confirmer qu'avec une cellule multijonctions on obtiendra un meilleur rendement, seulement sa fabrication reste très limitée vu sa complexité et son coût élevé [21]. Notons, qu'il reste des problèmes technologiques à résoudre.

**Tableau III-1:** Rendement des cellules multijonctions sous un spectre solaire AM1.5 [21].

$E_{g1}$	$E_{g2}$	$E_{g3}$	$E_{g4}$	$E_{g5}$	$E_{g6}$	$E_{g7}$	Rendement(%)
1,34							33,68
0,94	1,60						45,71
0,94	1,37	1,90					51,58
0,71	1,11	1,49	2,00				55,31
0,70	1,01	1,33	1,67	2,14			57,61
0,69	0,96	1,20	1,47	1,79	2,24		59,41
0,69	0,93	1,14	1,37	1,60	1,90	2,33	60,78

**Tableau III-2** Rendement des cellules multijonctions sous un optimum de concentration [21].

$E_{g1}$	$E_{g2}$	$E_{g3}$	$E_{g4}$	$E_{g5}$	$E_{g6}$	$E_{g7}$	Rendement(%)
1,14							40,74
0,76	1,54						55,47
0,60	1,14	1,82					63,15
0,49	0,93	1,38	2,01				67,85
0,44	0,81	1,17	1,58	2,18			71,02
0,38	0,71	1,01	1,33	1,72	2,30		73,33
0,37	0,66	0,92	1,18	1,48	1,85	2,42	75,09

### III.5. Etat de l'art des Cellules solaires à base d'InGaN

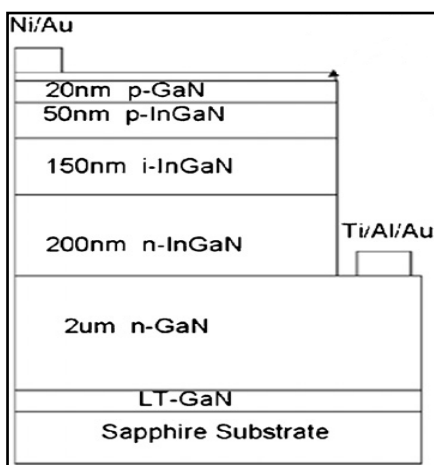
Grâce à sa large couverture spectrale couvrant une gamme d'énergie entre 0,7 eV à 3,4 eV et un coefficient d'absorption élevé, comme nous avons souligné précédemment, de nombreuses études ont été réalisées sur différentes structures de cellules solaires à base d'InGaN. Dans cette partie, nous exposons l'état de l'art des cellules solaires à base d'InGaN.

#### III.5.1. Cellules solaires à jonction (PN, PIN)

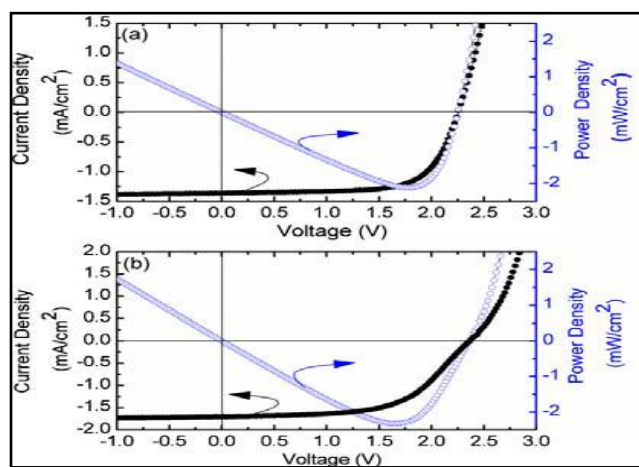
##### III.5.1.1 Cellules solaires à homojonction

Des études ont également été menées sur des structures à homojonction. En 2009, l'équipe de Zeng et al. [22] ont étudié une structure homojonction PIN à base d'InGaN réalisée par MOVPE. Ils ont évalué l'influence du contact ohmique au niveau de la couche P en utilisant

deux types de contact : un contact ohmique semi-transparent et un contact ohmique en grille. Les figures III-4 et III-5 présentent la structure de cette cellule solaire et les caractéristiques électriques associées. Ils ont montré que les dispositifs avec contacts semi-transparentes ont un FF plus élevé (0,69) que les dispositifs avec des contacts en grille (57,6%). En revanche c'est avec ces derniers qu'ils obtiennent les meilleures performances: un  $V_{CO}$  de 2,36 V et un  $J_{CC}$  de  $1,71 \text{ mA/cm}^2$ . Ce qui indique que les contacts ohmiques en grille permettent de faire passer une plus grande partie des photons incidents que les contacts ohmiques semi-transparentes.



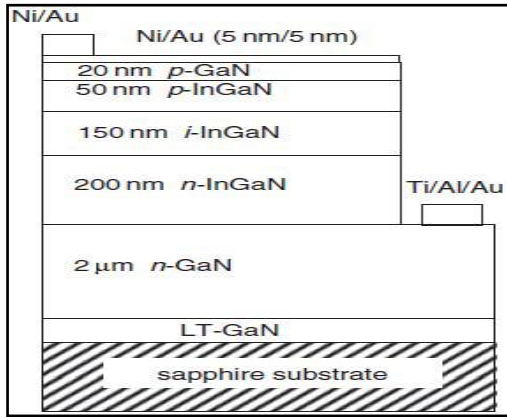
**Figure III.4** Schéma de la cellule solaire PIN à double hétérojonction proposée par Zeng et al. [22]



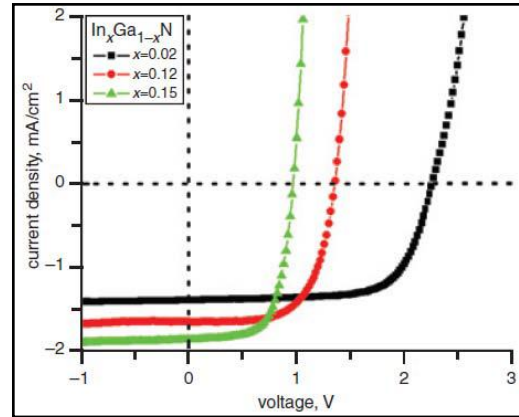
**Figure III.5** Caractéristiques J-V et P-V de la cellule solaire PIN à base d'InGaN avec différents configurations de contact semi-transparent. [22]

En même année (2009), Cai et al. [23] ont étudié les caractéristiques courant-tension de cellules à homojonction P-InGaN/I-InGaN/N-InGaN en fonction du pourcentage d'indium ( $0,02 < x < 0,15$ ). Les meilleures performances sont atteintes pour les cellules possédant le moins d'indium, soit  $\eta = 5,14\%$  pour une incorporation de 4% d'indium, la qualité cristalline du matériau InGaN "épais" étant toujours au cœur du problème.

Les figures III-6 et III-7 présentent la structure de cette cellule solaire et les caractéristiques électriques associées.



**Figure III-6:** Schéma de la cellule solaire PIN proposée par Cai et al. [23]

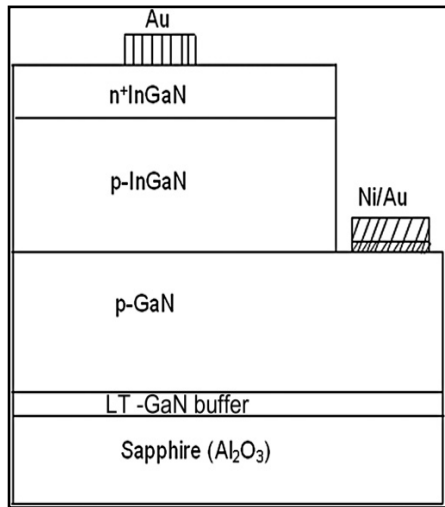


**Figure III-7:** Caractéristiques J-V de la cellule solaire PIN à base d'InGaN en fonction des compositions d'indium. [23]

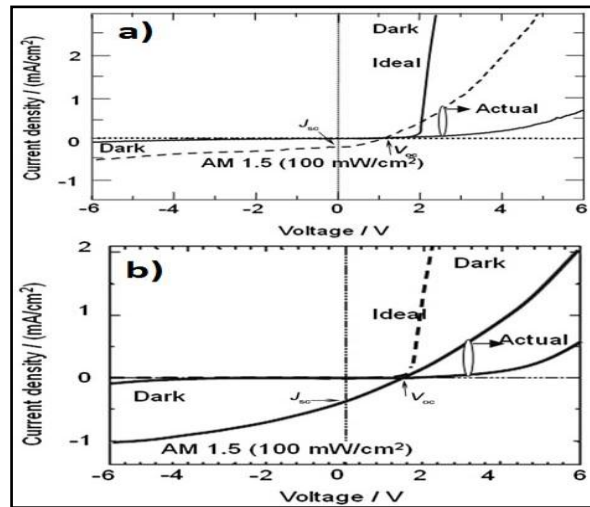
En **2010**, Kuwahara et al [24] ont réalisé une cellule solaire PIN à base d'InGaN avec 10% d'indium sur deux différents substrats, le saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et le GaN. Ils ont montré que la croissance sur un substrat de GaN réduit la densité de défauts dans les couches épitaxiées. Ainsi ils ont pu développer une couche absorbeur non-dopée de 250 nm d'InGaN. Ils ont obtenu un  $V_{co}$  de 2,23 V, un FF de 63% et un  $J_{cc}$  de  $1,59 \text{ mA/cm}^2$  sous AM1.5G. Le faible facteur de forme est dû principalement à la forte résistance série des structures. Dans la même période, Jampana et al [25] ont rapporté une meilleure densité de courant ( $0,91 \text{ mA/cm}^2$  pour une concentration d'indium de  $\sim 15\%$ ). Leur structure n'est pas tout-à-fait une homojonction, la jonction  $\text{p-In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N/n-In}_{0,175}\text{Ga}_{0,825}\text{N}$  est insérée entre une couche p-GaN et une couche n-GaN. Le  $V_{co}$  obtenu est de 1,73 V et le FF est de 61%.

En **2013**, Islam et al. [26] ont élaboré une structure homojonction  $\text{N}^+\text{P}$  avec une composition d'indium dans les couches InGaN de 0,16 par MOVPE. Ils ont obtenu, sous éclairage AM1.5, les performances suivantes : un  $V_{CO}$  de 1,4 V et un  $I_{CC}$  de  $0,25 \text{ mA/cm}^2$ . En même année, Islam et al. [27] ont rapporté une des meilleures performances pour la même structure homojonction avec une composition d'indium élevée (25%). La structure consiste d'une jonction  $\text{N}^+\text{P}$  d' $\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$  avec une épaisseur totale de 700 nm déposée sur une couche de GaN d'épaisseur 1,4  $\mu\text{m}$ . Avec cette structure, ils ont obtenu un  $V_{co}$  de 1,5 V et un  $J_{cc}$  de  $0,5 \text{ mA/cm}^2$ . Les figures III-8 et III-9 présentent la structure  $\text{N}^+\text{P}$  de cette cellule solaire et les caractéristiques électriques associées pour les deux compositions d'Indium.





**Figure III-8:** Schéma de la cellule solaire pin homojonction proposée par Islam et al. [26]



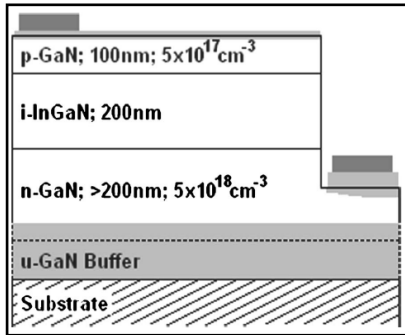
**Figure III-9:** Caractéristiques J-V de la structure comprenant une couche active a)  $In_{0,25}Ga_{0,75}N$  et b)  $In_{0,16}Ga_{0,84}N$ . [26]

Les cellules avec la structure homojonction souffrent d'une densité de courant très faible et un facteur de forme souvent dégradé à cause de défauts structuraux dus au désaccord de maille entre le substrat et la couche epitaxiée d'InGaN. Ces défauts se comportent comme des centres de recombinaison pour les porteurs photogénérés et dégradent ainsi l'efficacité de collecter ces porteurs.

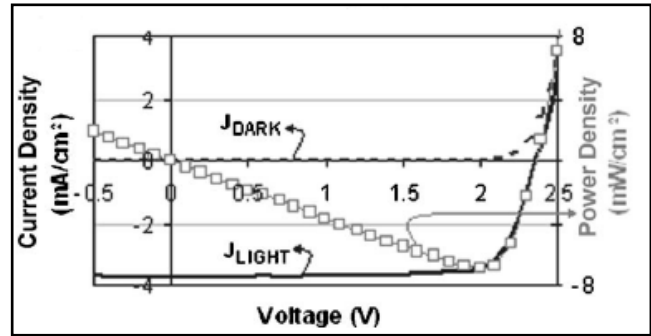
En **2014**, Shloe et al. [28] ont étudié une structure PIN sous éclairement AM1.5. Ils ont étudié l'effet de la concentration d'indium dans la couche intrinsèque. Le rendement optimal obtenu est de 17% pour une couche intrinsèque de 500nm d'épaisseur avec une composition d'indium de 0,55. Ceci montre que le rendement optimal des cellules solaires à base d'InGaN s'obtient avec de très fortes teneurs en indium dépassant les 50%.

### III.5.1.2 Cellules solaires à hétérojonction

Plusieurs études sur les cellules solaires PIN à hétérojonction à base d'InGaN sont réalisées, les dernières années. L'un des premiers travaux a été en **2007** par Jani et al [29]. Ils ont élaboré une cellule PV dont les caractéristiques sont une tension en circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) de 2,4V, une densité de courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ) de  $3,7\text{mA/cm}^2$ , un facteur de forme (FF) de 0,78 et un rendement de 6,93%. Ces valeurs ont été obtenues pour un spectre solaire amplifié dans la gamme UV (l'éclaircement n'était pas bien précisé dans cet article). Le  $V_{CO}$  élevé montre le potentiel de ce matériau. La figure III-10 illustre le schéma de la structure et la figure III-11 illustre sa caractéristique courant-tension associée.

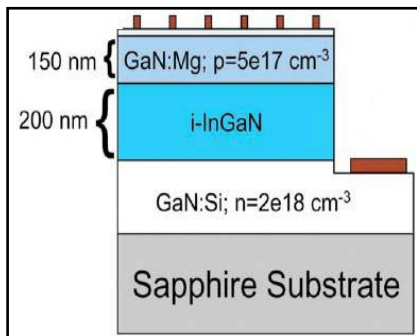


**Figure III-10:** Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Jani et al. [29]

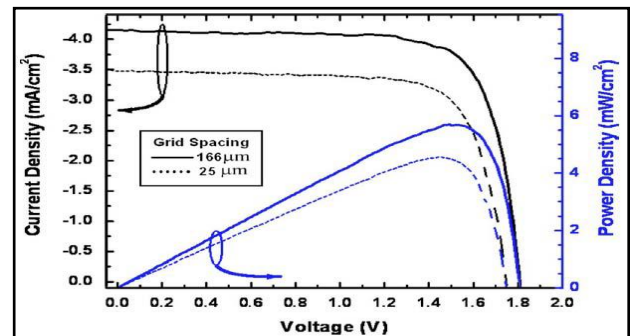


**Figure III-11:** Caractéristique J-V obtenue par Jani et al. [29]

En **2008**, Neufled et al [30], ont réalisé une autre étude sur une structure de cellule solaire PIN à hétérojonction fabriquée aussi par MOVPE avec une composition d'indium  $x=0,12$ . La figure III-12 illustre le schéma de la structure et la figure III-13 illustre la caractéristique courant-tension associée.



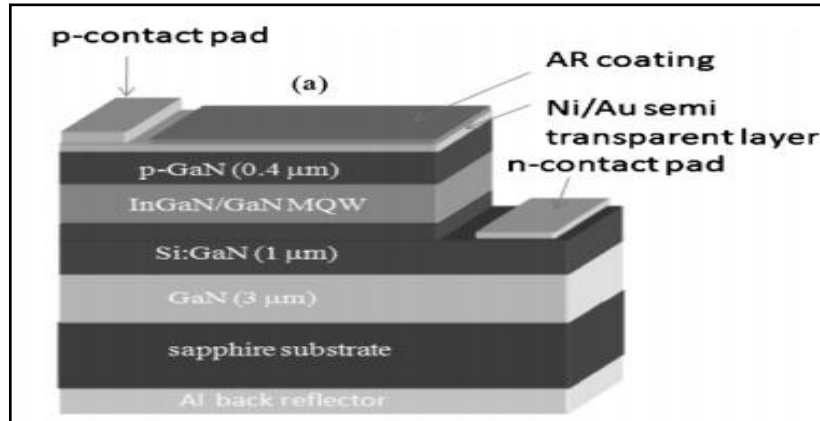
**Figure III-12:** Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Neufeld et al. [30]



**Figure III-13:** Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire pin à base d'InGaN/GaN obtenue par Neufeld et al. [30]

Cette cellule, sous un spectre AM0 pour différentes configurations de contacts, fournit les performances suivantes : un  $V_{CO}$  de 1,81V, un  $J_{CC}$  de 4,2mA/cm<sup>2</sup>, un facteur de forme de 0,753 et le rendement de la cellule est de l'ordre de 4,1%. Dans cet article, les auteurs ont montré que le rendement quantique externe (Rapport entre le nombre d'électrons collectés et le nombre de photons incidents) de la cellule peut être amélioré en optimisant le contact métallique inter digité face avant (couche P). Ils ont donc montré que pour un espacement des contacts de 25 µm le rendement quantique externe est de 51% alors que pour un espacement de 166 µm le rendement quantique est de 63% ce qui améliore les performances de la cellule. On voit donc bien ici l'importance d'optimiser l'espacement des contacts métalliques qui permet en effet de réduire le taux d'ombrage sur la face avant de la cellule solaire.

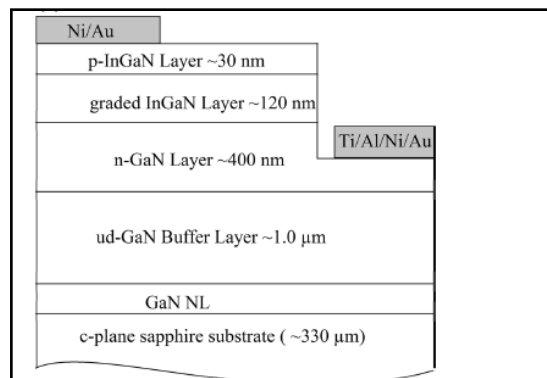
A cause de la difficulté à faire croître une couche cristalline de bonne qualité et relativement épaisse, pour des compositions d'indium plus élevées, les structures à multi-puits quantiques (MPQ) (ou MQW en anglais) et super réseaux (Super Lattice SL) ont été utilisées. Des études menées par Dahal et al, en **2010**, [31] dans le but d'améliorer la qualité cristalline de ce matériau, qui proposaient une nouvelle structure de cellule hétérojonction InGaN/GaN à multi puits quantiques déposés entre deux couches de GaN de type N et P en tant que couches actives. Cette structure est illustrée dans la figure III-14.



**Figure III-14:** Structure de cellule solaire InGaN / GaN avec 12 périodes de 3nm d'épaisseur  $In_xGa_{1-x}N$  0,35QWet 17nmGaN barrière. [31]

En **2011**, Asgari et al. [32] ont simulé une structure P-(MQW)-N sous éclairage AM1.5 et ont obtenu un rendement  $\eta = 35\%$  avec une composition d'indium optimale de la couche active de 0,63.

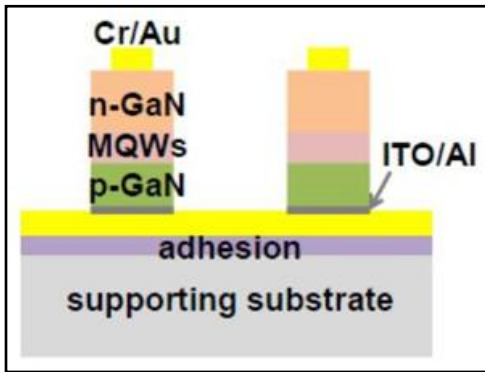
En **2014**, Çakmak et al. [33] ont étudié une structure PIN avec une couche InGaN à composition d'indium graduée réalisée par MOVPE. Le schéma de la structure est représenté sur la figure III-15. Ils ont étudié trois échantillons. La composition d'indium varie de 0,071 à 0,088 dans l'échantillon A, de 0,071 à 0,157 dans l'échantillon B et de 0,151 à 0,266 dans l'échantillon C.



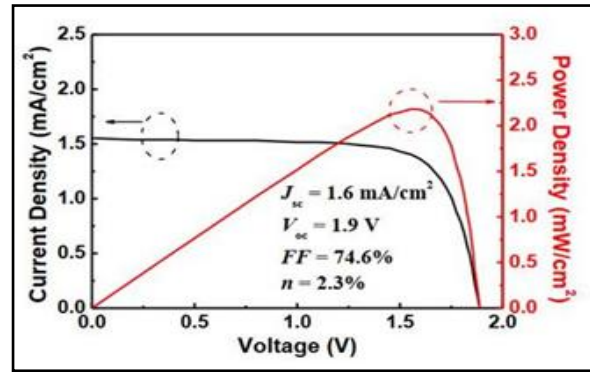
**Figure III-15:** Schéma de la structure de cellule solaire PIN étudiée par Çakmak et al. [33]

Les mesures ont été effectuées sous un éclairage AM1.5 et ils ont montré que c'est l'échantillon B qui présente les meilleures performances avec un  $V_{CO}$  de 0,25V, un  $I_{CC}$  de  $6\text{mA/cm}^2$  et un FF de 0,391 donnant un rendement de conversion de 0,66%. Cependant, les deux autres échantillons présentent presque les mêmes performances ; l'échantillon A présenté un rendement de 0,41% et l'échantillon C présente un rendement de 0,22%. Ces dernières années, une partie des études sur les structures à hétérojonction a concerné les puits quantiques InGaN/GaN. Le but avec ce genre de structures est d'essayer d'améliorer la qualité cristalline de la couche active à base d'InGaN de la cellule.

En 2016, Zheng et al. [34] ont élaboré une structure à puits quantiques (GaN-MQWs-GaN) représentée sur figure III-16 et sa caractéristique courant-tension associée est illustrée sur figure III-17.



**Figure III-16:** Schéma de la structure de cellule solaire à puits quantiques étudiée par Zheng et al. [34]

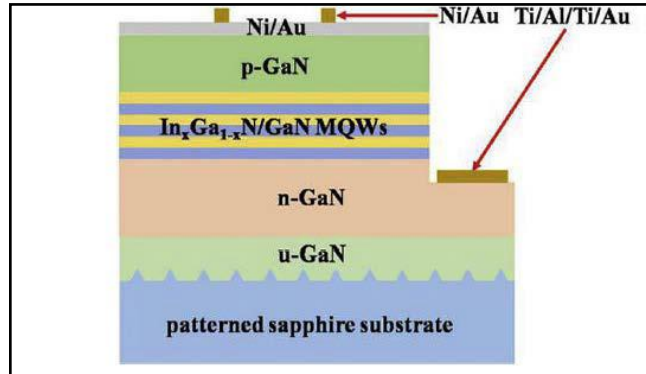


**Figure III-17:** Caractéristique J-V obtenue par Zheng et al. [34]

La cellule sous éclairage AM1.5G présente un  $V_{CO}$  de 1,9 V, un  $J_{CC}$  de  $1,6\text{mA/cm}^2$  et un FF de 0,746, donnant un rendement  $\eta = 2,3\%$ . Pour ces deux études, le rendement obtenu expérimentalement reste très moins que ce lui prévu théoriquement. Ceci peut être expliqué par le fait que la modélisation analytique des phénomènes physiques réalisée par Asgari est loin d'être réaliste. En effet dans leur simulation, les auteurs n'ont pas considéré un certain nombre de phénomènes physiques, notamment les défauts structuraux, ou encore les phénomènes de polarisation et de recombinaisons présents dans les matériaux.

Dernièrement, en 2017, Liu et al. [35] ont étudié deux structures de cellules solaires à puits quantiques InGaN/GaN, illustrée sur figure III-18 l'une avec une composition d'indium de 0,14 (cellule A) et l'autre avec une composition d'indium de 0,19 (cellule B). La cellule A présente un rendement de conversion de 3,56% et pour la cellule B, le rendement de conversion est de 1,04%. Les auteurs ont montré que cette différence est sûrement due à la

qualité cristalline. Avec moins d'indium, la cellule A possède probablement une meilleure qualité cristalline que la cellule B. En effet, l'augmentation de la composition d'indium entraîne une dégradation de la qualité cristalline du fait de l'augmentation des défauts structuraux.



**Figure III.18** Schéma de la structure de cellule solaire à puits quantiques InGaN/GaN étudiée par Liu et al [35].

### III.5.2 Cellules solaires à multijonctions

Des études ont également été réalisées sur différentes structures de cellules solaires multijonctions à base d'InGaN.

En 2008, Hsu et al. [36] ont montré par simulation, qu'il est possible d'atteindre les 31% de rendement avec un gap d'InGaN autour de 1,65 eV et une épaisseur de silicium de 20  $\mu\text{m}$ . La structure est une double jonction : une jonction PN à base d'InGaN connectée en série avec une autre jonction PN à base de silicium. L'étude ne tient pas compte de la jonction tunnel reliant les deux jonctions. Dans la même période, Xiaobin et al. [37] ont simulé une cellule solaire multijonctions à base d'InGaN. C'est une structure composée de deux jonctions : la première avec une composition d'indium de 0,48 et la seconde avec une composition d'indium de 0,73. Ils obtiennent un rendement de conversion de 35,1%. Cependant, la jonction tunnel qui devrait relier électriquement les deux souscellules n'a pas été considérée dans cette étude, ce qui expliquerait en grande partie ce très haut rendement. De plus, dans leur démarche de modélisation, le rendement quantique interne est égal au rendement quantique externe; aucune perte de photons n'est donc considérée. Les phénomènes de recombinaison, les phénomènes de polarisation et les défauts structuraux ne sont pas pris en compte non plus et le coefficient d'absorption est considéré constant en composition d'indium et en longueur d'onde dans toute la structure. La modélisation utilisée par Zhang et al est donc peu réaliste, ce qui conduit à des performances surestimées.

En 2014, Young et al. [38] ont élaboré par MOVPE, une structure multijonctions avec une couche de puits quantiques InGaN/GaN. Ils ont utilisé un revêtement optique à large bande pour améliorer l'absorption de la lumière. La structure sous éclairement AM0, fournit un rendement de 3,33% avec un VCO de 2,26 V et un ICC de 2,97 mA/cm<sup>2</sup>. L'alliage InGaN est également étudié pour réaliser des structures hétérojonctions InGaN/Si. Dans le tableau III.5, nous présentons les résultats obtenues des cellules solaires multijonctions à base d'InGaN.

Certains groupes ont étudié des nanostructures (ex. nano-fils, boîtes quantiques,...etc.) pour la fabrication d'une cellule solaire à base d'InGaN. Les avantages de ces structures sont qu'elles ont une surface d'absorption plus importante, le transport des porteurs amélioré et la modification de la bande-interdite grâce aux propriétés de confinement dans ces structures. A cause de la difficulté d'obtenir de bons contacts et du contrôle de la croissance de ces matériaux, peu de travaux ont réussi à avoir des réponses PV pour ces structures. En 2011, Nguyen et al. [39] ont réalisé la première cellule avec la structure nano-fils développés sur silicium (Si). Les nano-fils correspondent à une homojonction axiale PIN d'InN. Une densité de courant importante a été obtenue (14 mA/cm<sup>2</sup>) sous une illumination AM1.5G, mais le V<sub>co</sub> ainsi que le FF sont très faibles ; 0,14 V et 34,02%, respectivement.

Les tableaux III-3, III-4 et III-5 résument l'état de l'art concernant les différentes structures de cellules solaires à base d'InGaN rassemblé par Ashraful Ghani et al. [40], d'autres travaux avec leurs références sont ajoutés dans les mêmes tableaux.

**Tableau III-3** Etat de l'art de cellule solaire homojonction à base d'InGaN. [40]

La structure	Méthode de croissance / Simulation	Indium % (L'épaisseur)	Vco(V) et Jcc(mA/cm <sup>2</sup> ) ou Rendement $\eta$ (L'excitation)	Auteur Année
P-N InGaN	MOVPE	0,18 (320nm)	0,43 V et 0,04 mA/cm <sup>2</sup> (360nm)	Yang 2007
P-N InGaN	MOVPE	0,28 (100nm)	2,1 V (UV)	Jani 2007
PIN InGaN	MBE	0~0.3 (800nm)	2,5 V et 30 mA/cm <sup>2</sup> GaN(325nm:200mW/cm <sup>2</sup> )	Chen 2008
P-N InGaN	MBE	0,31 (700 ~ 1000nm)	0,55 V et 0,24 mA/cm <sup>2</sup> AM0	Misra 2008
P-N InGaN	MOVPE	0,12 (300nm)	1.5~2 V et 0,04 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Jani 2008
P-N InGaN	MOVPE	0,25	1.5 V et 0,5 mA/cm <sup>2</sup>	Yamamoto

		(700nm)	(AM1,5)	2008
PIN InGaN	MOVPE	0,02~0.15 (400nm)	2,24~0,96 V et 1,4~1,87 mA/cm <sup>2</sup> (Xe lampe)	Cai 2009
P-N InGaN	MOVPE	0,148~0.168 (80nm)	1,73 V et 0,91 mA/cm <sup>2</sup> (AM0)	Jampana 2010
P-N InGaN	MBE	0,31 (400 ~ 1000nm)	1,8~0,2 V et 1~2,2 mA/cm <sup>2</sup> (Xe lampe)	Boney 2011
P-N InGaN	MOVPE		1,5V et 0,5mA/cm <sup>2</sup> (AM1.5)	Islam [26] 2013
P-N InGaN	Simulation		$\eta = 17\%$ (AM1.5)	Chloe [28] 2014
PIN InGaN	MOVPE	0,08 (630nm)	2V et 0,73mA/cm <sup>2</sup> (AM1.5)	Sang [41] 2015

MOVPE: Epitaxie en phase vapeur aux organométalliques.

MBE: Epitaxie par jets moléculaires (Molecular Beam Epitaxy)

**Tableau III-4** État de l'art de cellule solaire hétérojonction à base d'InGaN. [40]

La structure	Méthode de croissance / Simulation	Indium % (L'épaisseur)	Vco(V) et Jcc(mA/cm <sup>2</sup> ) ou Rendement $\eta$ (L'excitation)	Auteur Année
PIN GaN/InGaN/GaN	MOVPE	0,04~0.05 (200nm)	2,4 V (UV)	Jani 2007
PIN GaN/InGaN/GaN	MOVPE	0,12 (200nm)	1,81 V et 4,2 mA/cm <sup>2</sup> (AM0)	Neufled 2008
PIN GaN/InGaN/GaN	MOVPE	0,1 (150nm)	2,1 V et 0,46 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Zheng 2008
p-GaN/InGaN - MQWGaIn-GaN	MOVPE	0,3 (24nm)	2 V et 1,5 mA/cm <sup>2</sup> (Lumière blanche)	Dahal 2009
p- In <sub>0,19</sub> Ga <sub>0,81</sub> N / InGaN- GaN SL n-GaN	MOVPE	0,25 (84nm)	1,84 V et 0,8 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Sheu 2009
p-GaN/InGaN - MQWGaIn-GaN	MOVPE	0,2 (15nm)	2,2 V et 0,66 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Jeng 2009
	MOVPE	0,28 (15nm)	1,8 V et 1,09 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	
PIN GaN/InGaN/GaN couches minces	MOVPE	0,1 (150nm)	2,09 V et 0,52 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Horng 2009
p-GaN/InGaN -	MOVPE	0,3	1,95 V et 0,83 mA/cm <sup>2</sup>	Lai

MQWGaIn-GaN		(27nm)	(AM1,5)	2010
PIN GaN/InGaN/GaN	MOVPE	0,08 (150nm)	1,8 V et 0,44 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Tsai 2010
p-GaN / Al <sub>0,14</sub> Ga <sub>0,86</sub> N - In <sub>0,19</sub> Ga <sub>0,81</sub> N - GaN SL n-GaN	MOVPE	0,21 (42 nm)	2,1 V et 0,84 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Yang 2010
p-GaN/InGaN - MQWGaIn-GaN	MOVPE	0,35 (36nm)	1,8 V et 2,56 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Dahal 2010
PIN GaN/InGaN/GaN	MOVPE	0,1 (250nm)	2,23 V et 1,59 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5 ; 155mW/ cm <sup>2</sup> )	Kuwahara 2010
GaN/InGaN/GaN SL InGaN	MOVPE	0,17/0,07 (240nm)	1,78 V et 3,08 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5; 155mW/ cm <sup>2</sup> )	Kuwahara 2011
PIN GaN/InGaN/GaN	MOVPE	0,12 (60nm)	1,89 V et 1,06 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Maiol 2011
PIN GaN/InGaN/GaN	MOVPE	0,0~0,11 (250nm)	1,33 V et 0,59 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Lee 2011
PIN GaN/InGaN/GaN	MBE	0,11 (90nm)	1,75 V et 1,11 mA/cm <sup>2</sup> (AM0)	Lang 2011
PIN GaN/InGaN/GaN	MBE	0,108 (200nm)	2,0 V et 0,83 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Shim 2011
p-GaN/InGaN - MQWGaIn-GaN	MOVPE	0,23 (25nm)	2,05 V et 1,09 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Lee 2011
PIN InGaN/InGaN -GaN MQW/InGaN	MOVPE	0,19~0,36 (100+46+200nm)	2,92~2,72 V et 2,72~2,97 mA/cm <sup>2</sup> (AM1,5)	Liou 2011
PIN InGaN/InGaN -GaN MQW/InGaN	Simulation	/	$\eta_c = 35\%$ . (AM1.5)	Asghari [32] 2011
InGaN/GaN	MOVPE	/	0,25V et 6mA/cm <sup>2</sup> (AM1.5G)	Çakmak [33] 2014
P-(MQW)-N	MOVPE	/	1,9V et 1,6mA/cm <sup>2</sup> (AM1.5G)	Zheng [34] 2016
P-(MQW)-N	MOVPE	0,14 et 0,19	$\eta_c = 3,56\%$ et $\eta_e =$ 1,04% (AM1.5G)	Liu [35] 2017



**Tableau III-5.** État de l'art des cellules solaires multijonctions à base d'InGaN.

La structure	Méthode de croissance / Simulation	Rendement $\eta$ (L'excitation)	Auteur Année
$\text{In}_{0.46}\text{Ga}_{0.54}\text{N} / \text{Si}$	Simulation	31% (AM1,5)	Hsu [36] 2008
$\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{N} / \text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{N}$	Simulation	35.1% , 33.1 % et 31.4% (AM1.5G, AM1,5D et AM0)un soleil	Xiaobin [37] 2008
		40.9% , 39.5 % et 37.9% (AM1.5G, AM1,5D et AM0) Sous concentration	
GaN/ InGaN MQW/GaN	MOVPE	3,33% (AM0)	Young [38] 2014

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une présentation des rendements record selon le NREL. Puis, nous avons montré que le nitrure d'indium et de gallium (InGaN) a un grand potentiel pour le photovoltaïque avec une absorption très élevée et une résistance aux hautes températures et aux radiations. Cependant, il connaît plusieurs contraintes technologiques comme nous avons cité. Finalement, nous avons exposé, particulièrement, l'état de l'art des cellules solaires à base d'InGaN.

### Bibliographie de chapitre III

- [1] NREL, “Reported time line of solar cell energy conversion efficiencies since 1976,” September 2019. Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [2] M. Green, Hishikawa Y, Dunlop ED, et al. Solar cell efficiency tables (Version 53). *Prog Photovolt Res Appl.* 2019;27:3-12. <https://doi.org/10.1002/pip.3102>
- [3] M. Green A, Hishikawa Y, Dunlop ED, et al. Solar cell efficiency tables (version 52). *Prog Photovolt Res Appl.* 2018;26:427–436. <https://doi.org/10.1002/pip.3040>
- [4] S.P. DenBaars, D. Feezell, K. Kelchner, S. Pimputkar, C.C. Pan, C.C. Yen, S. Tanaka, Y. Zhao, N. Pfaff et R Farrell. Development of gallium-nitride-based light emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays. *Acta Materialia* 61.3 (2013), p. 945-951.
- [5] S. Nakamura. Nobel lecture : Background story of the invention of efficient blue InGaN light emitting diodes. *Reviews of Modern Physics* 87.4, p. 1139, 2015.
- [6] E. Matioli, C. Neufeld, M. Iza, S. C. Cruz, A.A. Al-Heji, X. Chen, R.M. Farrell, S. Keller, S. DenBaars et U. Mishra. High internal and external quantum efficiency InGaN/GaN solar cells. *Applied Physics Letters* 98.2 , p. 021102, 2011.
- [7] S.J. Pearton, F. Ren, E Patrick, M.E. Law et A.Y. Polyakov. Ionizing radiation damage effects on GaN devices. *Journal of Solid State Science and Technology* 5.2, 2016.
- [8] P.G. Moses et C.G. Van de Walle. Band bowing and band alignment in InGaN alloys. *Applied Physics Letters* 96.2, p. 021908, 2010.
- [9] C.A.M. Fabien, A. Maros, C.B. Honsberg et W.A. Doolittle. III-Nitride Double Heterojunction Solar Cells With High In-Content InGaN Absorbing Layers : Comparison of Large-Area and Small-Area Devices. *IEEE Journal of Photovoltaics* 6.2 , p 460-464, 2016.
- [10] N.G. Young, E.E. Perl, R.M. Farrell, M. Iza, S. Keller, J.E. Bowers, S. Nakamura, S.P. DenBaars et J.S. Speck. High performance broadband optical coatings on In-GaN/GaN solar cells for multijunction device integration. *Applied Physics Letters* 104.16 , p. 163902, 2014.
- [11] N.A. El-Masry, E.L. Piner, S.X. Liu et S.M. Bedair. Phase separation in InGaN grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters* 72.1, p. 40-42, 1998.
- [12] S. Pereira, M.R. Correia, E. Pereira, C. Trager-Cowan, F. Sweeney, K.P. O'donnell, E. Alves, N. Franco et A.D. Sequeira. Structural and optical properties of InGaN/GaN layers close to the critical layer thickness. *Applied Physics Letters* 81.7, p. 1207-1209, 2002.
- [13] M. Leyer, J. Stellmach, C. Meissner, M. Pristovsek et M. Kneissl. The critical thickness of InGaN on (0001) GaN. *Journal of Crystal Growth* 310.23 (2008), p. 4913-4915
- [14] Y. Nakano et T Jimbo. Electrical characterization of acceptor levels in Mg-doped GaN. *Journal of Applied Physics* 92.9 (2002), p. 5590-5592.

- [15] B.O. Monemar, P.P. Paskov, G. Pozina, C. Hemmingsson, J.P. Bergman, T. Kawashima, H. Amano, I. Akasaki, T. Paskova et S. Figge. Evidence for two Mg related acceptors in GaN. *Physical Review Letters* 102.23 (2009), p. 235501
- [16] A.N. Bright, P.J. Thomas, M. Weyland, D.M. Tricker, C.J. Humphreys et R. Davies. Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaIn/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy. *Journal of Applied Physics* 89.6, 2001.
- [17] J.J. Wierer Jr, A.J. Fischer et D.D. Koleske. The impact of piezoelectric polarization and nonradiative recombination on the performance of (0001) face GaN/InGaIn photovoltaic devices. *Applied Physics Letters* 96.5; p. 051107, 2010.
- [18] S.O. Saad Hamady. Simulation numérique et caractérisation de matériaux semiconducteurs III-N pour détecteurs ultraviolet et cellules solaires. *Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]*. Université de lorraine, 2017.
- [19] J. Wu, W. Walukiewicz, K. Yu, W. Shan, J. Ager Iii, E. Haller, et al., "Superior radiation resistance of In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>N alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system," *Journal of Applied Physics*, vol. 94, pp. 6477-6482, 2003.
- [20] A. Yamamoto, M. R. Islam, T.-T. Kang, and A. Hashimoto, "Recent advances in InN based solar cells : status and challenges in InGaIn and InAlIn solar cells," *Phys. Status Solidi*, vol. 7, pp. 1309–1316, mar 2010.
- [21] S. Bremner, M. Levy, and C. B. Honsberg, "Analysis of tandem solar cell efficiencies under AM1. 5G spectrum using a rapid flux calculation method," *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, pp. 225-233, 2008.
- [22] S. W. Zeng, B. P. Zhang, J. W. Sun, J. F. Cai, C. Chen, and J. Z. Yu. Substantial photoresponse of InGaIn p-i-n homojunction solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 24(5) :055009, 2009.
- [23] X. M. Cai, S. W. Zeng, and B. P. Zhang. Favourable photovoltaic effects in InGaIn pin homojunction solar cell. *Electronics Letters*, 45(24) :1266 – 1267, 2009.
- [24] Y. Kuwahara, T. Fujii, Y. Fujiyama, T. Sugiyama, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, "Realization of nitride-based solar cell on freestanding GaIn substrate," *Applied Physics Express*, vol. 3, no. 11, p. 111001, 2010.
- [25] B. Jampana, A. Melton, M. Jamil, N. Faleev, R. Opila, I. Ferguson, and C. Honsberg. Design and Realization of Wide-Band-Gap (2.67 eV) InGaIn p-n Junction Solar Cell. *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 31, pp. 32–34, jan 2010.
- [26] M. Rafiqul Islam, M. R. Kaysir, M. Jahirul Islam, A. Hashimoto, and A. Yamamoto. MOVPE Growth of InGaIn and Fabrication of Homojunction Solar Cells. *Journal of Materials Science & Technology*, 29 (2) :128–136, 2013.
- [27] M. R. Islam, M. R. Kaysir, M. J. Islam, A. Hashimoto, and A. Yamamoto. MOVPE Growth of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x 0.4) and Fabrication of Homo-junction Solar Cells. *J. Mater.Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 128–136, fevrier 2013.

- [28] A. Chloe, M. Fabien and W. Alan Doolittle. Guidelines and limitations for the design of high-efficiency InGaN single-junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130: 354–363, Novembre 2014.
- [29] O. Jani, I. Ferguson, C. Honsberg, and S. Kurtz. Design and characterization of GaN/InGaN solar cells. *Applied Physics Letters*, 91(13) :132117, 2007.
- [30] C. J. Neufeld, N. G. Toledo, S. C. Cruz, M. Iza, S. P. DenBaars, and K. Mishra. High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap. *Applied Physics Letters*, 93(14) :143502, 2008.
- [31] R. Dahal, J. Li, K. Aryal, J. Y. Lin, and H. X. Jiang. InGaN/GaN multiple quantum well concentrator solar cells. *Applied Physics Letters*, 97(7) :073115, 2010.
- [32] A. Asgari and K. Khalili. Temperature dependence of InGaN/GaN multiple quantum well based high efficiency solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(11):3124–3129, 2011.
- [33] H. Çakmak, E. Arslan, M. Rudziński, P. Demirel, H. E. Unalan, W. Strupinski, R. Turan, M. Öztürk, and E. Özbay. Indium rich InGaN solar cells grown by MOCVD. *Journal of Materials Science :Materials in Electronics*, 25(8) :3652–3658, 2014.
- [34] Z. W. Zheng, M. H. Lai, L. Y. Ying, and B. P. Zhang. High-efficiency vertical type InGaN/GaN multiple quantum well solar cells using aluminum reflectors. In 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), pages 91–93, Aout 2016.
- [35] S. Liu, Q. Wang, H. Xiao, K. Wang, C. Wang, X. Wang, W. Ge, and Z. Wang. Optimization of growth and fabrication techniques to enhance the InGaN/GaN multiple quantum well solar cells performance. *Superlattices and Microstructures*, 109 :194–200, 2017.
- [36] Hsu. Modeling of InGaN/Si tandem solar cells. *Journal of Applied Physics*, 104(2) : 024507, juillet 2008.
- [37] Z. Xiaobin, X. Wang, H. Xiao, C. Yang, J. Ran, C. Wang, Q. Hou, J. Li, and Z. Wang. Theoretical design and performance of InGaN two-junction solar cells. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 41(24) :245104, 2008.
- [38] Young. High-performance broadband optical coatings on InGaN/GaN solar cells for multijunction device integration. *Applied Physics Letters*, 104(16) :163902, Avril 2014.
- [39] H. P. T. Nguyen, Y. L. Chang, I. Shih, and Z. Mi, “InN p-i-n Nanowire Solar Cells on Si,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, vol. 17, pp. 1062–1069, juillet 2011.
- [40] A. G. Bhuiyan, K. Sugita, A. Hashimoto, and A. Yamamoto, *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, VOL. 2, NO. 3, 2012.
- [41] L. Sang, M. Liao, Y. Koide, and M. Sumiya, InGaN-based thin film solar cells: Epitaxy, structural design, and photovoltaic properties, *J. Appl. Phys.*, vol.117, no. 10, p.105706, 2015.

---

CHAPITRE IV

SIMULATION DES  
CELLULES  
SOLAIRES A SIMPLE  
JONCTION A BASE  
D'InGaN

---

## Modélisation des cellules solaires à simple jonction à base d'InGaN

### IV.1. Introduction

Les cellules traditionnelles à simple jonction ont un rendement théorique maximum de 33,16%, pour un gap de 1,34 eV sous AM1.5 G, défini par Shockley et Queisser " [1,2]. Seuls les photons dont l'énergie égale ou supérieure au gap du matériau sont utiles. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans création de paires électrons trous. De plus, lorsque l'énergie apportée par un photon est supérieure à la bande interdite, l'excès d'énergie est dissipé sous forme de chaleur par thermalisation. Une solution optimale, pour limiter les pertes thermodynamiques et de thermalisation, consiste à utiliser des cellules multijonctions qui font partie de la troisième génération des technologies photovoltaïques et actuellement, ce sont elles qui détiennent les rendements record de conversion [3]. Les cellules solaires multijonctions, étudiées depuis 1960, ont le potentiel d'atteindre des rendements de conversion élevés de plus de 50% et qui sont prometteuses pour les applications spatiales et terrestres [4,5]. Théoriquement, un nombre infini de jonctions aurait une efficacité limite de 86,8% sous concentration [4,5]. Dans ce chapitre, nous allons étudier des cellules à simple jonction PN et PIN à base d'InGaN à l'aide du logiciel AMPS-1D. Ces cellules sont les composants des cellules solaires tandems que nous les étudierons dans le suivant chapitre.

### IV.2. Les cellules multijonctions

Les cellules multijonctions consistent, dans la plupart des cas, en une superposition de souscellules, c'est-à-dire plusieurs jonctions réalisées avec des matériaux, déposés en couches minces, possédant des gaps décroissants. Ainsi chaque jonction travaille avec son rendement optimum absorbant la plage spectrale qui lui est propre [6]. La figure IV.1 présente le principe d'une cellule solaire multijonctions.

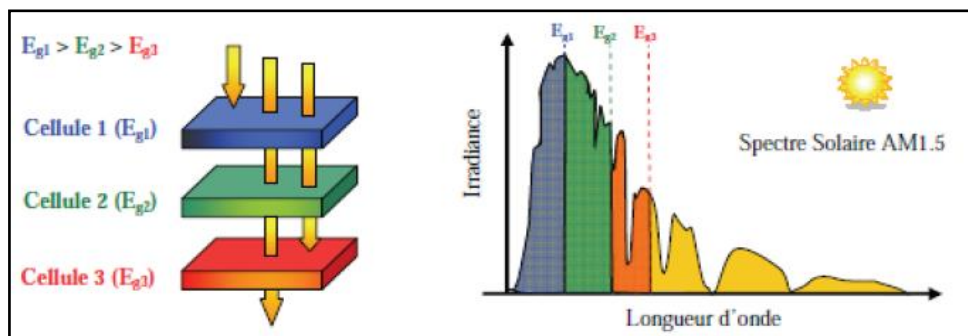


Figure IV.1 : Principe de la cellule multijonctions. [7]

Le développement des cellules à haut rendement a été notamment motivé par les applications spatiales qui ont besoin d'autonomie énergétique et ne sont pas sensibles aux coûts des modules PV pour des satellites valant plusieurs milliards. Du fait de leur coût de fabrication encore trop élevé, le PV de 3<sup>ème</sup> génération est peu utilisé et représente moins de 0.1 % des technologies photovoltaïques commerciaux dans le monde.

### **IV.3. Modélisation des cellules à simple jonction PN et PIN à base d'InGaN**

La majorité des cellules solaires photovoltaïques est réalisée à partir d'une jonction PN ou PIN conventionnelle, l'optimisation de ces dernières et surtout la réalisation est une étape obligatoire pour le développement des cellules solaires multijonctions car ces structures PN et PIN conventionnelles sont tout simplement les composantes de base des cellules solaires multijonctions à haut rendement [8].

Dans cette partie, nous présentons des simulations de deux cellules à simple jonction à base d'InGaN, la première avec une concentration d'Indium de 53% et la seconde avec une concentration d'Indium de 81% et qui seront comparées à celles de même concentration d'Indium à structure PIN réalisées à l'aide du logiciel AMPS-1D. Ces cellules seront utilisées dans la simulation des cellules solaires tandem basées sur une structure PN/PN et autre basées sur une structure PIN/PIN que nous verrons dans le cinquième chapitre.

#### **IV.3.1. Le logiciel de simulation AMPS-1D**

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire Analysis of Microelectronic and Photonic Structures ou AMPS-1D a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque. Il a été développé par le groupe de Fonash professeur de l'université de Pennsylvanie [9]. Il a été conçu pour être un outil informatique très général et polyvalent de simulation pour l'analyse de microélectroniques et structures photoniques. Il s'agit d'une seule dimension qui est applicable à tout dispositif à deux bornes. Il peut être pour la diode, le capteur photodiode et l'analyse des dispositifs photovoltaïques. Son principe de base est de résoudre l'équation de poisson et les équations de continuité soumis à des conditions aux limites associées des électrons libres et des trous à l'aide de Newton-Raphson. L'utilisation de ce logiciel est très pratique car il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, il permet d'aller jusqu'à 30 couches. En plus, le AMPS permet d'analyser un large éventail de structures de dispositifs sous illumination/sous tension ou les deux, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en agissant sur les paramètres variables (largeur,

surface, dopage,... etc.). Une description détaillée des techniques de solution peut être trouvée dans le manuel d'AMPS [10]

### IV.3.2. Utilisation de l'AMPS-1D

Le logiciel AMPS-1D se divise en quatre parties. Les trois premières sont pour la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation où le logiciel calcule, les bandes interdites, les caractéristiques J-V, les courant de recombinaison, la génération...

Pour faire démarrer la simulation par AMPS-1D, trois types de paramètres sont nécessaires:

#### IV.3.2.1. Propriétés générales du dispositif et du matériau

- Les propriétés du matériau : pour une simulation réussie, les paramètres d'entrée comprennent : l'épaisseur du matériau, la constante diélectrique, la bande interdite, l'affinité électronique, la mobilité et la densité des états effective, la concentration des porteurs, le coefficient d'absorption, les états de défauts, la densité de défauts, la distribution de défauts, la section de capture efficace et enfin, les états de queues de bande.

Les propriétés générales du dispositif englobent :

- ❖ **Contacts avant et arrière:** Les contacts avant et arrière sont définis par leur fonction de travail et par la réflectivité de l'interface du contact/semi-conducteurs. Le  $\Phi_{b0}$  et le  $\Phi_{bL}$  qui représentent la différence entre la bande de conduction ( $E_c$ ) et le niveau de Fermi ( $E_F$ ), respectivement à la surface avant ( $x = 0$ ) et arrière ( $x = L$ ) doivent être choisis de façon à obtenir un contact ohmique à la surface avant et une négligeable barrière de Schottky à la surface arrière.
- ❖ **Recombinaisons aux surfaces:** Les interfaces entre les couches poly-cristallines de la cellule sont riches en défauts, générés par le désaccord de maille et les impuretés, ce qui cause la recombinaison des porteurs. Le paramètre utilisé pour décrire cette recombinaison est donnée en fonction de la vitesse de recombinaison de surface [11]. Tout calcul numérique pour ce travail a utilisé une vitesse de recombinaison de surface de  $10^3$  cm/s et  $10^7$  cm/s ce qui correspond approximativement à la vitesse thermique des électrons.
- ❖ **Réflectivité à la surface avant et arrière:**

La réflectivité de la surface avant limite le rendement quantique de la cellule et donc la densité du courant de court-circuit. Ce paramètre est réglé à 0%.



La réflexion arrière a une influence négligeable sur la performance donc, on a considéré que 100% des photons atteignent la surface arrière seront réfléchis.

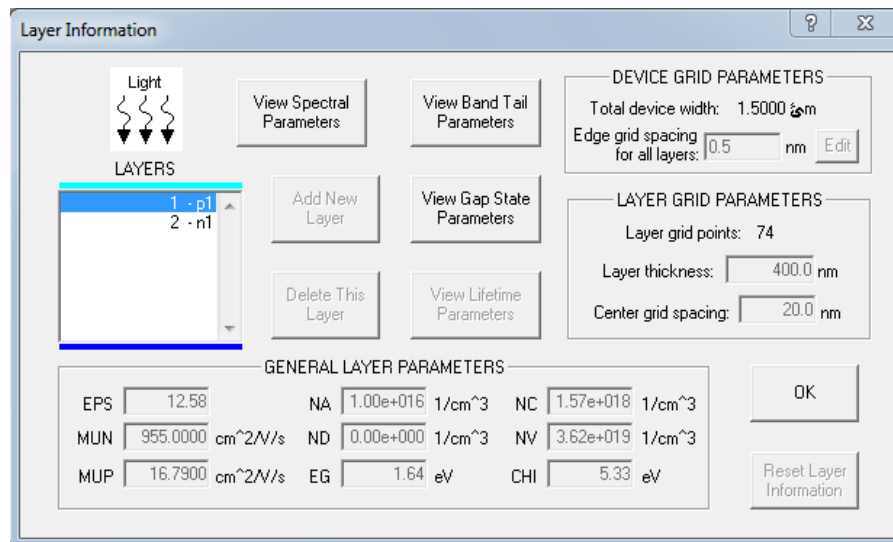


Figure IV.2 Fenêtre d'AMPS-1D pour introduire les paramètres des matériaux.

### IV.3.2.2. Conditions environnementales

L'illumination est illustrée sur la figure IV-3. Le nombre de photons incidents par ( $\text{cm}^2 \text{ s}$ ) est en fonction de longueurs d'onde entre  $0,3 \mu\text{m}$  et  $2,5 \mu\text{m}$ , avec une taille de pas de  $0,02 \mu\text{m}$ .

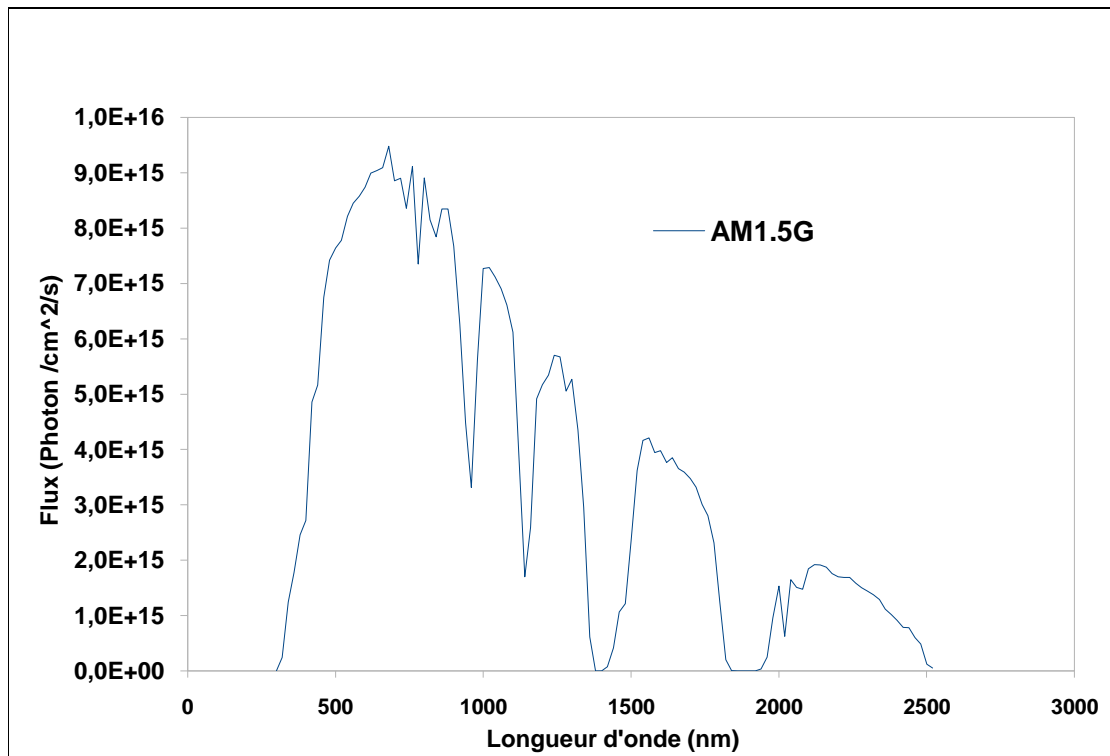


Figure IV-3: Le spectre solaire AM1.5G utilisé dans ce travail par l'AMPS-1D. [10]

### IV.3.2.3. Paramètres de modélisation

Les paramètres de modélisation sont : le type de mode de fonctionnement, le maillage (grid spacing) pour les calculs numériques, la tension de polarisation pour laquelle la caractéristique J-V et la réponse spectrale devraient être générés.

Le logiciel d'AMPS-1D peut fonctionner en deux modes distincts: le mode de la densité d'état ou DOS (Density Of States) ou le mode de la durée de vie (Life time). Une description des deux modes peut être trouvée dans le manuel d'AMPS [9].

- **Le mode de la durée de vie:** ce mode accepte les entrées sous forme de durée de vie des porteurs, qui sont supposés constants, indépendants de la lumière et de la tension de polarisation. Le processus de recombinaison sera modélisé par un modèle linéaire donné par la relation  $R_n = \Delta n / \tau_n$  (type p) et  $R_p = \Delta p / \tau_p$  (Type n) avec  $\Delta n$  ( $\Delta p$ ) : la densité des porteurs (électrons (trous)) en excès dans la bande de conduction (valence) par rapport à la concentration à l'équilibre thermique  $n_0$  ( $p_0$ ).  $\tau_n$  et  $\tau_p$ : les durées de vie des électrons et des trous, respectivement.
- **Le mode DOS ( Density Of Stats ):** ce mode permet de définir multiples états de défauts, en utilisant les densités, les distributions d'énergie, et les sections de capture. En se basant sur ces informations la recombinaison et les défauts sont calculés en utilisant le formalisme de Shockley-Read-Hall. Si le matériau utilisé a une densité de défauts importants tels que les matériaux amorphes ou polycristallin, l'utilisation du modèle DOS devient indispensable. Dans ce travail le mode DOS a été utilisé. Le maillage a été choisi pour être plus dense dans les couches minces où des changements plus rapides se produisent dans la structure de la bande afin d'obtenir une bonne résolution.

### IV.3.3. Avantages et inconvénients de l'AMPS-1D

Les majeurs inconvénients de ce logiciel sont : l'absence du traitement d'interfaces et l'obligation de l'utilisation manuelle où toutes les informations doivent être entrées à la main (spectre solaire, coefficient d'absorption...) comme le montre la figure VI-4. Cependant, il est très stable en général bien que les dispositifs complexes peuvent introduire des instabilités. Il possède également, une bonne interface utilisateur, notamment un programme de traçage flexible.

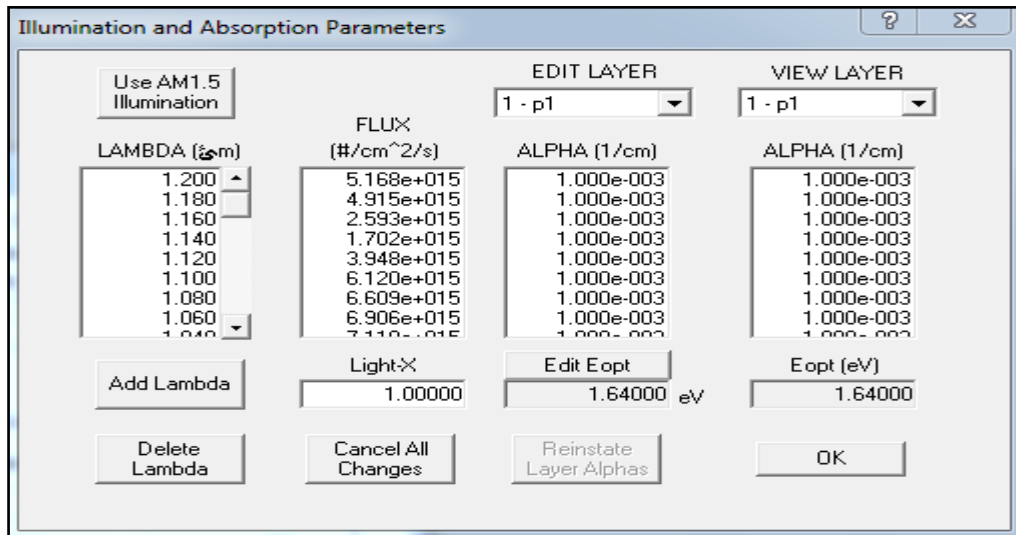


Figure IV-4: Fenêtre d'AMPS-1D pour introduire le flux du spectre solaire et coefficients d'absorption des matériaux.

### IV.3.4. Paramètres de modélisation

Les équations et les modèles utilisés pour calculer les différents paramètres des alliages  $In_xGa_{1-x}N$  dans cette étude sont les suivants:

- **Energie de bande interdite ( $E_g$ ):**

L'énergie de bande interdite  $E_{gIn_xGa_{1-x}N}$  de l'alliage ternaire, comme nous avons montré dans le deuxième chapitre, est donné par la relation suivante [5,6]:

$$E_{gIn_xGa_{1-x}N} = (1 - x)E_{gGaN} + xE_{gInN} - bx(1 - x) \tag{IV-1}$$

Avec:  $E_{gGaN} = 3.4 \text{ eV}$  et  $E_{gInN} = 0.7 \text{ eV}$  .  
 $x$  représente la fraction molaire d'Indium.  
 $b$  paramètre de courbure, ici  $b = 1,43 \text{ eV}$ .

- **Coefficient d'absorption ( $\alpha$ ):**

Le coefficient d'absorption de l'alliage  $In_xGa_{1-x}N$  peut aussi être exprimé en fonction de l'énergie des photons selon l'équation [7,11]:

$$\alpha(\mu m^{-1}) = A \sqrt{\frac{1.24}{\lambda} - E_g(x)} \tag{IV-2}$$

$A$  est un paramètre d'ajustement;  $A = 2,2 \times 10^5 \mu m^{-1} (\text{eV})^{-0.5}$  .

- **Affinité électronique ( $\chi$ )**

L'affinité électronique de l'alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  est calculée en fonction d'affinité électronique du binaire GaN et gap d'énergie interdite  $E_g(x)$  selon la relation suivante [7,8]:

$$\chi(E_{g\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}) = \chi_{\text{GaN}} + 0.7(E_{g\text{GaN}} - E_{g\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}) \quad (\text{IV-3})$$

ou  $\chi_{\text{GaN}} = 4,1\text{eV}$

- **Constante diélectrique ( $\epsilon_r$ ):**

La constante diélectrique ( $\epsilon_r$ ) nommée aussi permittivité relative est donnée en fonction de  $x$  par la relation [8]:

$$\epsilon_r(x) = (1 - x) \epsilon_{\text{GaN}} + x \epsilon_{\text{InN}} \quad (\text{IV-4})$$

ou  $\epsilon_{\text{GaN}}=10,4$  et  $\epsilon_{\text{InN}}=14,6$  sont les constantes diélectriques du GaN et InN respectivement.

- **Densités effectives d'état:**

Les densités effectives d'état  $N_c$  et  $N_v$  sont exprimées par [8,9]:

$$N_c = [0,9x + 2,3(1 - x)] 10^{18} \quad (\text{IV-5})$$

$$N_v = [5,3x + 1,8(1 - x)] 10^{19} \quad (\text{IV-6})$$

- **Modèle de mobilité:**

Les dopages dans le GaN et l'InGaN sont très élevés, les mobilités  $\mu$  des porteurs dépendent des concentrations de dopages. En utilisant le modèle de Caughey Thomas, la mobilité est définie par l'expression [10] :

$$\mu_i(N) = \mu_{\text{min},i} + \frac{\mu_{\text{max},i} - \mu_{\text{min},i}}{1 + \left(\frac{N}{N_{g,i}}\right)^{\gamma_i}} \quad (\text{IV-7})$$

Avec:

$i$  représentant soit les électrons ( $i=n$ ), soit les trous ( $i=p$ ).

$N$ : Concentration de dopage en  $\text{cm}^{-3}$ .

$N_g$ : Dopage critique dépendant du matériau en  $\text{cm}^{-3}$ .

$\gamma_i$ : Une constante sans dimension.

Les valeurs de ces différents paramètres sont rassemblées dans le tableau IV-1 pour le GaN et l'InN. Une interpolation linéaire est ensuite utilisée pour obtenir les paramètres du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

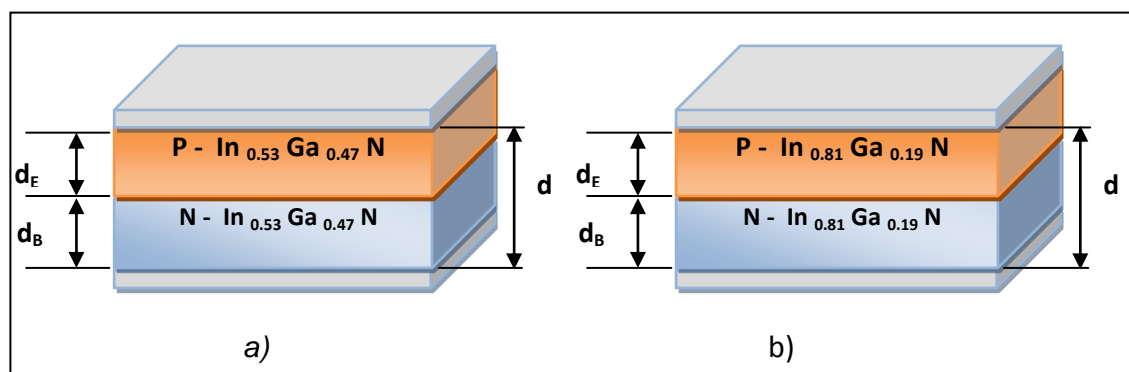
**Tableau IV-1:** Paramètres utilisés dans le calcul de la mobilité des porteurs en fonction de la concentration de dopage dans cette étude. [10]

Paramètres	$\mu_{\max, i}$	$\mu_{\min, i}$	$N_{g,i}$	$\gamma_i$
Electron ( $i = n$ )	1000	55	$2 \cdot 10^{17}$	1
Trou ( $i = p$ )	170	3	$3 \cdot 10^{17}$	2

### IV.3.5 Modélisation des cellules à simple jonction PN

#### IV.3.5.1 Description de la structure PN

La structure modélisée, présentée sur la figure IV-5, est une cellule solaire homojonction à base d'InGaN d'épaisseur totale  $d=1.5 \mu\text{m}$ , composée d'une couche InGaN dopée P à une concentration  $N_A$  (Emetteur-Accepteur), d'épaisseur  $d_E$  et d'une couche InGaN dopée N (Base-Donneur) à une concentration  $N_D$  et d'épaisseur  $d_B$ . Elle peut être réalisée en utilisant une couche tampon de GaN fortement dopée N entre le substrat et la cellule [32, 33].



**Figure IV-5:** Structure de la cellule: a) 53% d'Indium, b) 81% d'Indium.

Les paramètres des deux matériaux utilisés et leurs valeurs pour la modélisation sont rassemblés dans le tableau IV-2.

**Tableau IV-2:** Paramètres du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  à 300 K pour une concentration de 53% et 81% d'Indium.

Paramètre	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$		$\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$	
	P	N	P	N
$E_g$ (eV)	1.61	1.61	0.99	0.99
$\epsilon_r$	12.63	12.63	13.8	13.8
$N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5.10^{16}$ à $10^{19}$	/	$5.10^{16}$ à $10^{19}$	/
$N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	/	$5.10^{16}$ à $10^{19}$	/	$5.10^{16}$ à $10^{19}$
$\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	En fonction de dopage			
$\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )				
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.56 \cdot 10^{18}$	$1.56 \cdot 10^{18}$	$1.17 \cdot 10^{18}$	$1.17 \cdot 10^{18}$
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3.65 \cdot 10^{19}$	$3.65 \cdot 10^{19}$	$4.63 \cdot 10^{19}$	$4.63 \cdot 10^{19}$
$\chi$ (eV)	5.35	5.35	5.78	5.78
$d$ (nm)	500	1000	500	1000

### IV.3.5.1 Procédure de modélisation

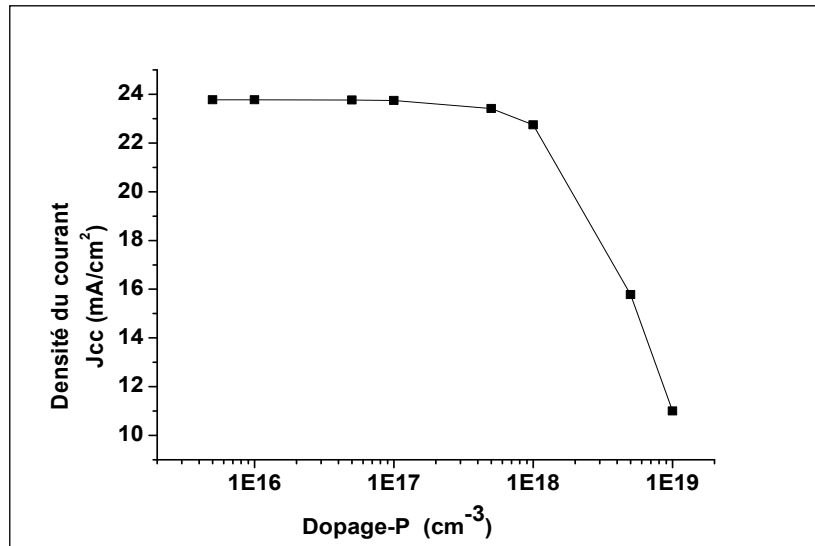
Afin d'optimiser les performances de notre cellules, nous avons calculé les paramètres technologiques (dopage et épaisseur) pour chacune des régions P et N qui doivent donner les meilleures caractéristiques de sortie.

### IV.3.5.2. Effet du dopage de la couche émettrice

Pour une épaisseur totale de  $1.5\mu\text{m}$  de la cellule, nous avons calculé les rendements de la cellule ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ ) pour différentes valeurs de la concentration du dopage  $N_A$  de l'émetteur (couche P) allant de  $5.10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et des valeurs du rapport  $N_A/N_D$  de 0.25, 0.5 et 1. Les résultats sont reportés dans la figure III-8.

Les figures III-6, III-7 illustrent l'influence du dopage  $N_A$  de l'émetteur sur le courant de court-circuit, sur la tension à circuit ouvert et le rendement de la cellule.

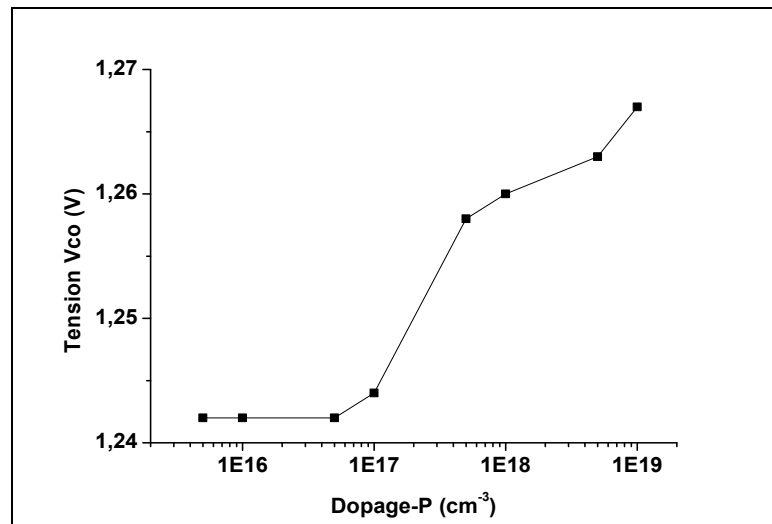
D'après la figure IV-6, on peut remarquer une diminution négligeable de la densité du courant de court circuit ( $J_{cc}$ ) pour des dopages de l'ordre de  $10^{16}$ , mais pour des plus forts dopages, le courant a une très faible valeur. Cela peut être expliqué par l'augmentation de la concentration du dopage  $N_A$  qui entraîne une diminution de la mobilité des porteurs, provoquera une diminution du coefficient de diffusion des porteurs  $D$  et c'est ainsi que la



**Figure IV-6:** Densité du courant de court circuit de la cellule  $In_{0.53}Ga_{0.47}N$  en fonction du dopage de l'émetteur  $N_A$  ( $N_A = 0.25N_D$ ).

longueur de diffusion diminue, conduisant à une mauvaise collecte des porteurs de charges libres générés par la lumière.

Cependant, la tension à circuit ouvert  $V_{CO}$  croît légèrement avec la croissance de la concentration du dopage  $N_A$ , comme le montre la figure IV-7.



**Figure IV-7:** Tension à circuit ouvert de la cellule  $In_{0.53}Ga_{0.47}N$  en fonction du dopage de l'émetteur  $N_A$  ( $N_A = 0.25N_D$ ).

De même façon les rendements en fonction de  $N_A$  pour différents rapports de  $N_A/N_D$  sont étudiés. Le rendement, comme l'indique la figure IV-8, reste presque constant de  $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  puis diminue pour les valeurs croissantes de la concentration de dopage  $N_A$  en

passant par un maximum  $\eta=26.585\%$  à  $N_A=10^{17}\text{cm}^{-3}$  pour un rapport  $N_A/N_D=0.25$ , c'est-à-dire  $N_D=4.10^{17}\text{cm}^{-3}$

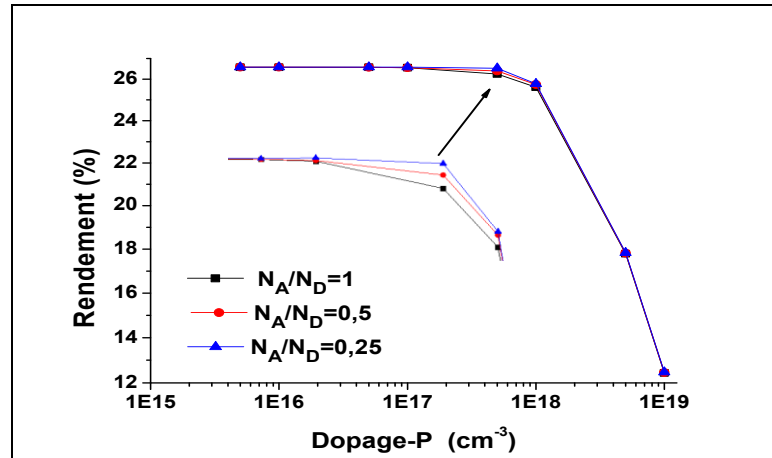


Figure IV-8: Rendement de la cellule  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  en fonction de dopage de l'émetteur  $N_A$ .

#### IV.3.5.3. Effet d'épaisseur de la couche émettrice

Avec une concentration du dopage  $N_A=10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_D=4.10^{17}\text{cm}^{-3}$  et une épaisseur totale de la cellule de  $1.5\mu\text{m}$ , le rendement  $\eta$  et la densité de courant de court circuit  $J_{cc}$  correspondants sont calculés en faisant varier l'épaisseur  $d_E$  de l'émetteur (couche P) de 50 nm à 500nm. Ces deux paramètres en fonction de l'épaisseur  $d_E$  sont illustrés dans les figures IV-9 et IV-10. On a trouvé que le rendement  $\eta$  et la densité de courant de court circuit ont des valeurs crêtes pour une même épaisseur  $d_E=400\text{nm}$ .

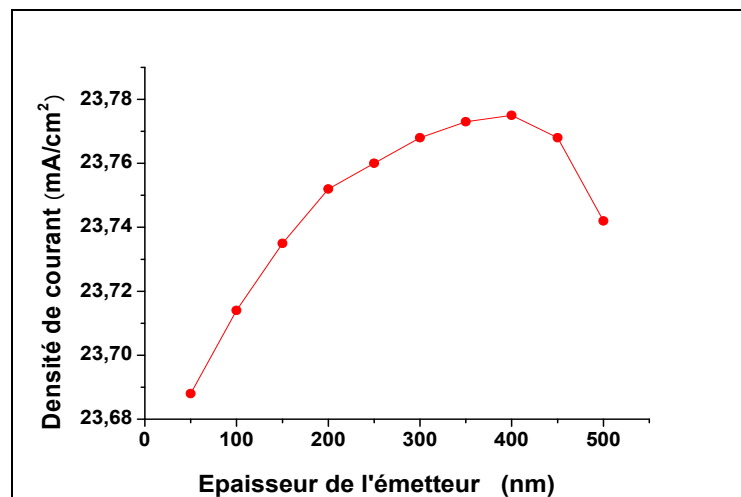
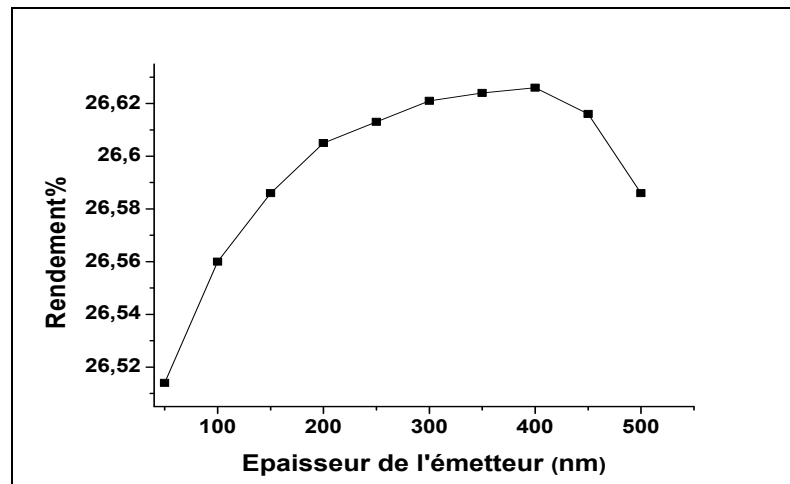


Figure IV-9: Densité du courant de court circuit de la cellule  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  en fonction d'épaisseur de l'émetteur  $d_E$ .





*Figure IV-10: Rendement de la cellule  $In_{0.53}Ga_{0.47}N$  en fonction d'épaisseur de l'émetteur  $d_E$ .*

D'une part, on peut remarquer que la densité du courant  $J_{cc}$  croît lorsque l'épaisseur de la couche P croît en raison de l'amélioration du rendement de collecte résultant de la diminution de la distance entre la surface et la zone de charge d'espace. Cela est dû grâce à une augmentation des recombinaisons électrons-trous qui permet une meilleure absorption des photons. Arrivant à un certain niveau, la densité de courant se fixe pour commencer à se dégrader, vu qu'une très grande épaisseur de la couche va impliquer une réduction du courant à cause de la recombinaison des photons non collectés.

D'autre part, le rendement de collecte de la zone de charge d'espace est affaibli lorsqu'elle sera trop près de la surface où intervient l'effet de la recombinaison en surface alors  $J_{cc}$  décroît. En conséquence, le rendement et la densité de courant ont une variation similaire, lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente, les deux augmentent d'abord puis diminuent à la fois. La courbe de la figure IV-10 montre que le meilleur rendement est obtenu avec 400 nm d'épaisseur de l'émetteur.

#### IV.3.5.4. Performances de la cellule $In_{0.53}Ga_{0.47}N$

Les meilleures performances de la cellule  $In_{0.53}Ga_{0.47}N$  sont obtenues pour des concentrations du dopage  $N_A=10^{17}cm^{-3}$ ,  $N_D=4.10^{17}cm^{-3}$  et une épaisseur de 400nm de l'émetteur et 1100nm d'épaisseur de la base. Les valeurs optimales des paramètres de la cellule  $In_{0.53}Ga_{0.47}N$  dont la caractéristique  $I(V)$  est représentée sur la figure IV-11 sont:  $\eta_l = 26.626\%$ ,  $J_{cc} = 23.775 mA/cm^2$ ,  $V_{CO} = 1.244V$  et  $FF = 90\%$ .

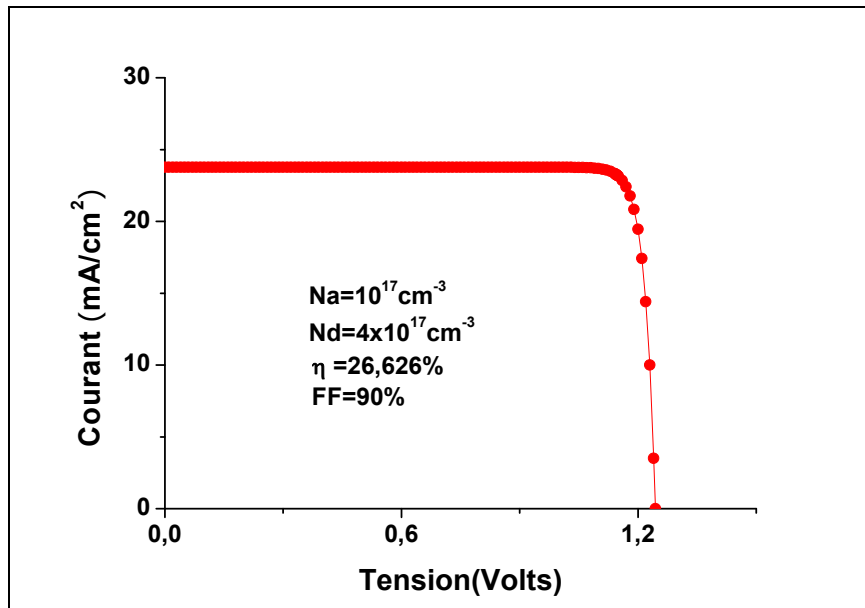


Figure IV-11: Caractéristique courant-tension de la cellule  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ .

#### IV.3.5.5. Performances de la cellule $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$

De même façon, les meilleures performances de la cellule  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$  sont obtenues pour des concentrations du dopage  $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D=4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et une épaisseur de 400nm de l'émetteur et 1100nm d'épaisseur de la base. Les valeurs optimales des paramètres de la cellule  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.16}\text{N}$  dont la caractéristique I(V) est représentée sur la figure IV-12 sont:  $\eta=26.882\%$ ,  $J_{cc}=46.582 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{CO}=0.684\text{V}$  et  $\text{FF}=84.3\%$ .

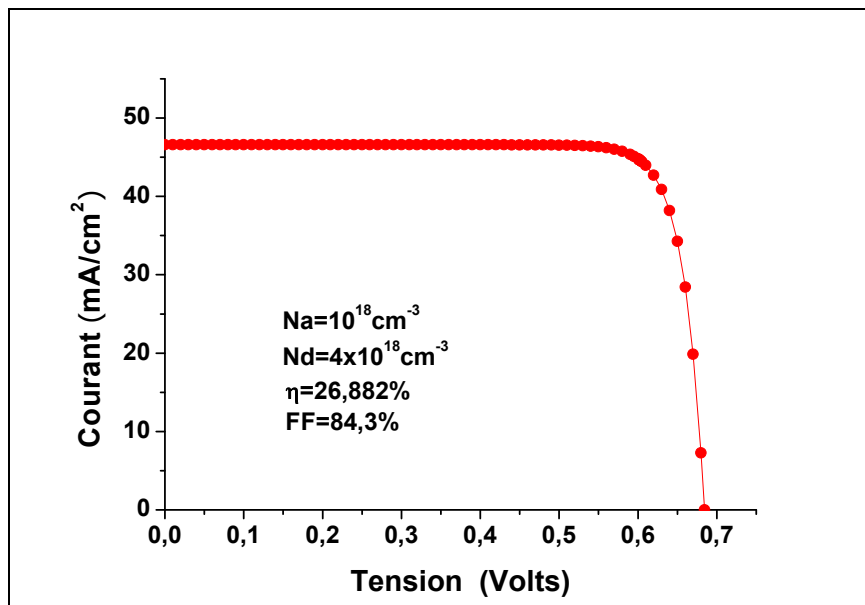


Figure IV-12: Caractéristique courant-tension de la cellule  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ .

### IV.3.6. Modélisation des cellules à simple jonction PIN

#### IV.3.6.1. Description de la structure PIN étudiée

La structure PIN proposée est une cellule solaire mono jonction à base d'InGaN d'épaisseur totale  $d=1.5\mu\text{m}$ , composée d'une couche P (Emetteur-Accepteur) d'épaisseur  $d_E$  dopée à une concentration  $N_A$ , une couche intrinsèque I (non dopée) d'épaisseur  $d_i$  et d'une couche N (Base-Donneur) d'épaisseur  $d_B$  dopée à une concentration  $N_D$ .

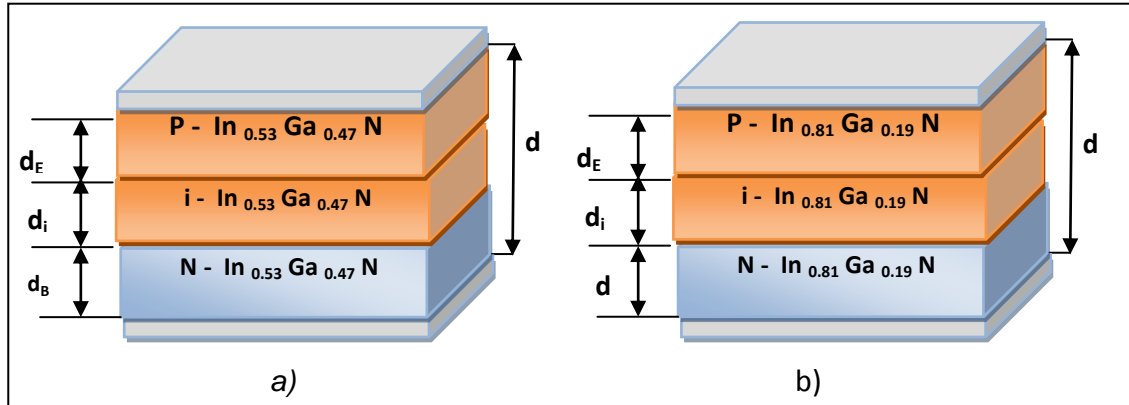


Figure IV-13 Structure PIN: a) 53% d'Indium, b) 81% d'Indium

Les paramètres des matériaux utilisés et leurs valeurs sont rassemblés dans le tableau IV-3.

Tableau IV-3: Paramètres du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  à 300 K.

Paramètre	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$			$\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$		
	P	i	N	P	i	N
$E_g$ (eV)	1.61	1.61	1.61	0.99	0.99	0.99
$\epsilon_r$	12.63	12.63	12.63	13.8	13.8	13.8
$N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5 \cdot 10^{16}$ à $10^{19}$	/	/	$5 \cdot 10^{16}$ à $10^{19}$	/	/
$N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	/	/	$5 \cdot 10^{16}$ à $10^{19}$	/	/	$5 \cdot 10^{16}$ à $10^{19}$
$\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	En fonction de dopage	1000	En fonction de dopage	1000	En fonction de dopage	
$\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )		170		170		
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.56 \cdot 10^{18}$	$1.56 \cdot 10^{18}$	$1.56 \cdot 10^{18}$	$1.17 \cdot 10^{18}$	$1.17 \cdot 10^{18}$	$1.17 \cdot 10^{18}$
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3.65 \cdot 10^{19}$	$3.65 \cdot 10^{19}$	$3.65 \cdot 10^{19}$	$4.63 \cdot 10^{19}$	$4.63 \cdot 10^{19}$	$4.63 \cdot 10^{19}$
$\chi$ (eV)	5.35	5.35	5.35	5.78	5.78	5.78
$d$ (nm)	50 à 600	5 à 600	ajusté	50 à 500	5 à 500	ajusté

#### IV.3.6.2. Procédure de modélisation

Pour les structures PIN, nous avons étudié l'influence d'épaisseur de la couche intrinsèque ( $d_i$ ) sur les performances de la cellule. Pour cela, nous avons varié cette épaisseur de 50 nm

à 600 nm, afin de déterminer une épaisseur qui doit donner des meilleures caractéristiques de sortie. Concernant les paramètres technologiques (dopage et épaisseur) pour chacune des régions P et N Nous avons utilisé les mêmes valeurs optimales trouvées dans la structure PN. Les résultats de cette étude sont illustrés sur la figure IV-14 et la figure IV-15 représente l'effet d'épaisseur  $d_i$  de la couche intrinsèque sur le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert de la cellule homojonction ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ ) de structure PIN. La figure IV-17 et la figure IV-18 représente l'effet d'épaisseur  $d_i$  de la couche intrinsèque sur le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert de la cellule homojonction ( $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ ) de structure PiN.

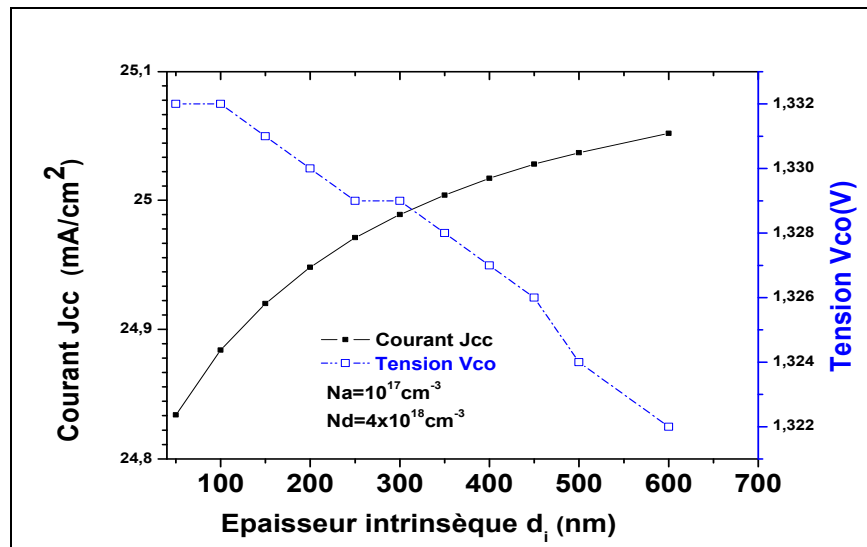


Figure IV-14 Le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert de la cellule Homojonction (PIN  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ ) en fonction d'épaisseurs intrinsèque .

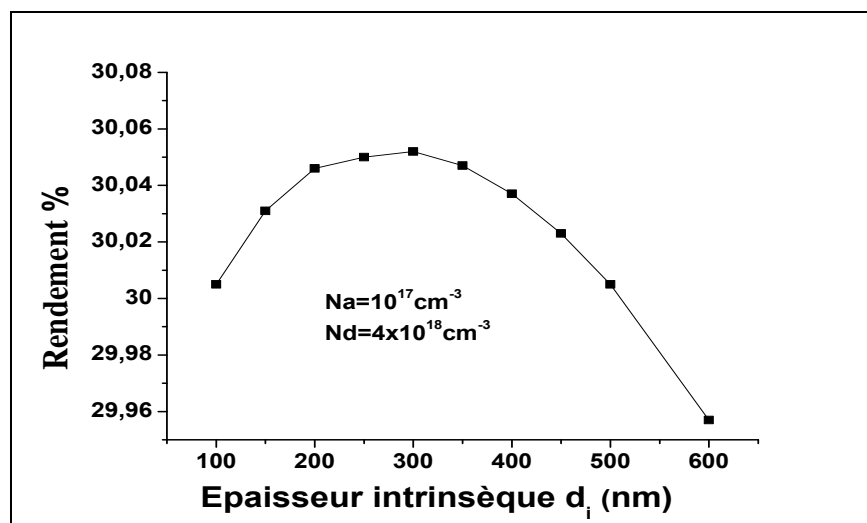
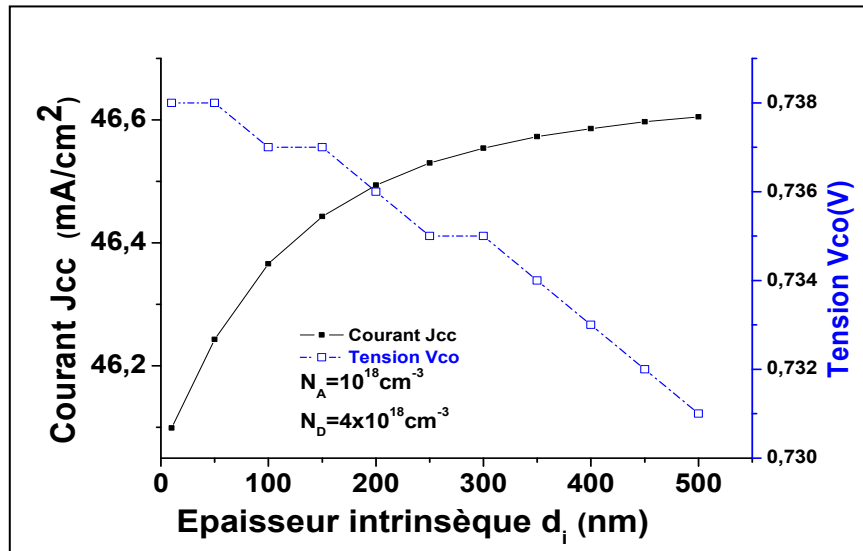
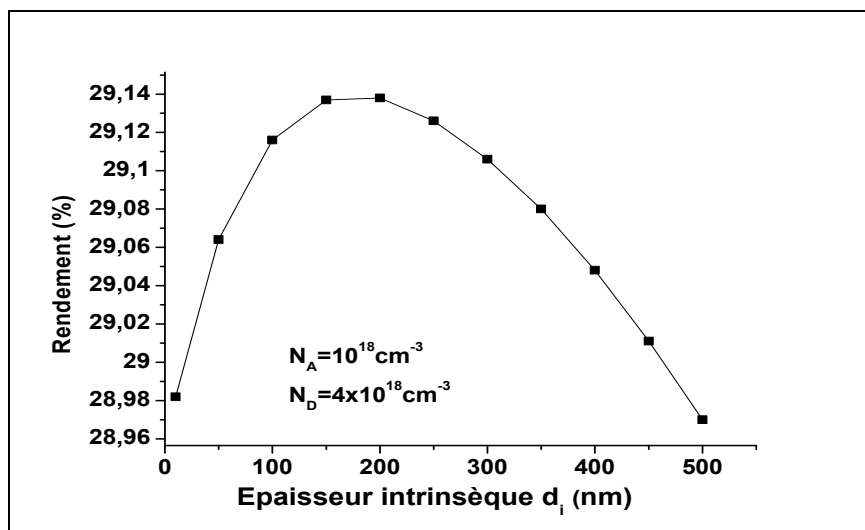


Figure IV-16: Rendement de la cellule homojonction (PIN  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ ) en fonction d'épaisseurs intrinsèque.



**Figure IV-17** Le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert de la cellule homojonction PIN ( $\text{In}_{0,81}\text{Ga}_{0,19}\text{N}$ ) en fonction d'épaisseurs  $d_i$  de la couche intrinsèque.



**Figure IV-18:** Rendement de la cellule homojonction PIN ( $\text{In}_{0,81}\text{Ga}_{0,19}\text{N}$ ) en fonction d'épaisseur  $d_i$  de la couche intrinsèque.

D'après ces allures, on remarque que la densité de courant est proportionnelle à l'épaisseur de la couche intrinsèque. Cela est dû à l'augmentation des recombinaisons électrons-trous qui permet une meilleure absorption des photons.

Pour la courbe de la tension en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque, on remarque que la tension est inversement proportionnelle à l'épaisseur contrairement au courant. On peut

justifier cela par le gap d'énergie ou bien par l'augmentation de la densité de défauts présent dans le matériau.

### IV.3.6.3 Performances de la cellule PIN $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$

Les meilleures performances de la cellule PIN ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ ) sont obtenues pour des concentrations du dopage  $N_A = 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_D = 4 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , une épaisseur de 200nm de l'émetteur, une épaisseur de 1000nm de la base et une épaisseur de 300nm de la couche intrinsèque, les valeurs optimales des paramètres de la cellule dont la caractéristique I(V) est représentée sur la figure IV-19 sont  $\eta = 30.052\%$ ,  $J_{cc} = 24.989\text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{CO} = 1.329\text{V}$  et  $\text{FF} = 90.5\%$ .

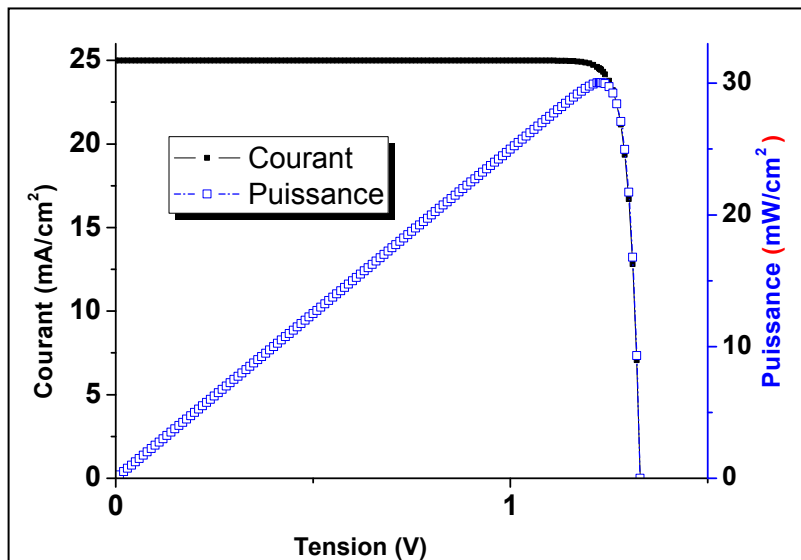


Figure IV-19: Caractéristiques courant- tension et puissance-tension obtenus avec les paramètres optimaux de la cellule PIN  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ .

### IV.3.6.4 Performances optimales de la cellule PIN $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$

De même façon, les meilleures performances de la cellule PIN ( $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ ) sont obtenues pour des concentrations du dopage  $N_A = 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_d = 4 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$  et une épaisseur de 100nm de l'émetteur et 1200nm d'épaisseur de la base et une épaisseur de 200nm de la couche intrinsèque, les valeurs optimales des paramètres de la cellule  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$  dont la caractéristique I(V) est représentée sur la figure IV-20 sont  $\eta = 29.138\%$ ,  $J_{cc} = 46.494\text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{CO} = 0.736\text{V}$  et  $\text{FF} = 85.1\%$ .

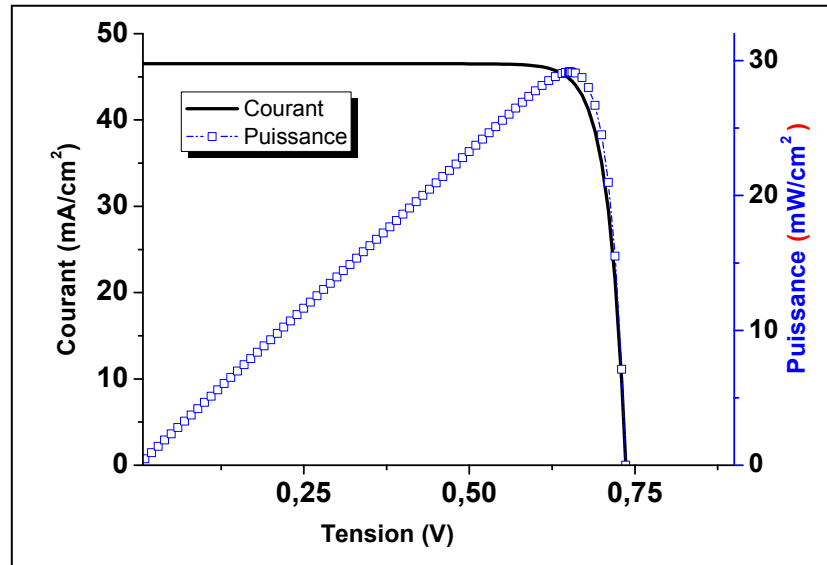


Figure IV-20: Caractéristiques courant- tension et puissance-tension obtenues avec les paramètres optimaux de la cellule  $In_{0,81}Ga_{0,19}N$ .

### IV.3.7 Comparaison entre la structure PN et PIN

Nous avons présenté sur la figure IV-21, les caractéristiques courant-tension de deux structures obtenues avec les paramètres optimaux des deux matériaux. Nous constatons que l'on obtient avec la structure PIN, des performances légèrement supérieures à celles obtenues dans la structure PN, avec un rendement de 30,052% pour la PIN contre 26,626% pour la PN pour le matériau  $In_{0,53}Ga_{0,47}N$  et un rendement de 29,138% pour la PIN contre 26,882% pour la PN pour le matériau  $In_{0,81}Ga_{0,19}N$ . L'écart de performance entre les structures s'explique par le fait que l'on ait, pour la structure PIN, un  $I_{CC}$  et un  $V_{CO}$  un peu plus élevés que pour la structure PN. En effet, la couche intrinsèque de la structure PIN permet d'avoir une plus grande ZCE et améliorer ainsi la génération des paires électron-trou. L'augmentation de  $I_{CC}$  est donc due à l'augmentation de la concentration des porteurs photogénérés et celle du  $V_{CO}$  à l'augmentation de la largeur de la ZCE.

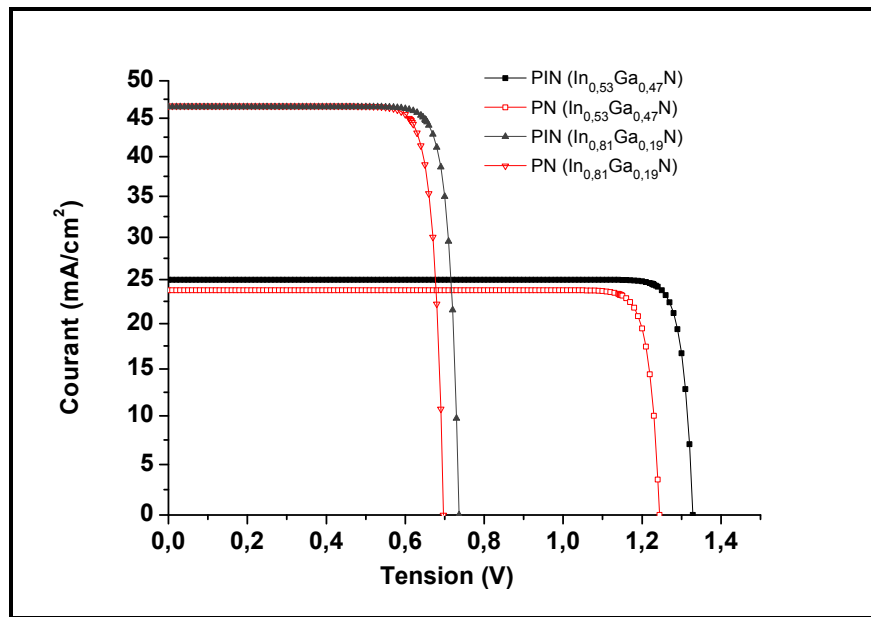


Figure IV-21: Caractéristiques courant- tension obtenues avec les paramètres optimaux des cellules  $In_{0.53}Ga_{0.47}N$  et  $In_{0.81}Ga_{0.19}N$  pour les deux structures.

#### IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une identification des cellules multijonctions. Puis, nous avons présenté les performances des cellules solaires conventionnelles à base d'InGaN de structures PN et PIN simulées à l'aide du logiciel AMPS-1D et qui sont les composants des cellules solaires tandem que nous les étudierons dans le prochain chapitre. Finalement, nous avons montré par comparaison que les performances de la structure PIN sont supérieures à celles obtenues dans la structure PN.



## Bibliographie de chapitre IV

- [1] W. Shockley, H.J. Queisser. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. 1961, Vol. 32, 510.
- [2] S. Rühle,. "Tabulated Values of the Shockley-Queisser Limit for Single Junction Solar Cells". *Solar Energy*. 130: 139–147, 08-02-2016.
- A. De Vos. Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 13, 839–846. 2000
- [3] M. Green, K.Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 48). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 24(7):905–913, Juil 2016
- [4] M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, N. Ekins-Daukes "Multi-junction III–V solar cells: current status and future potential" *Solar Energy* 79 78–85, 2005.
- [5] M. Green. *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer. P- 65. 2003.
- [6] R.M. Swanson, « The Promise of Concentrators », in *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 8, 2000.
- [7] M. Green, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A.W.Y. Ho-Baillie. Solar cell efficiency tables (version 54). *Prog Photovolt Res Appl.* 2019;27:565–575.  
<https://doi.org/10.1002/pip.3171>
- [8] Z. Xiaobin, W. Xiaoliang, X. Hongling, Y. Cuibai, R. Junxue, W. Cuimei, H. Qifeng, J. Li. Simulation of  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$  single-junction solar cell. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 40(23) :7335, 2007.
- [9] S. J. Fonash, « Analysis of Microelectronic and Photonic Structures (AMPS) software was developed at Pennsylvania State University under the direction of S.J. Fonash with funding from the Electric Power Research Institute ». <http://www.cneu.psu.edu/amps/>.
- [10] AMPS -1D Manual for Windows '95/NT, The Electronic Materials and Processing Research Laboratory at the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802
- [11] S. M. Sze and K. N. Kwok, « Physics of semi-conductors devices », Third Edition. Wiley Inter science publication, Jhon Wiley & Sons, Inc, 2007.

---

CHAPITRE V  
SIMULATION DES  
CELLULES  
TANDEMS A BASE  
D'InGaN

---

## Simulation des cellules tandems à base d'InGaN

### V.1. Introduction:

La réalisation des cellules solaires à haut rendement et à faible coût, revient à demander aux sociétés et aux centres de recherches de trouver de nouvelles architectures (comme les cellules multi-jonctions, les Pérovskites, ...) et de faire des études théoriques plus approfondies pour améliorer les performances et les caractéristiques des cellules solaires avant de passer à leurs réalisations industrielles. Dans ce chapitre, nous allons modéliser des cellules photovoltaïques tandems à base d'InGaN à l'aide du logiciel AMPS-1D. Nous étudierons les performances des cellules tandems avec différentes structures PN/PN et PIN/PIN, sans et avec une jonction tunnel, ainsi que l'influence de leurs paramètres. Afin d'obtenir un système optimisé, il faudra également optimiser l'absorption de la lumière avec une couche antireflet, une couche fenêtre, texturation, ainsi que la collecte du courant, la réduction au maximum des pertes, etc... Les jonctions PN et PIN, qui constituent ces cellules tandems, sont étudiées et optimisées dans le chapitre précédent de ce travail.

### V.2. Modélisation d'une cellule tandem à base d'InGaN

Afin d'obtenir un rendement élevé, nous avons choisi une concentration d'Indium de 53 % dans l'InGaN, avec un gap de 1,61 eV pour la cellule supérieure (top cell) et 81% d'Indium avec un gap de 0,99 eV pour la cellule inférieure (bottom cell) dans les différentes structures étudiées, justifiant notre choix par l'étude de la limite théorique du rendement d'une cellule tandem à double jonctions, réalisée par Meillaud et al, se basant sur le modèle de Green et Kiess, comme a été montré dans le premier chapitre et même par d'autres auteurs, comme l'étude de A. De Vos [1] réalisé en 1980. Nous allons commencer par une modélisation de la structure PN/PN sans et avec une jonction tunnel afin d'évaluer le rôle de cette jonction tunnel. Et par la suite, une modélisation d'une structure PIN/PIN aussi avec ou sans jonction tunnel.

#### V.2.1 Modélisation de la structure tandem PN/PN

##### V.2.1.1. Description de la structure tandem PN/PN

Les structures (A) et (B), représentées sur la figure V-1, sont des cellules solaires à multi-jonctions à base d'InGaN et d'épaisseur totale  $d=3\mu\text{m}$ , composée de deux sous-cellules (deux jonctions PN), chaque sous-cellule est composée d'une couche P d'épaisseur  $d_E$  dopée à une

concentration  $N_A$  et une couche N d'épaisseur  $d_B$  dopée à une concentration  $N_D$ . Dans la structure (B), les sous-cellules sont connectées électriquement en série via une jonction tunnel d'épaisseur  $d_{JT}$ . Elle est également une jonction PN à base d'InGaN disposée de manière inverse par rapport aux jonctions destinées à la production du photocourant [2].

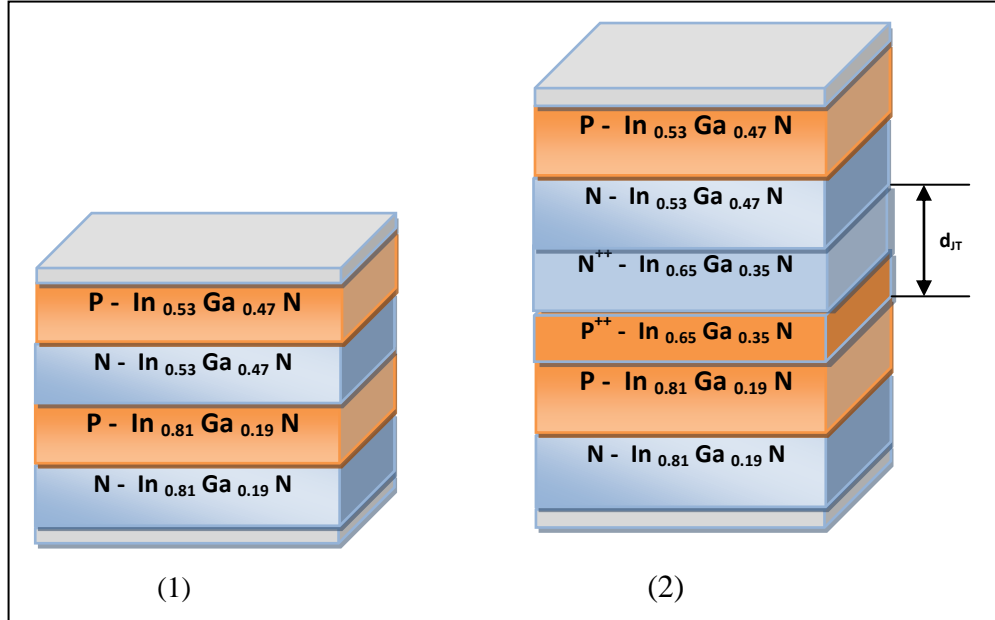


Figure V-1: Structure de cellules PN/PN: 1) sans jonction tunnel, 2) avec jonction tunnel.

Les paramètres des matériaux utilisés sont rassemblés dans les tableaux suivants :

Tableau V-1: Paramètres du matériau  $In_xGa_{1-x}N$  à  $300^\circ K$  pour la cellule (A).

Structure (A)				
Paramètres	$In_{0.53}Ga_{0.47}N$		$In_{0.81}Ga_{0.19}N$	
	P	N	P	N
$E_g$ (eV)	1.61		0.99	
$\epsilon\epsilon_r$	12.63		13.8	
$N_A$ ( $cm^{-3}$ )	$10^{16}$	/	$10^{16}$	/
$N_D$ ( $cm^{-3}$ )	/	$10^{18}$	/	$10^{18}$
$\mu_n \mu_n$ ( $cm^2/V.s$ )	En fonction de dopage		En fonction de dopage	
$\mu_p \mu_p$ ( $cm^2/V.s$ )				
$N_c$ ( $cm^{-3}$ )	$1.56 \cdot 10^{18}$		$1.17 \cdot 10^{18}$	
$N_v$ ( $cm^{-3}$ )	$3.65 \cdot 10^{19}$		$4.63 \cdot 10^{19}$	
$\chi$ (eV)	5.35		5.78	
d (nm)	50 à 500	ajustée	50 à 500	ajustée

**Tableau V-2:** Paramètres du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  à 300°K pour la cellule (B).

Structure (B)						
Paramètres	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$		$\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ (JT )		$\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$	
	P	N	N <sup>+</sup>	P <sup>+</sup>	P	N
E <sub>g</sub> (eV)	1.61		1.32		0.99	
ε <sub>r</sub>	12.63		13.13		13.8	
N <sub>A</sub> (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>16</sup>	/	/	10 <sup>19</sup>	10 <sup>16</sup>	/
N <sub>D</sub> (cm <sup>-3</sup> )	/	10 <sup>18</sup>	10 <sup>19</sup>	/	/	10 <sup>18</sup>
μ <sub>n</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)	En fonction de dopage					
μ <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)						
N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.56 10 <sup>18</sup>		1.39 10 <sup>18</sup>		1.17 10 <sup>18</sup>	
N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )	3.65 10 <sup>19</sup>		4.075 10 <sup>18</sup>		4.63 10 <sup>19</sup>	
χ (eV)	5.35		5.56		5.78	
d (nm)	50 à 500	ajustée	5 à 30		50 à 500	ajustée

Pour obtenir l'effet tunnel, les épaisseurs de couches formant la jonction tunnel, doivent être très fines et fortement dopées (P<sup>++</sup>N<sup>++</sup>) et l'épaisseur de ZCE se trouve très réduite. Les porteurs de charges (électrons et trous) peuvent ainsi traverser la barrière de potentiel par effet tunnel pour passer d'une sous-cellule à une autre. Par ailleurs, les sous-cellules étant connectées en série, le courant fourni par la cellule sera limité au plus faible des courants fournis par les deux sous-cellules.

### V.2.1.2. Procédure

Afin d'optimiser les performances de cellules, nous avons cherché les paramètres technologiques (dopage et épaisseur) pour chacune des régions P, N et de la jonction tunnel qui doivent assurer les meilleures caractéristiques de sortie en utilisant les résultats trouvés dans le précédent chapitre.

### V.2.1.3. Résultats et discussions

Nous avons calculé les rendements des deux cellules pour différentes valeurs de la concentration de dopage N<sub>A</sub> de la couche P allant de 10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> à 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> pour un dopage N<sub>D</sub> = 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>, pour différentes épaisseurs d<sub>E</sub> (10nm, 100nm, 200nm et 400nm). Les sous-cellules de la structure (B) sont connectées électriquement en série via une jonction tunnel

( $P^{++}N^{++}$ ) avec une même concentration de dopage de  $5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et une épaisseur  $d_{JT}=20 \text{ nm}$ . Les résultats sont reportés dans la figure V-4. Les figures V-2 et V-3 illustrent l'influence du dopage  $N_A$  de la couche P et son épaisseur sur le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert de la cellule (A) et (B) respectivement.

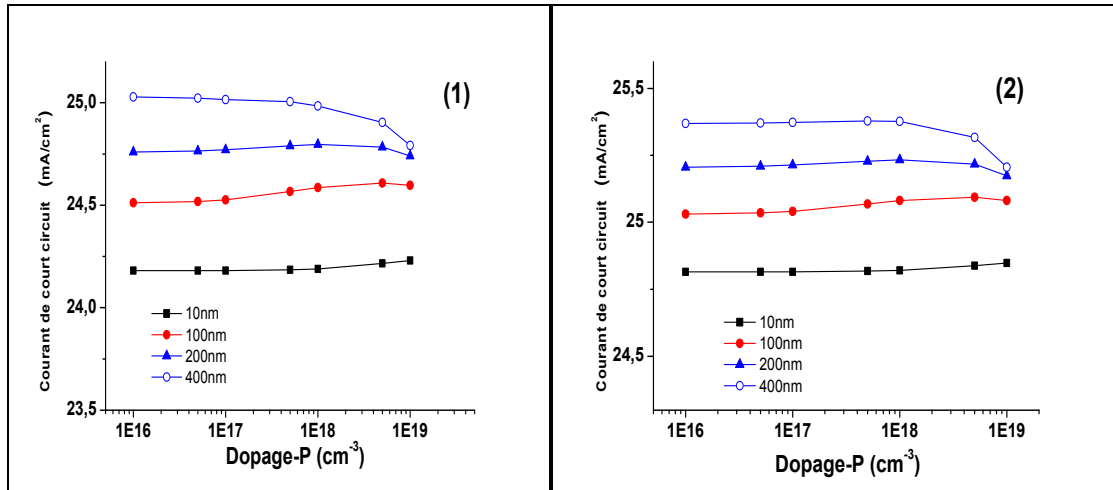


Figure V-2: Densité de courant de court circuit en fonction du dopage de la couche P  $N_A$  pour différentes épaisseurs  $d_E$ . 1) Cellule (A) sans TJ. 2) Cellule (B) avec TJ.

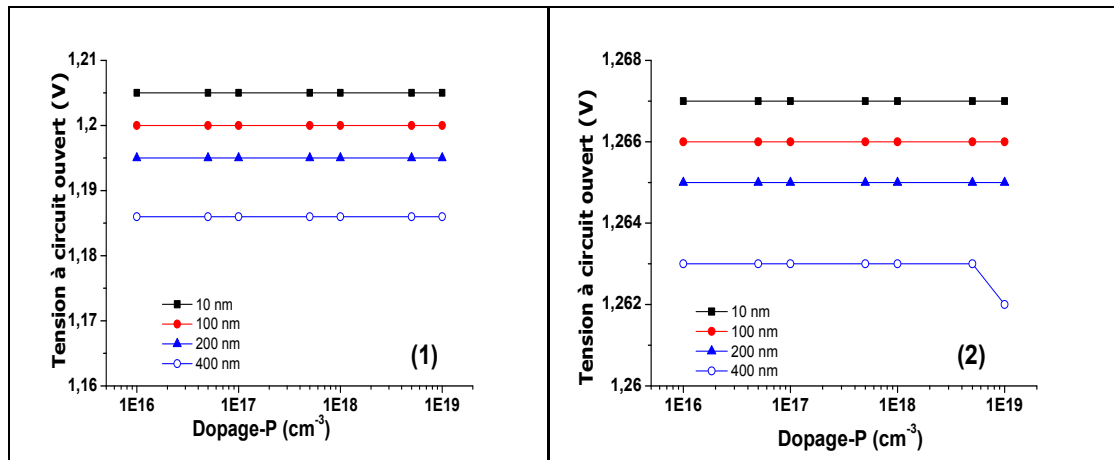
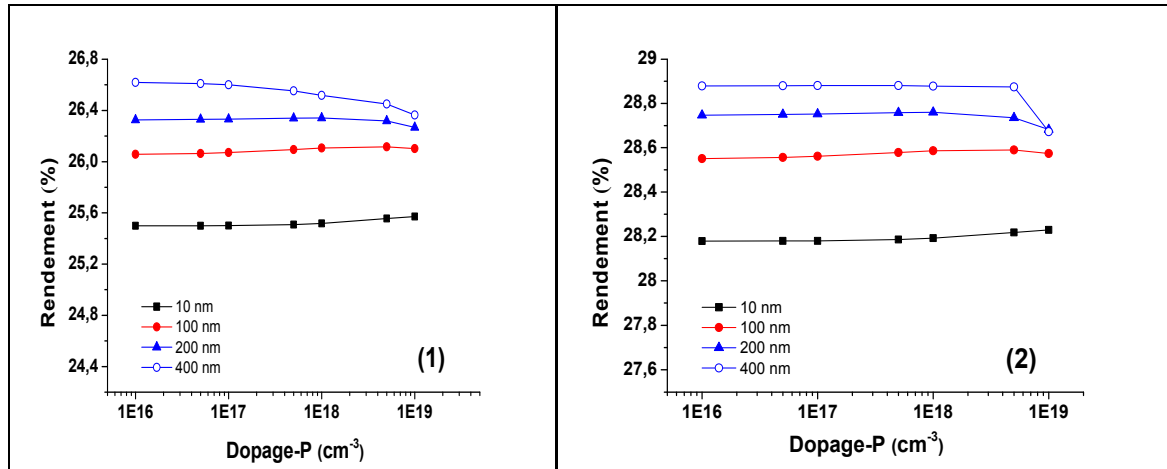


Figure V-3: Tension à circuit ouvert en fonction de dopage  $N_A$  de la couche P pour différentes épaisseurs  $d_E$ . 1) Cellule (A) sans TJ. 2) Cellule (B) avec TJ.

D'une part, la densité du courant  $J_{cc}$  croit lorsque l'épaisseur de la couche P décroît en raison de l'amélioration du rendement de collecte résultant de la diminution de la distance entre la surface et la zone de charge d'espace. D'autre part, le rendement de collecte de la zone de charge d'espace est affaibli lorsqu'elle sera trop près de la surface où intervient l'effet de la recombinaison en surface alors  $J_{cc}$  décroît. En conséquence, le rendement et la densité de courant ont une variation similaire, les deux augmentent, puis diminuent à la fois, lorsque l'épaisseur de la couche P augmente. Les courbes de la figure V-4 montrent que le

meilleur rendement est obtenu pour 400 nm d'épaisseur de la couche P. Cependant, la tension à circuit-ouvert  $V_{co}$  reste constante avec la croissance de la concentration du dopage  $N_A$ , comme le montre la figure V-3.



**Figure V-4:** Rendement en fonction de dopage  $N_A$  de la couche P pour différentes épaisseurs  $d_E$ . 1) Cellule (A) sans TJ. 2) Cellule (B) avec TJ.

Le rendement, comme l'indique la figure V-4, reste presque constant pour des dopages allant de  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  à  $10^{17}\text{cm}^{-3}$ , tout en augmentant pour de faibles épaisseurs et en diminuant pour les grandes épaisseurs avec des valeurs croissantes de la concentration de dopage  $N_A$  en passant par un maximum  $\eta=26.619\%$  pour  $N_A=10^{16}\text{cm}^{-3}$  et une épaisseur de l'émetteur  $d_E=400\text{nm}$ .

L'existence d'une jonction tunnel entre les deux cellules PN/PN ou PIN/PIN, améliore les caractéristiques de ces structures, par rapport aux mêmes structures dépourvues de cette jonction tunnel. Ceci peut s'expliquer par le fait que la jonction tunnel évite les recombinaisons entre les deux cellules de la structure en augmentant la conductivité en cette interface, qui est entre les deux sous-cellules. Les porteurs sont directement transmis par effet tunnel avant de se recombiner à cette interface, qui est entre les deux cellules, d'où un meilleur rendement, et de meilleures caractéristiques dans les structures avec jonction tunnel, comparés aux structures sans jonction tunnel.

Notons ici, qu'il existe d'autres procédures de modélisation des cellules à multi-jonctions, par exemple, la procédure qui consiste à analyser les deux sous-cellules séparément et à retenir le courant minimal et la somme des tensions. Cette procédure est beaucoup moins rigoureuse puisqu'elle ne tient pas compte de la connexion entre les deux cellules et de la formation de la jonction NP, elle ne tient pas compte aussi de l'interdépendance des paramètres (taux de dopage, épaisseurs, compositions) des cellules.

Pour montrer l'effet de la jonction tunnel et son fort impact sur les performances de la structure (B), nous avons fait varier l'épaisseur de cette jonction tunnel de 5nm à 30nm, les figures V-5 et V-6 représentent l'influence de cette dernière grandeur sur la densité de courant de court circuit ( $J_{cc}$ ), sur la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et sur le rendement.

Le rendement meilleur de la structure (B) en fonction d'épaisseur de la jonction tunnel est obtenu pour une épaisseur de 25 nm.

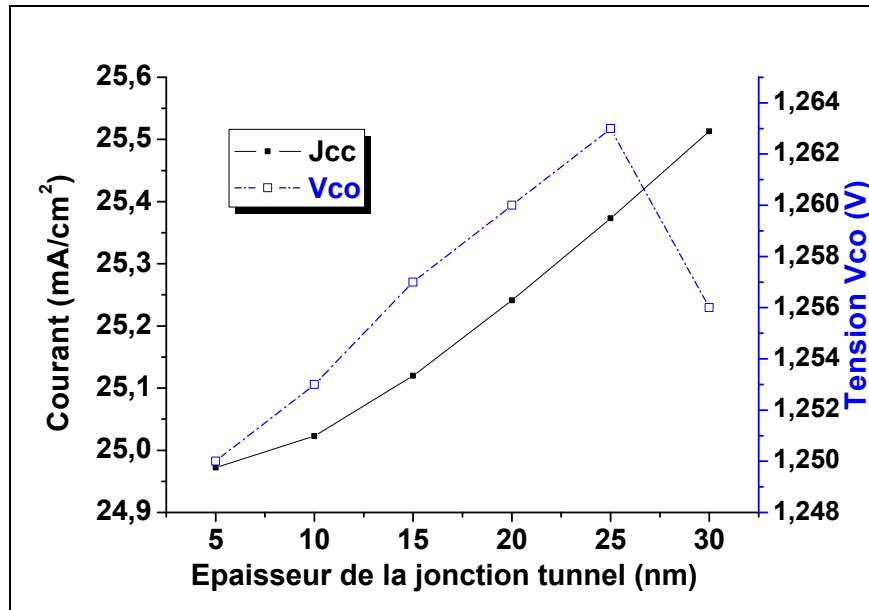


Figure V-5: Densité de courant de court circuit et Tension à circuit-ouvert de la structure (B) en fonction d'épaisseur de la jonction tunnel  $d_{JT}$ .

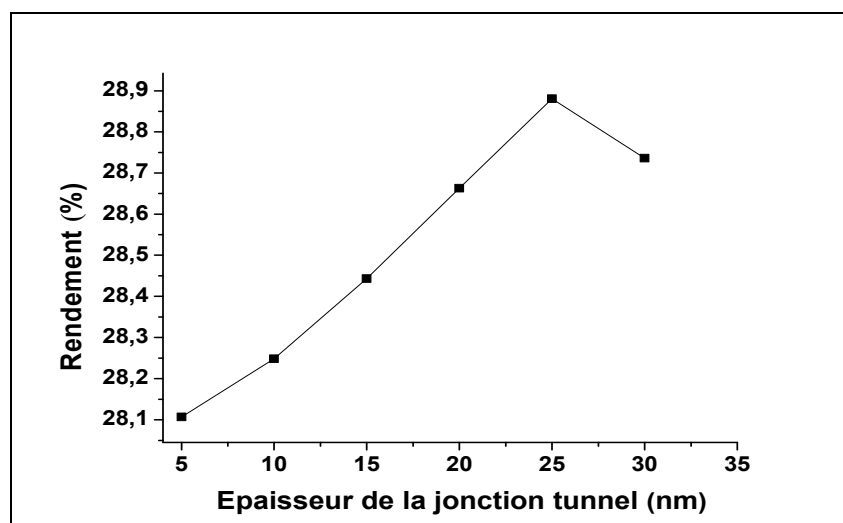


Figure V-6: Rendement de la structure (B) en fonction d'épaisseur  $d_{JT}$  de la jonction tunnel.

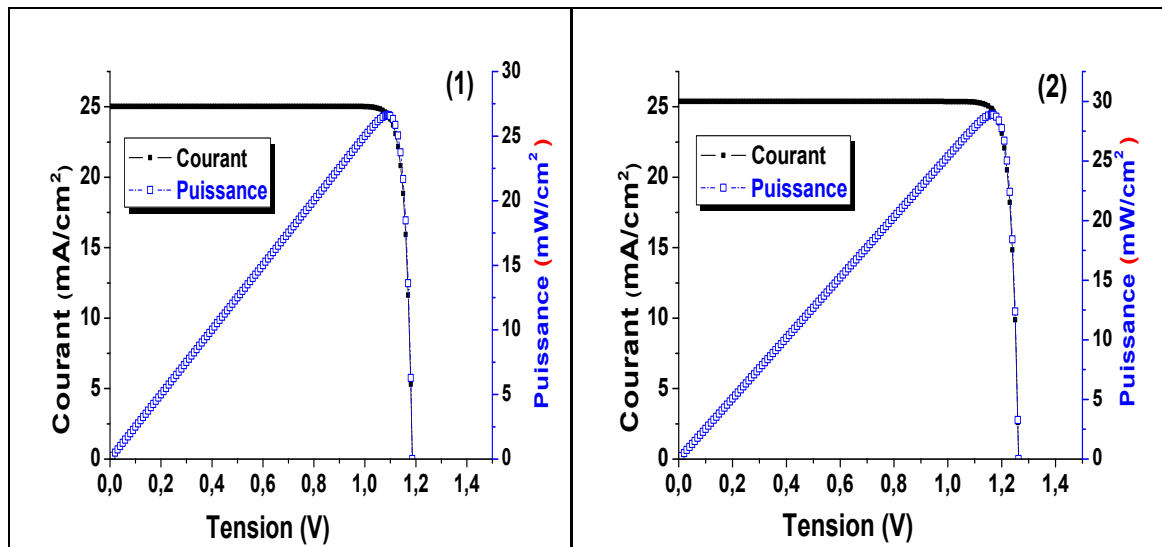


### V.2.1.4. Performances des cellules tandem (A) et (B)

Avec une concentration du dopage  $N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , une épaisseur de 400nm de l'émetteur et 1100nm d'épaisseur de la base, les valeurs optimales des paramètres des cellules tandem (A) et (B) sont regroupés dans le tableau V-3 et leurs caractéristiques densité de courant-tension et puissance-tension sont représentées sur la figure V-7.

**Tableau V-3** Valeurs optimales des paramètres des cellules tandem (A) et (B)

	<b>Jcc</b> (mA/cm <sup>2</sup> )	<b>V<sub>CO</sub></b> (V)	<b>FF</b> (%)	<b>η</b> (%)
Cellule (A)	25.028	1.186	89.7	<b>26.619</b>
Cellule (B)	25.369	1.263	90.1	<b>28.881</b>



**Figure V-7:** Caractéristiques courant-tension et puissance-tension de 1) la cellule (A), 2) la cellule (B) obtenues avec les paramètres optimaux.

## V.2.2 Modélisation de la structure tandem PIN/PIN

### V.2.2.1 Description de la structure tandem PIN/PIN

Les structures (C) et (D) sont des cellules solaires à double-jonction à base d'InGaN d'épaisseur totale  $d=3 \mu\text{m}$ , composées de deux sous-cellules (deux jonctions PIN), chacune des sous-cellules est composée d'une couche P d'épaisseur  $d_E$  dopée à une concentration  $N_A$ , une couche intrinsèque I d'épaisseur  $d_i$  et d'une couche N d'épaisseur  $d_B$  dopée à une concentration  $N_D$ , les trois couches sont du même matériau (même concentration d'Indium) pour la structure (C). Les sous-cellules dans la structure (D) sont connectées électriquement en série via une jonction tunnel d'épaisseur  $d_{JT}$ . Les deux structures sont représentées sur la

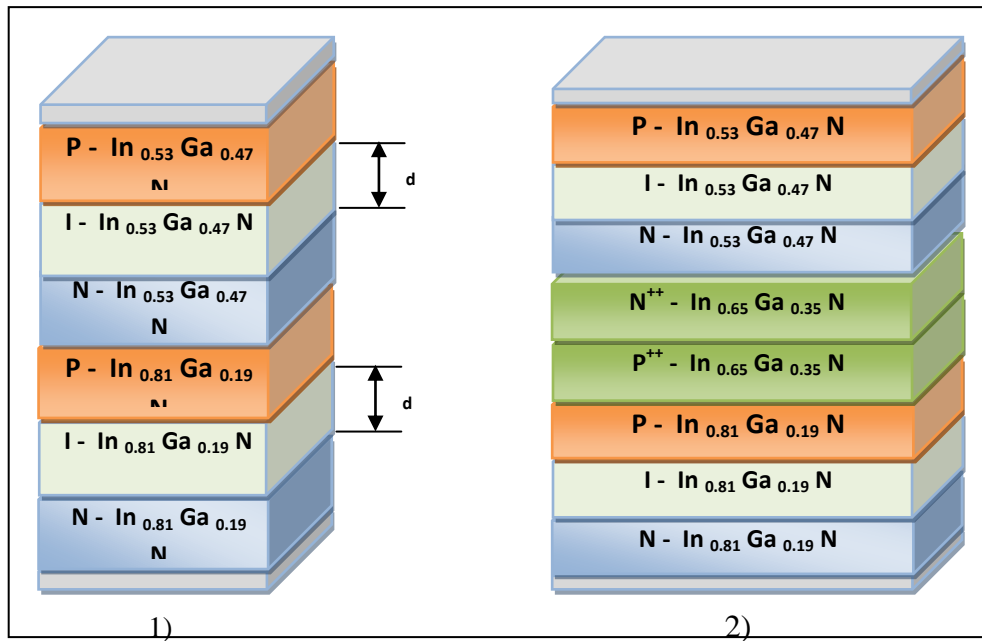


Figure V-8: Structure PIN/PIN : 1) cellule (C) sans TJ, 2) cellule (D) avec TJ.

figure V-8. Les paramètres des matériaux et leurs valeurs utilisés dans cette simulation sont rassemblés dans les tableaux suivants.

Tableau V-4: Paramètres du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  à 300 K pour les structures (C) et (D).

Structure (C) et Structure (D)								
Paramètres	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$			$\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ (JT)		$\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$		
	P	I	N	N <sup>+</sup>	P <sup>+</sup>	P	I	N
E <sub>g</sub> (eV)	1.61			1.32		0.99		
ε <sub>r</sub>	12.63			13.13		13.8		
N <sub>A</sub> (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>16</sup>	/	/	/	10 <sup>19</sup>	10 <sup>16</sup>	/	/
N <sub>D</sub> (cm <sup>-3</sup> )	/	/	10 <sup>18</sup>	10 <sup>19</sup>	/	/	/	10 <sup>18</sup>
μ <sub>n</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)	En fonction de dopage	1000	En fonction de dopage			1000	En fonction de dopage	
μ <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)		170				170		
N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.56 10 <sup>18</sup>			1.39 10 <sup>18</sup>		1.17 10 <sup>18</sup>		
N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )	3.65 10 <sup>19</sup>			4.075 10 <sup>18</sup>		4.63 10 <sup>19</sup>		
χ (eV)	5.35			5.56		5.78		
d (nm)	10à500	50à500	ajustée	5 à 25		10à500	50à500	ajustée

D'une manière similaire, pour optimiser les performances de nos cellules, nous avons trouvé les paramètres technologiques (dopage et épaisseur) pour chacune des régions P, N et

Intrinsèque qui donnent les meilleures caractéristiques de sortie se basant toujours sur les résultats trouvés dans le chapitre précédent.

### V.2.2.2. Résultats et discussions

Les rendements obtenus des cellules (C) et (D) pour différentes géométries, c.à.d. différentes valeurs de la concentration du dopage  $N_A$  de la couche P, en le faisant varier de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  pour une concentration constante  $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , notre étude était faite pour différentes épaisseurs de la région P  $d_E$  (10nm, 100nm, 200nm et 400nm), les résultats sont illustrés sur les figures V-11. Les figures V-9 et V-10 illustrent l'influence du dopage  $N_A$  de la couche P et son épaisseur sur la densité de courant de court-circuit et sur la tension à circuit ouvert des cellules (C) et (D) respectivement.

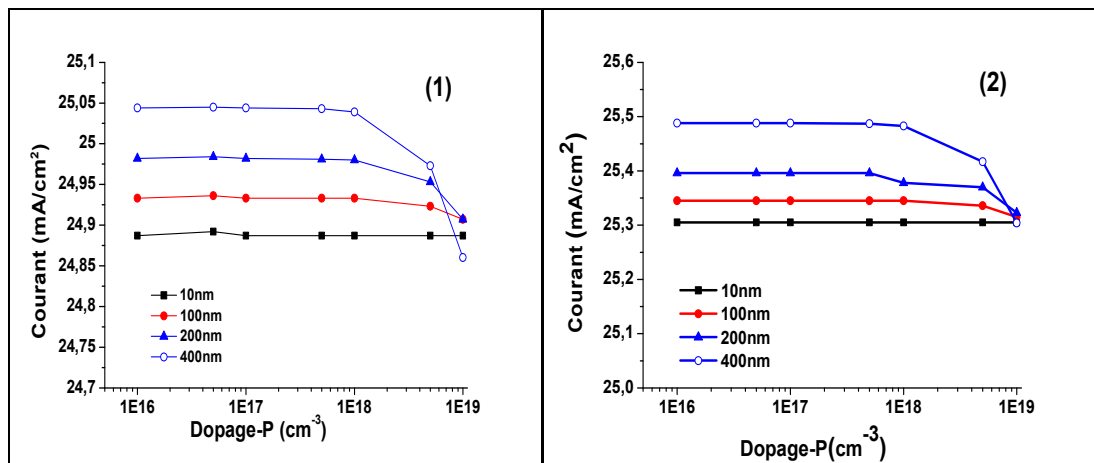


Figure V-9: Densité de courant de court-circuit en fonction de dopage  $N_A$  de la couche P pour différentes épaisseurs  $d_E$ . 1) la cellule (C) 2) la cellule (D)

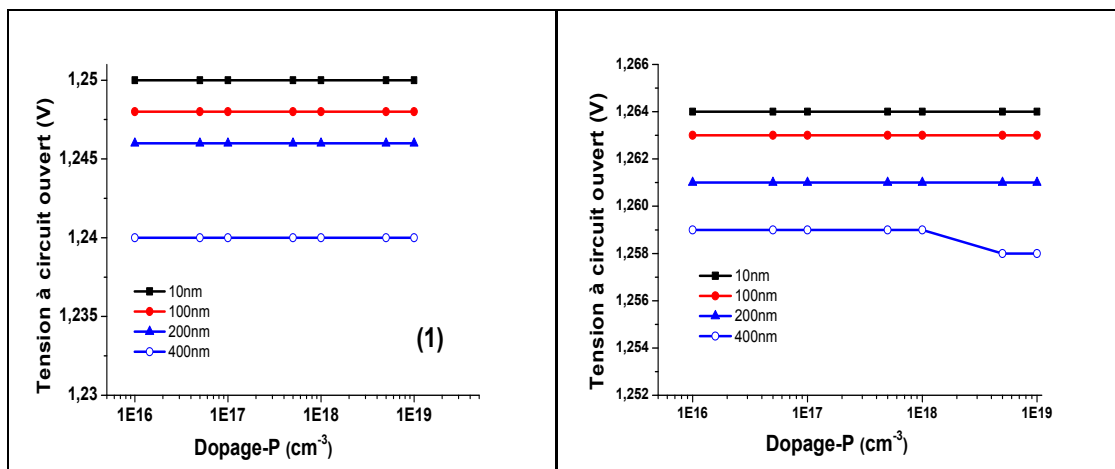
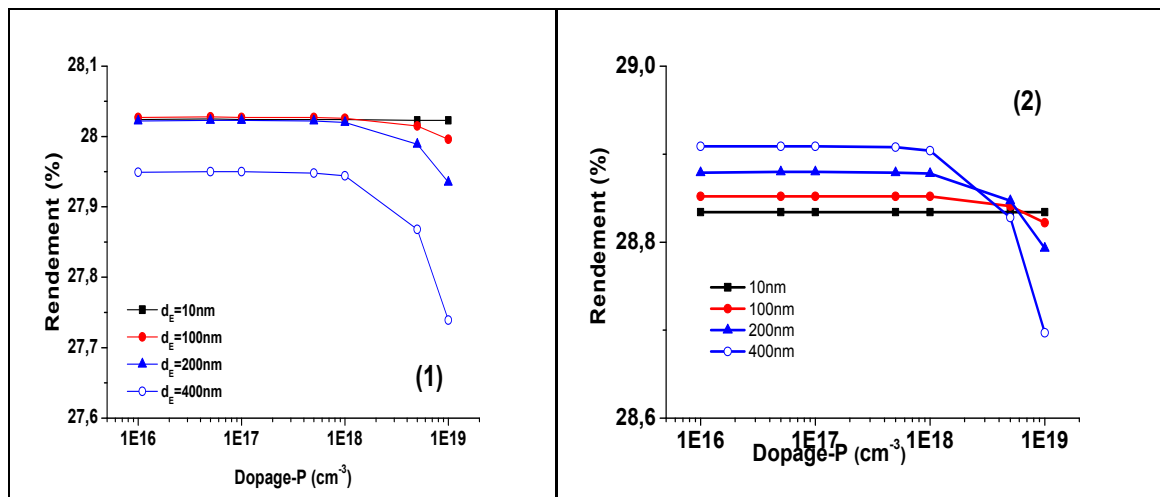


Figure V-10: Tension à circuit ouvert de 1) la cellule (C), 2) la cellule (D) en fonction de dopage de la couche P  $N_A$  pour différentes épaisseurs  $d_E$ .

D'après la figure V-9, on peut constater que la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$  reste constante avec l'augmentation de la concentration du dopage  $N_A$  jusqu'à ce qu'elle dépasse la valeur de  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$  où elle diminue légèrement pour les différentes épaisseurs où l'augmentation de la concentration du dopage  $N_A$  entraîne une diminution de la mobilité des porteurs et entraîne en même temps une diminution de la zone de charge d'espace (ZCE), ce qui va entraîner une diminution de  $J_{CC}$ . La diminution de la mobilité des porteurs entraîne une diminution du coefficient de diffusion des porteurs et de la longueur de diffusion, conduisant ainsi à une mauvaise collecte des porteurs de charges libres générés par la lumière. La tension à circuit ouvert  $V_{co}$  reste constante avec la croissance de la concentration du dopage  $N_A$  et diminue très légèrement pour une augmentation de l'épaisseur de la couche P comme le montre la figure IV-10.

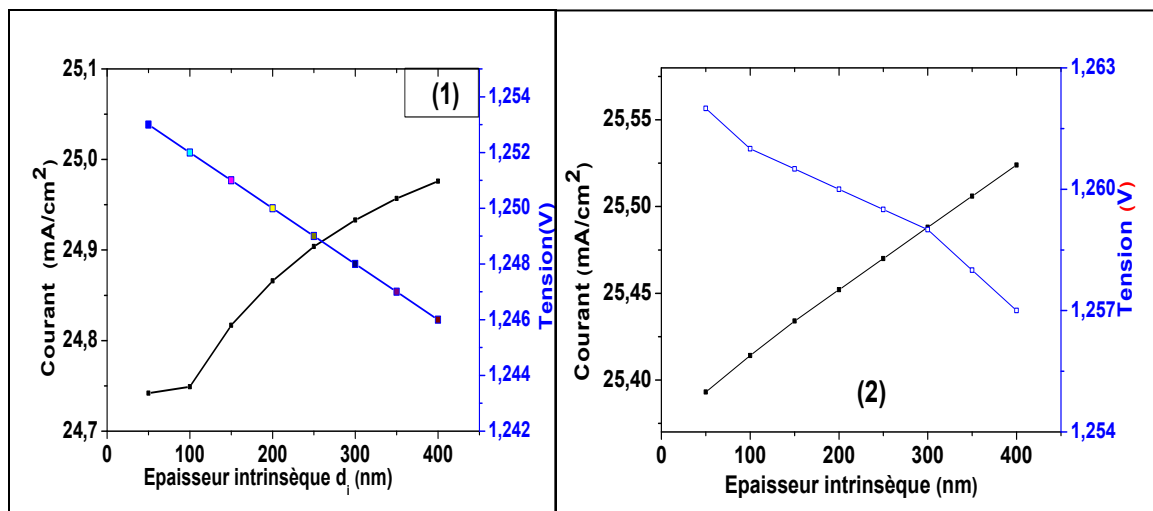


**Figure V-11:** Rendement : 1) des cellules (C) et (D) en fonction du dopage  $N_A$  de la couche P pour différentes épaisseurs  $d_E$ .

Le rendement de la cellule (C), comme l'indique la figure V-11-(1), reste presque constant de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$  et diminue avec l'augmentation de la concentration de dopage  $N_A$  en passant par un maximum  $\eta=28.028\%$  pour un dopage  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et une épaisseur  $d_E = 100 \text{ nm}$ . Le rendement de la cellule (D), comme l'indique la figure IV-11-(2) reste presque constant de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  puis diminue avec l'augmentation de la concentration de dopage  $N_A$  en passant par un maximum  $\eta=28.909\%$  pour un dopage  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et une épaisseur  $d_E = 400 \text{ nm}$ . L'écart des performances entre les deux cellules qui possèdent les mêmes géométries, s'explique par la présence de la jonction tunnel dans la cellule (D).

### V.2.2.3. Effet d'épaisseur de la couche intrinsèque

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque I sur les performances des cellules PIN, pour cela nous avons pris une concentration du dopage  $N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$  et une épaisseur totale de la cellule de  $3 \mu\text{m}$ , une épaisseur de la couche P de la cellule (C)  $d_E = 100 \text{nm}$ , une épaisseur de la couche P de la cellule (D)  $d_E = 400 \text{nm}$ , une épaisseur  $d_B$  de la couche N ajustée, le rendement  $\eta$ , la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension à circuit-ouvert  $V_{co}$  correspondants sont calculés en variant l'épaisseur  $d_i$  de la couche intrinsèque de  $50 \text{nm}$  à  $400 \text{nm}$ . Le rendement, la densité de courant de court-circuit et la tension à circuit-ouvert sont illustrés dans les figures V-12 et V-13, en fonction de l'épaisseur  $d_i$ . On a trouvé que le rendement  $\eta$  des deux cellules possède une valeur maximale pour la même épaisseur  $d_i = 300 \text{nm}$ .



**Figure V-12:** Densité de courant de court-circuit et tension à circuit-ouvert en fonction d'épaisseurs  $d_i$  de la couche intrinsèque 1) de la cellule (C) ; 2) de la cellule (D).

D'après la figure V-12, on remarque que la densité de courant est proportionnelle à l'épaisseur de la couche intrinsèque de la structure PIN, c.à.d. la densité de courant  $J_{cc}$  augmente avec l'augmentation de l'épaisseur pour atteindre une valeur maximale après laquelle, la densité de courant du court-circuit se stabilise, et commence à diminuer par la suite, ceci s'explique par le fait qu'à partir d'un certain moment le champ électrique à l'intérieur de la ZCE commence à diminuer et les porteurs de charge photogénérés dans cette zone ne seront pas tous éjectés de la ZCE, et par la suite collectés .

En conclusion on peut dire que la couche intrinsèque permet d'avoir une plus grande ZCE et améliorer ainsi la génération des paires électron-trou. L'augmentation de  $J_{CC}$  est donc due à l'augmentation de la concentration des porteurs photogénérés. Par contre, la tension est

inversement proportionnelle à l'épaisseur contrairement au courant, la tension diminue avec l'augmentation de la largeur de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

D'après les résultats obtenus sur l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur le rendement, représentés sur la figure V-13, on peut dire que l'épaisseur de la couche intrinsèque peut avoir une influence positive comme négative sur les caractéristiques de la structure, ce qui imposera un choix minutieux de la largeur pour l'obtention d'un rendement maximum, pour notre structure cette valeur est aux alentours de 300 nm. Ce qui revient sûrement à un accord entre l'absorption des photons et le gap d'énergie et le champ électrique à l'intérieur de la ZCE. Le choix de cette valeur optimale de l'épaisseur de la couche intrinsèque dépend de plusieurs facteurs dont le dopage, la mobilité des porteurs et les défauts.

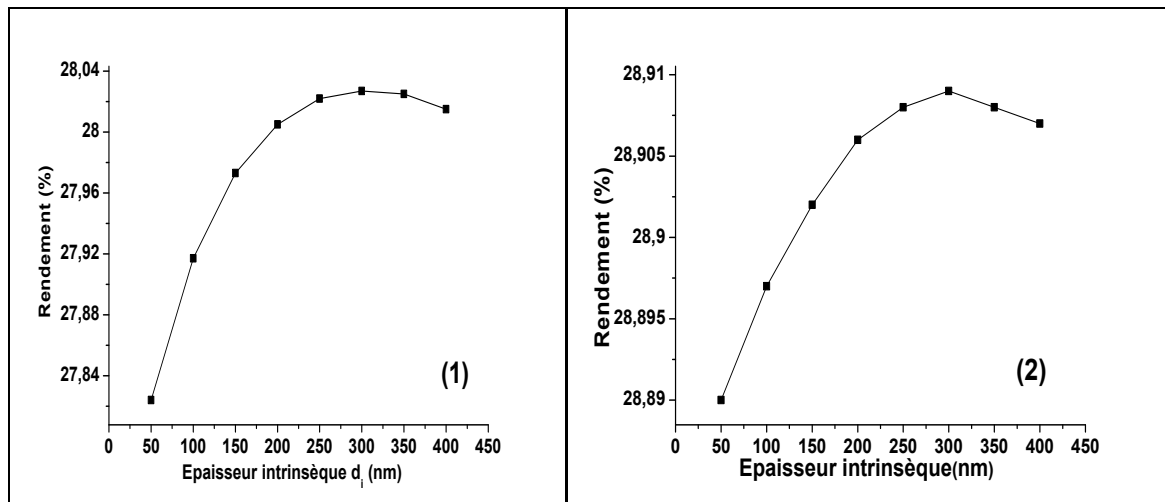
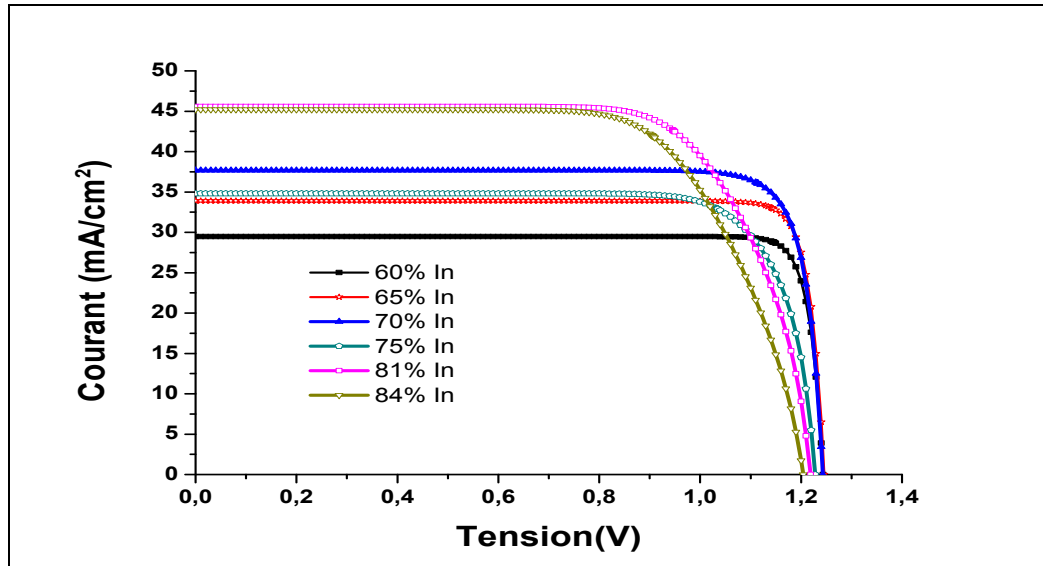


Figure V-13: Rendement en fonction d'épaisseur  $d_i$  de la couche intrinsèque :

1) de la cellule (C), 2) de la cellule (D)

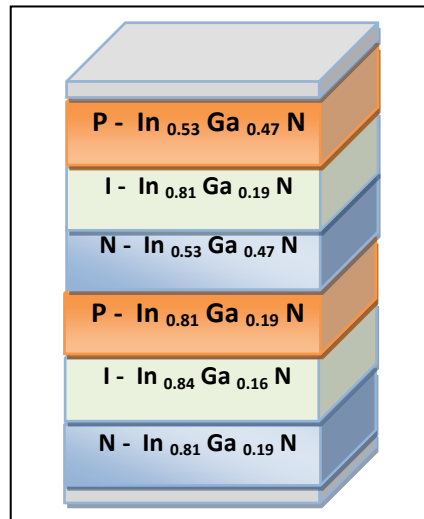
#### V.2.2.4. Effet du taux d'Indium de la couche intrinsèque

Dans cette partie, nous étudierons l'influence de la concentration d'Indium dans le matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  de la couche intrinsèque de la cellule supérieure de cellule (C) sur les caractéristiques de la cellule. Pour cela nous ferons varier la concentration d'indium dans l'alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , de 60% à 84% (concentrations d'Indium : 60%, 65%, 70%, 75%, 81% et 84%). Les résultats obtenus, sont représentés sur la figure V-14.



**Figure V-14:** Caractéristiques densité de courant-tension de la cellule solaire (D) obtenues avec différentes concentrations d'Indium dans l'alliage  $In_xGa_{1-x}N$  de la couche intrinsèque de la cellule supérieure.

Le rendement optimum se trouve aux alentours d'un pourcentage de 81% d'Indium c'est-à-dire que notre nouvelle structure (E), représentée dans la figure V-15, est une hétérojonction qui peut atteindre un rendement maximal de 40.324% pour des concentrations du dopage  $N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , une épaisseur 400nm de la couche P, 800nm d'épaisseur de la couche N et une épaisseur et de 300nm de la couche intrinsèque.



**Figure V-15:** Structure (E)

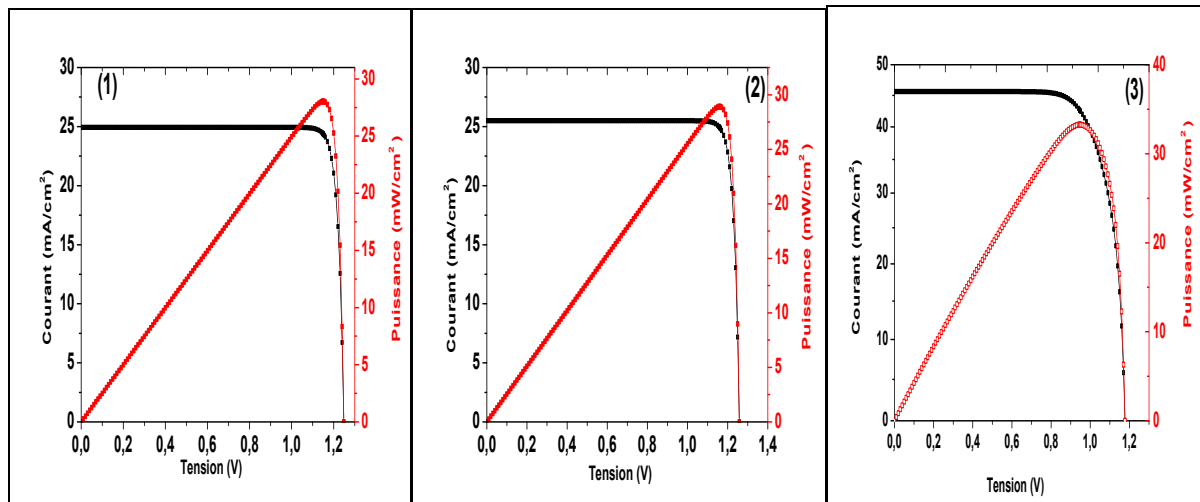
### V.2.2.5. Performances des cellules tandem (C), (D) et (E)

Les meilleures performances de trois cellules (C), (D) et (E) sont obtenues avec des concentrations du dopage  $N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$  et  $N_D = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , une épaisseur de 100nm, 400nm, 400nm des régions P, 1100nm, 800nm, 800nm d'épaisseur des régions N, respectivement, et

des épaisseurs de 300nm des couches intrinsèques. Les valeurs optimales des paramètres de ces cellules tandem PIN/PIN sont regroupées dans le tableau V-5 et leurs caractéristiques densité de courant-tension et puissance- tension sont représentées sur la figure V-16.

**Tableau V-5** Valeurs optimales des paramètres des cellules tandem (C) et (D)

	<b>Jcc (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>V<sub>co</sub> (V)</b>	<b>FF (%)</b>	<b>η (%)</b>
Cellule (C) sans jonction tunnel	24.933	1.248	90.1	<b>28.027</b>
Cellule (D) avec jonction tunnel	25.488	1.259	90.1	<b>28.909</b>
Cellule (E) hétérojonction	45.584	1.178	75.1	<b>40.324</b>



**Figure V-16:** Caractéristiques densité de courant- tension et puissance-tension de 1) la cellule (C), 2) la cellule (D) et 3) la cellule (E) obtenues avec les paramètres optimaux.

### V.2.3. Comparaison aux résultats de la littérature

Notre étude sur la structure tandem à base d'InGaN a montré que le rendement optimal que l'on peut obtenir est de 28.881% (pour une double-homojonction PN/PN) et de 28.909% (pour une double- homojonction PIN/PIN), comme on a pu obtenir un rendement optimal de 40.328% (pour une double-hétérojonction PIN/PIN), la jonction tunnel est prise en compte. Dans la littérature, on trouve des études ont été menés, dont les travaux, de Hamzaoui et al. ont trouvé un rendement optimal de 27.485% pour une structure double-jonction ( $\text{In}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N} / \text{In}_{0.59}\text{Ga}_{0.31}\text{N}$ ) sous AM1.5G[3]; de Zhang et al., qui ont montré que la structure double-jonction à base d'InGaN (1.74 eV/1.15 eV) présente un rendement optimal de 35,1% sous AM1.5G [4]; de Mesrane et al., qui ont obtenu un rendement optimal de 34,9% pour une structure double-jonction ( $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{N}/\text{In}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$ ) sous AM1.5G [5]. Une autre étude a été réalisée par Singh et al. Ils ont trouvé un rendement optimal de 36.26 %



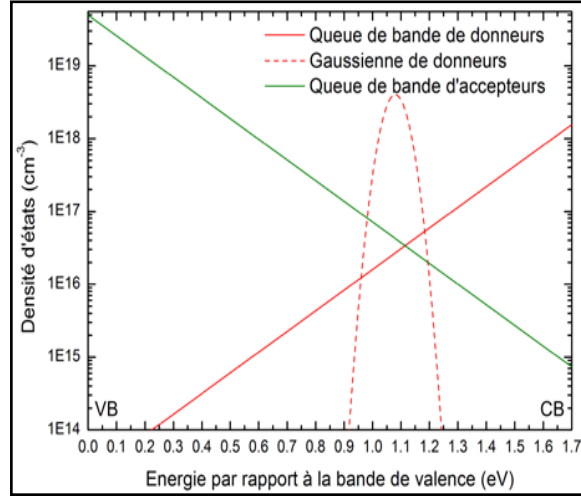
pour une structure double-jonction  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N} / \text{In}_{0.57}\text{Ga}_{0.43}\text{N}$  sous AM0 [6]. Dans ces études, les différents mécanismes de recombinaisons des porteurs n'ont pas été pris en considération, les auteurs n'ont pas tenu compte de la jonction tunnel reliant les deux sous-cellules, pour minimiser les mécanismes de recombinaisons aux interfaces. Dernièrement, une étude a été réalisée par Adain et al. Ils ont trouvé un rendement optimal de 24.4% pour une structure double-jonction ( $\text{In}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N} / \text{In}_{0.59}\text{Ga}_{0.31}\text{N}$ ) sous AM1.5G, la jonction tunnel a été prise en compte [7].

#### V.2.4. Limitations technologiques

Jusqu'ici, nous avons présenté les performances de la cellule solaire tandem sans tenir compte de certaines limitations technologiques présentes dans cette catégorie de cellules solaires à base d'InGaN. Parmi ces limitations on trouve le pourcentage en indium des couches InGaN, le substrat, les défauts structuraux dans le matériau, la polarisation, ... Dans cette dernière partie de ce chapitre, nous allons étudier l'influence des défauts structuraux dans le matériau sur les performances de la cellule tandem et qui est un facteur le plus limitant de développement de cellules à base d'InGaN.

#### V.2.5. Modélisation des défauts structuraux

Jusqu'à maintenant, les résultats expérimentaux des cellules solaires à base d'InGaN présentent des rendements très bas à cause de la grande densité de défauts structuraux, présents dans la plus part des cas dans les couches épitaxiées. Ces défauts se trouvent dans la bande d'énergie interdite de semiconducteur. Ces défauts sont capables de capturer ou d'émettre les porteurs libres et peuvent même compenser des niveaux donneurs ou accepteurs et réduire la concentration et la mobilité des porteurs de charges. Les défauts structuraux ont une grande influence sur les propriétés électriques des semiconducteurs et donc sur la cellule solaire. Dans cette partie, nous allons voir la modélisation de ces défauts structuraux et leur influence sur les performances de la cellule solaire tandem (E). Le logiciel AMPS-1D nous permet la modélisation des défauts structuraux par une distribution gaussienne des densités d'états dans la bande interdite (défauts profonds) et qui sont associés à des densités d'états de queues de bande (queue exponentielle), qui allonge la profondeur des défauts souvent observée dans le binaire GaN. La figure V-17 représente un exemple de défauts structuraux (défauts profonds et queues de bande) dans le gap de l'alliage  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ .



**Figure V-17:** Densité d'états des queues de bandes et du défaut dans le gap de l' $In_{0,53}Ga_{0,47}N$ . [8]

Les densités d'états  $g_D(E)$  et  $g_A(E)$  des queues de bande donneurs et accepteurs, respectivement, sont modélisées par les relations suivantes [9]:

$$g_D(E) = G_{D0} \exp\left(-\frac{E - E_V}{E_d}\right)$$

$$g_A(E) = G_{A0} \exp\left(\frac{E - E_C}{E_a}\right)$$

Où  $E$  est l'énergie de l'état de défaut.

$G_{D0}$  et  $G_{A0}$  sont des préfacteurs (états par volume par énergie).

$E_d$  et  $E_a$  sont les largeurs caractéristiques (énergie d'Urbach) qui déterminent les pentes des queues de bandes.

Les densités d'états des défauts profonds donneurs et accepteurs, respectivement, sont données par les relations suivantes [9] :

$$g_{Gd}(E) = G_{Gd} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(E - E_{pkd})^2}{\sigma_d^2}\right\}$$

$$g_{Ga}(E) = G_{Ga} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(E - E_{pka})^2}{\sigma_a^2}\right\}$$

$G_{Gd}$  et  $G_{Ga}$  sont des préfacteurs (états par volume par énergie).

$E_{pkd}$  et  $E_{pka}$  sont les positions énergétiques au niveau des pics des distributions gaussiennes des défauts donneurs et accepteurs, respectivement.

$\sigma_d$  et  $\sigma_a$  sont les sections efficaces de capture des électrons et des trous, respectivement.

Pour étudier l'influence des défauts profonds (défauts gaussiens) sur les performances de la cellule, nous avons étudié au début l'effet de la largeur à mi-hauteur des défauts gaussiens, représentée par son semi largeur ( $W_{DSDG}$ ), puis leur concentration ( $N_{DG}$ ). Nous avons pris en compte seulement les défauts de type donneurs puisqu'ils sont les plus présents et les plus probables dans l'alliage  $In_xGa_{1-x}N$ . Les sections efficaces de capture ( $G_{SIG}/N_D$ ) des électrons et ( $G_{SIG}/P_D$ ) des trous sont prises égales à  $10^{-15}cm^2$  et  $10^{-17}cm^2$  respectivement. L'énergie correspondant aux pics des distributions gaussiennes ( $E_{DONG}$ ) est fixée à 0,62 eV. Notons que ces abréviations sont celles du logiciel AMPS-1D, comme il est montré dans la figure V-18.

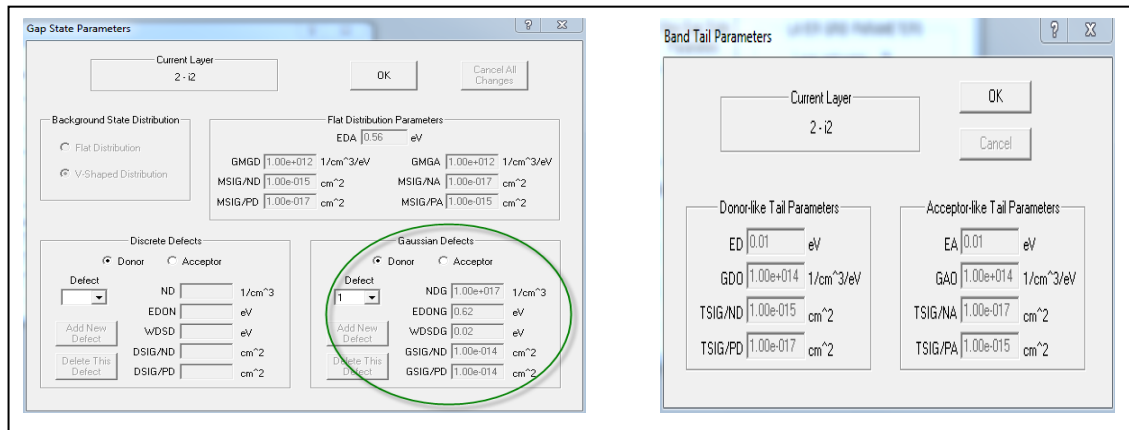


Figure V-18: Interface pour introduire les différents paramètres de la simulation de : a) défauts profonds b) queues de bandes

La figure V-19 illustre l'évolution du  $J_{CC}$  et du  $V_{CO}$  et la figure V-20 illustre l'évolution du rendement et du facteur de forme en fonction de la largeur à mi-hauteur des défauts gaussiens. La concentration de défauts de type donneur est prise égale à  $10^{18}cm^{-3}$ .

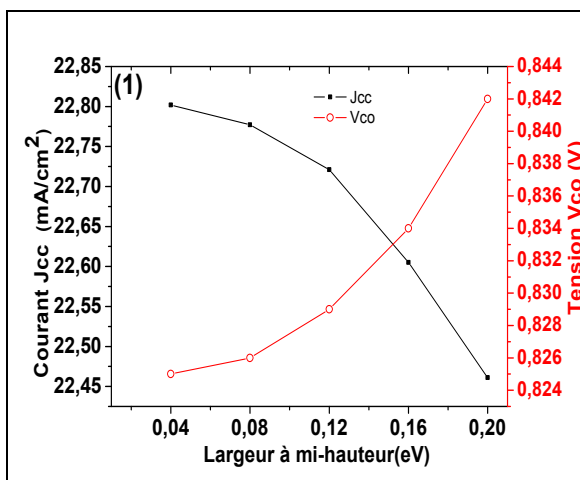


Figure V-19: Evolution du  $J_{CC}$  et du  $V_{CO}$  de la cellule (E) pour différentes largeur à mi-hauteur des défauts gaussiens.

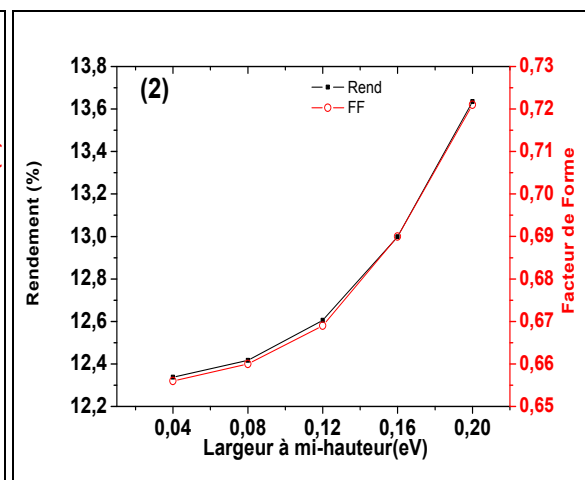
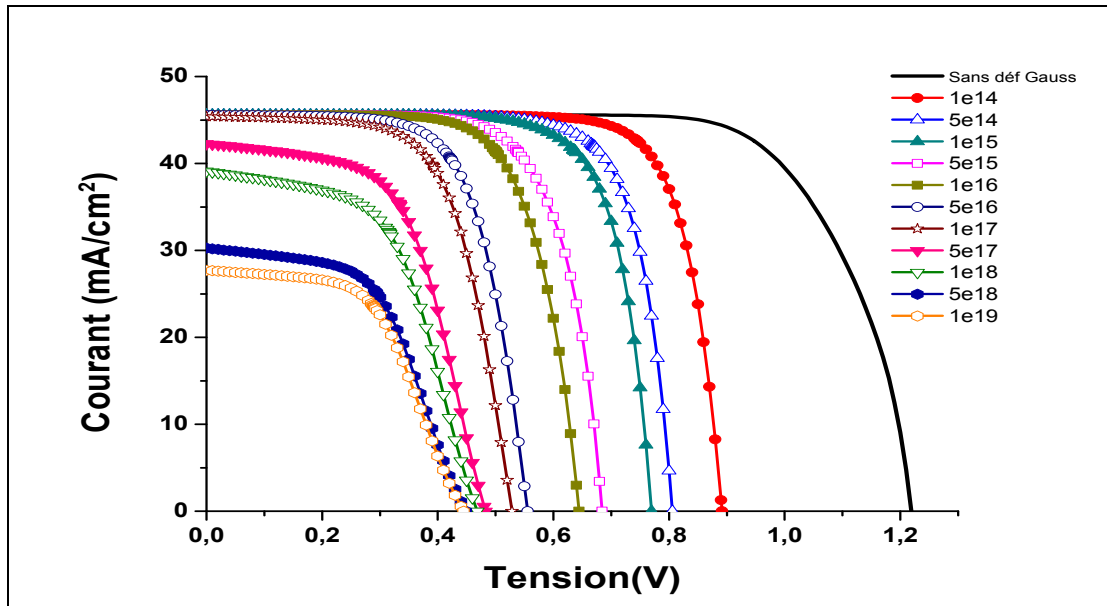


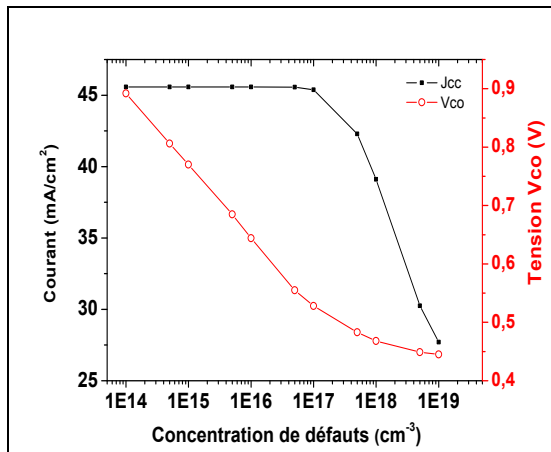
Figure V-20: Evolution du Rendement et Facteur de forme de la cellule (E) pour différentes largeur à mi-hauteur des défauts gaussiens.

D'après ces allures, nous voyons que la présence des défauts profonds diminuent le rendement de la cellule étudiée, la présence de défauts profonds diminue de la valeur optimale qui était de 40.324% jusqu'à  $\sim 12\%$ . Nous remarquons que l'augmentation de la largeur à mi-hauteur entraîne une légère diminution du  $J_{CC}$ , et une augmentation du  $V_{CO}$ . Les défauts gaussiens agissent comme des centres de recombinaison, l'élargissement de la largeur à mi-hauteur entraîne une augmentation des densités d'état dans la bande interdite d'où la probabilité de recombinaison des porteurs sera plus forte, d'où la diminution des porteurs de charge qui ont été piégés dans ces défauts et par la suite la diminution de  $J_{CC}$ . D'autre part, la présence de ces défauts dans la bande interdite réduit la bande d'énergie interdite du matériau d'où la diminution de  $V_{CO}$ .

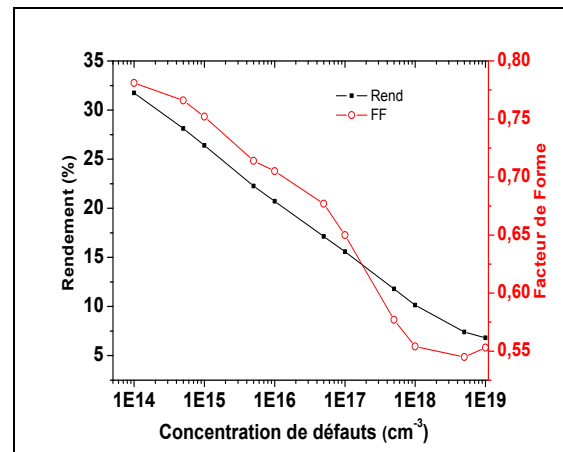
La figure V-21 illustre les caractéristiques courant-tension de la cellule pour différentes concentrations des défauts profonds de type donneur. La figure V-22 illustre l'évolution de  $J_{CC}$  et de  $V_{CO}$ , alors que la figure V-23 illustre l'évolution du rendement et du facteur de forme en fonction de la concentration des défauts profonds de type donneur. La largeur à mi-hauteur des défauts de type donneur est prise égale à 0,04eV.



*Figure V-21: Caractéristiques courant-tension de la cellule (E) pour différentes concentrations des défauts profonds de type donneur.*



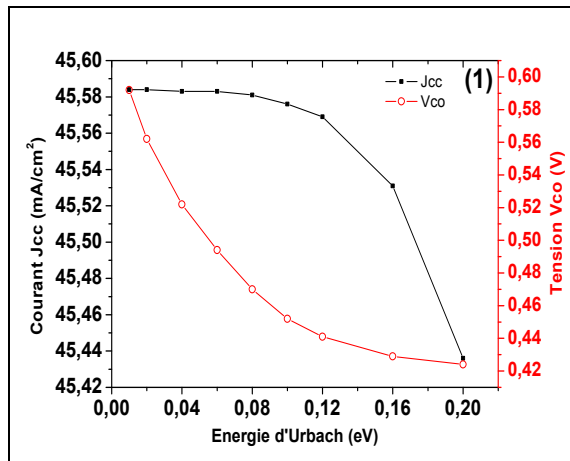
**Figure V-22:** Evolution du  $J_{CC}$  et du  $V_{CO}$  de la cellule (E) pour différentes concentrations des défauts profonds de type donneur.



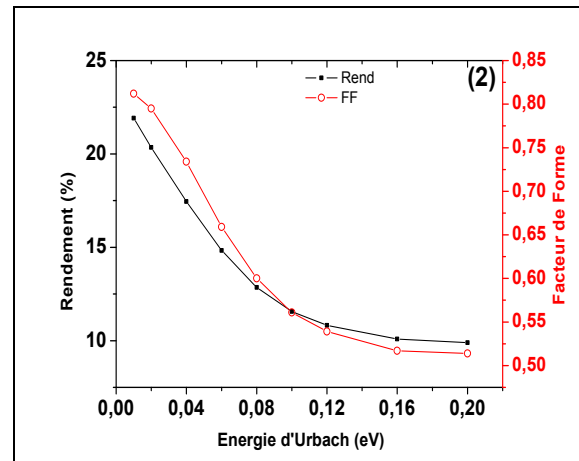
**Figure V-23:** Evolution du Rendement et du Facteur de forme de la cellule (E) pour différentes concentrations des défauts profonds de type donneur.

Les figures ci-dessus, nous permettent de constater que l'augmentation de la concentration des défauts profonds entraîne une détérioration des performances de la cellule. Pourtant, nous pouvons remarquer que lorsque la concentration de défauts est inférieure au dopage des couches, surtout le dopage des couches P, le courant  $J_{cc}$  de la cellule ne change pas. A l'inverse, lorsque la concentration de défauts dépasse le dopage P, le courant  $J_{cc}$  commence à diminuer. Concernant la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ , nous voyons qu'elle décroît exponentiellement avec l'augmentation de la concentration de défauts gaussiens, d'où le rendement chute significativement. Afin de ne pas réduire les performances de la cellule et minimiser l'influence des défauts profonds, il faut que la densité de ces derniers soit au moins inférieure au niveau de dopage  $N_A$  de la couche P.

Dans le paragraphe suivant, nous allons voir l'effet de l'état de désordre du matériau, pour cela nous avons étudié l'influence de la largeur caractéristique des queues de bande  $E_a$  et  $E_d$  (l'énergie d'Urbach) sur les performances de la cellule, en supposant que les queues de bande de conduction et de valence sont symétriques. La figure V-24 illustre les variations du  $J_{CC}$  et du  $V_{CO}$  en fonction de l'énergie d'Urbach et la figure V-25 illustre les variations du rendement et de facteur de forme en fonction de l'énergie d'Urbach. Les concentrations de défauts de type donneurs et accepteurs ont été fixées respectivement à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , respectivement. Les sections efficaces de capture des électrons et des trous sont prises égales à  $10^{-15} \text{ cm}^2$  et  $10^{-17} \text{ cm}^2$ , respectivement. La figure V-25 présente



**Figure V-24:** Evolution du  $J_{CC}$  et du  $V_{CO}$  de la cellule ( $E$ ) pour différentes énergies d'Urbach des queues de bandes.



**Figure V-25:** Evolution du Rendement et Facteur de forme de la cellule ( $E$ ) pour différentes énergies d'Urbach des queues de bandes.

Selon les graphes, nous pouvons déduire que l'augmentation de l'énergie d'Urbach dégrade les performances de la cellule car cette accroissement augmente les états de défauts dans la bande interdite, ceci réduit la bande interdite et augmente la probabilité de recombinaison, d'où la diminution du  $I_{CC}$  et du  $V_{CO}$ . Alors, on conclut qu'il faut réduire la largeur des queues de bandes (l'énergie d'Urbach) au maximum pour améliorer le rendement.

## Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié la cellule solaire double jonction à base d'InGaN avec différentes structures. Dans un premier temps, nous avons étudié la structure homojonction PN/PN sans et avec jonction tunnel. Par la suite, nous avons présenté les performances de la structure homojonction PIN/PIN. L'étude a montré que la structure PN/PN sans une jonction tunnel peut fournir un rendement maximal d'environ 26,619%, la même structure avec une jonction tunnel peut fournir un rendement maximal d'environ 28,881% d'où on a montré l'intérêt de cette jonction tunnel pour la connexion des sous cellules, de même manière l'étude a montré que la structure PIN/PIN sans une jonction tunnel peut fournir un rendement maximal d'environ 28,027% où la même structure avec une jonction tunnel peut fournir un rendement maximal d'environ 28,909%, ceci a montré l'effet de la couche intrinsèque sur les performances de la cellule tandem, l'étude de l'influence de la concentration d'Indium d'alliage  $In_xGa_{x-1}N$  de la couche intrinsèque a permis d'avoir une structure hétérojonction PIN/PIN qui peut fournir un rendement maximal d'environ 40,324%.

Enfin, dans la dernière partie, nous avons montré que plusieurs facteurs peuvent dégrader les performances de la cellule, particulièrement l'effet des défauts structuraux, qui ont été modélisé par une distribution gaussienne.

Nous avons vu que la présence de ces défauts structuraux, réduit le rendement de la structure hétérojonction PIN/PIN, en arrivant à un rendement réel, c'est-à-dire autour de 7% , ce qui est semblable et proche à ceux obtenus expérimentalement avec d'autres technologies à base d'InGaN confirmant le réalisme de notre étude, même si structures multijonctions restent à ce jour encore complexes à élaborer. Pour rendre la technologie des cellules à base de InGaN plus performante par rapport aux autres technologies, notamment les technologies silicium et III-V, il faut maîtriser essentiellement ce facteur.

## Bibliographies du chapitre V

- [1] A. De Vos. Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 13 839 – 1980. Cet article a été téléchargé depuis IOP science. (<http://iopscience.iop.org/0022-3727/13/5/018>)
- [2] H. Cotal et al. III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 2(2):174–192, 2009.
- [3] H. Hamzaoui, A.S. Bouazzi and B. Rezig, Theoretical possibilities of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N tandem PV structures, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 87, 595-603,2005.
- [4] X.Zhang, X. Wang, H. Xiao, C. Yang, J. Ran, C. Wang, Q. Hou, J. Li and Z. Wang. Theoretical design and performance of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N two-junction solar cells *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41, 2008.
- [5] A. Mesrane, A. Mahrane, F. Rahmoune, and A. Oulebsir. Theoretical Study and Simulations of an InGaN Dual-Junction Solar Cell. *Journal of Electronic Materials*, pages 1–8, December 2016.
- [6] J. S. Khomdram, K. M. Rajanna, B. Suman, K. S. Subir. Numerical simulation model of compositionally graded optimized radiation hard InGaN multi-junction space solar cell, Chennai and Dr.MGR University Second International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System (SEISCON 2011) , Dr. M.G.R. University, Maduravoyal, Chennai, Tamil Nadu, India. Jul. 20-22, 2011.
- [7] A. Adaine, S. Ould Saad Hamady et N Fressengeas. Modeling and optimization of InGaN based double-junction solar cell. *Compound Semiconductor Week - May 14-18, 2017 - Berlin, Germany.* 2017.
- [8] V. George. Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V. *Univ Paris-Sud 11*, 2012.
- [9] AMPS -1D Manual for Windows '95/NT, The Electronic Materials and Processing Research Laboratory at the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802.



---

---

# CONCLUSION GENERALE

---

---

## Conclusion générale

Les panneaux solaires à base de silicium polycristallin présentent des faibles rendements, entre 14 à 18% et ceux à base de silicium monocristallin présentent des rendements compris entre 16 et 24%. Malgré cela, les panneaux à base de silicium restent les dominants du marché photovoltaïques avec plus de 90% des panneaux photovoltaïques installés. De nombreuses études, soit théoriques ou expérimentales travaillent vivement sur l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires en cherchant des nouvelles architectures et des nouveaux matériaux prometteurs pour le photovoltaïque, qui donnent des meilleurs rendements avec des meilleures performances. Parmi ces architectures, actuellement, on trouve les cellules solaires multijonctions à base des matériaux III-V qui détiennent les rendements record et parmi les matériaux III-V, on trouve l'alliage InGaN, qui fut étudié dans un premier temps pour les diodes électroluminescentes (LED). Au début des années 2000, le InGaN fut étudié pour le photovoltaïque grâce à son large, direct et modulable gap d'énergie interdite pouvant couvrir la majorité du spectre solaire. Cependant, le InGaN n'a pas atteint les résultats escomptés en raison de plusieurs contraintes technologiques, tel que le dopage P, la concentration d'Indium, les défauts, la polarisation et le substrat.

Cette étude nous a permis une meilleure connaissance de différentes propriétés du matériau InGaN et de contribuer à l'optimisation d'une cellule solaire multijonctions à base de ce matériau. Nous avons étudié notamment l'influence de l'épaisseur et du dopage des différentes couches sur les performances de la cellule multijonctions à base d'InGaN sous la structure PN/PN et PIN/PIN. Dans une première étape, nous avons optimisé les performances des cellules solaires homojonction  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  et  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$  sous la structure PN et PIN, qui sont les constituants des cellules multijonctions proposées à étudier dans ce travail, en faisant varier l'épaisseur et le dopage des couches (P, I et N). Cette optimisation a achevé des paramètres optimaux, qui ont donné les résultats suivants: un rendement de 26,626% pour une structure PN pour le matériau  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  et un rendement de 26,882% pour la même structure pour le matériau  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ . L'ajout d'une couche intrinsèque a permis d'apporter une amélioration remarquable du courant de court circuit et du rendement. Alors, avec les paramètres optimaux, la structure PIN a représenté un

rendement de 30,052% pour le matériau  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  et 29,138% pour  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ . Notons que ces résultats sont proches à ceux trouvés dans la littérature.

Dans la deuxième étape, nous avons optimisé les performances d'une cellule solaire tandem homojonction ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  /  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ ) sous la structure PN/PN que nous avons proposé. Cette optimisation a achevé des paramètres optimaux, qui ont donné un rendement de 26,619%. L'ajout d'une jonction tunnel à base de matériau InGaN a démontré l'obligation de sa présence pour la connexion des sous cellules avec une amélioration importante des performances de la cellule tandem où les paramètres optimaux ont représenté un rendement de 26.881% avec les mêmes conditions géométriques et dopages.

Dans la troisième étape, nous avons optimisé les performances d'une cellule solaire tandem homojonction ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  /  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ ) sous la structure PIN/PIN que nous avons proposé. Cette optimisation a achevé des paramètres optimaux, qui ont donné un rendement de 28,027%. L'ajout d'une jonction tunnel à base du matériau InGaN a aussi démontré l'obligation de sa présence pour la connexion des sous cellules avec une amélioration des performances de la cellule tandem où les paramètres optimaux ont représenté un rendement de 28,909% avec les mêmes conditions géométriques et dopages. Dans la suite, nous avons optimisé les performances d'une cellule solaire tandem hétérojonction ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  /  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ ) sous la structure PIN/PIN. Nous avons étudié l'influence du taux d'Indium de l'alliage InGaN de la couche intrinsèque de la souscellule supérieure. Cette étude a donné naissance à une cellule hétérojonction sous la structure PIN/PIN (P -  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  / I -  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$  / N-  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  // P-  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ / I-  $\text{In}_{0.84}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ / N-  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ ) qui a représenté un rendement de 40.324% sans tenir compte des contraintes technologiques qui limitent toujours le photovoltaïque à base d'InGaN.

Finalement, nous avons étudié l'effet des défauts structuraux sur les performances de la cellule tandem hétérojonction ( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$  /  $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{N}$ ) sous la structure PIN/PIN, d'où ils ont démontré une dégradation générale des performances de la cellule. Les résultats qu'on a obtenus affirment les différents rendements trouvés

expérimentalement, qui sont environ de 5% pour des cellules monojonctions à base d'InGaN.

Ce travail ouvre la voie à des nouvelles perspectives dans le domaine du photovoltaïque. On propose d'étudier à l'avenir:

L'effet de la jonction tunnel, en cherchant des matériaux III-V ou autres matériaux convenables pour cette jonction tunnel pour la réalisation des cellules multijonctions à base d'InGaN.

Des structures qui simplifient les procédés de fabrication des cellules et qui diminuent les coûts de réalisation tout en produisant de hauts rendements.

L'optimisation de structures InGaN avec plus de deux jonctions.

Le dopage des couches épitaxiées afin de minimiser les défauts structuraux pour améliorer les performances de la cellule.