

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira-Béjaïa



Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, de Télécommunication et d'Électronique

## Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation

### Thème

**Modélisation et simulation d'une cellule solaire double jonction à base des matériaux (III-V)**

Présenté par :

BARKAT Leyes  
MAHTOUT Hakim

Dirigé par :

Mme. IDJDARENE.S  
Mr. LAHRECHE.A

Examiné par :

Mr. SADJI.M  
Mme. OUALI.K

Année Universitaire : 2024/2025

**Populaire et Démocratique Algérienne République**  
**وزارة التعليم العالي و البحث العلمي**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Déclaration sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans**  
**l'élaboration d'un travail de recherche**

*Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (\*)  
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : BARKAT

Prénom : Lyes

Matricule : 0187833008094

Spécialité et/ou Option : Instrumentation

Département : ATE

Faculté : ST

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Modélisation et simulation d'une cellule solaire double junctions en base des matériaux (III-V)

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le  
07/10/2025

Signature de l'intéressé

Lu et approuvé  
Lu et approuvé

(\*) Arrêté ministériel disponible sur le site [www.univ-bejaia.dz/formation](http://www.univ-bejaia.dz/formation) (rubrique textes réglementaires)

**Populaire et Démocratique Algérienne République**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Déclaration sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans**  
**l'élaboration d'un travail de recherche**

*Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (\*)  
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : ..... *Mahboub* .....

Prénom : ..... *Hakim* .....

Matricule : ..... *1919\_33011941* .....

Spécialité et/ou Option : ..... *Instrumentation* .....

Département : ..... *ATE* .....

Faculté : ..... *S.T* .....

Année universitaire : ..... *2024/2025*

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : ..... *Master* .....

Intitulé : ..... *Modélisation et simulation d'une cellule solaire  
double jonction à base de matériaux III-V* .....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le  
*07/10/2025*

Signature de l'intéressé

(\*) Lu et approuvé

*Gay*  
*Lu et approuvé*

---

(\*) Arrêté ministériel disponible sur le site [www.univ-bejaia.dz/formation](http://www.univ-bejaia.dz/formation) (rubrique textes réglementaires)

## **Remerciements**

Tout d'abord, nous exprimons notre sincère gratitude envers Allah qui nous a accordé la force, la persévérence et la sagesse indispensables pour accomplir ce travail avec succès.

Nous souhaitons exprimer notre admiration spéciale à notre encadrante Mme Souad IDJDARENE. Son savoir-faire, sa patience et ses recommandations judicieuses ont été précieuses pour la réalisation de notre mémoire. Ses éclairages ont éclairé notre chemin tout au long de ce parcours.

Un immense merci à M. Aberrezak LAHRECHE, notre co-encadrant, pour son aide précieuse dans la réalisation de ce mémoire. Son expertise et sa disponibilité ont grandement contribué à notre réussite.

Nous tenons également à remercier les membres du jury pour le temps précieux qu'ils nous ont accordé et l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail.

Nous n'oublions pas de remercier les enseignants du département ATE de l'Université Abderrahmane Mira de Béjaïa pour leur engagement dans notre formation tout au long de notre parcours universitaire.

## Dédicace

### À mes parents, mes premiers guides, mes éternels soutiens

À vous, les piliers de ma vie, les premiers visages de l'amour, du courage et du sacrifice. Depuis mon enfance, vous m'avez soutenu sans relâche — moralement, physiquement et financièrement.

Vous avez toujours été là, dans les moments d'incertitude comme dans moments de joie. C'est grâce à votre tendresse, à vos encouragements, à vos sacrifices souvent silencieux mais toujours présents, que je suis devenu la personne que je suis aujourd'hui.

Chaque pas accompli, chaque succès atteint, porte la trace de votre bienveillance, de vos prières et de votre foi inébranlable en moi.

Je vous dédie ce mémoire avec un amour infini, un profond respect et une reconnaissance éternelle.

### À Sarah, ma chère complice, et à sa maman

À toi Sarah, pour ta présence lumineuse, ton amour sincère et ton soutien sans faille. Tu as su m'apaiser dans les moments de doute, m'encourager quand le découragement menaçait, et me rappeler que je n'étais jamais seul sur ce chemin.

À ta maman, pour son accueil chaleureux, sa douceur et ses encouragements.

Elle a su m'ouvrir les bras comme un fils, avec une gentillesse rare et précieuse. Recevez toutes deux ma reconnaissance profonde et mon affection sincère.

### À la famille BARKAT et à la famille KACI

De tout cœur, à ceux qui sont parmi nous que dieu vous garde et comme à ceux qui nous ont quittés que dieu vous accueille dans son vaste paradis.

Merci pour vos prières, votre amour, vos encouragements et votre fierté silencieuse. Vous faites partie de ce que je suis, et ce travail vous revient aussi.

### À mes précieux amis, mes alliés dans cette aventure

À ceux qui, par leur présence, leur humour, leurs conseils ou même leur simple écoute, ont donné à ce parcours sa chaleur, sa force et sa couleur.

Votre amitié a été un véritable moteur tout au long de cette aventure. Un clin d'œil particulier à

**Raouf, Abdou, Lamine B&N, Alla, Tissou et Dabi**, pour les moments partagés, le soutien constant, et les souvenirs gravés.

Merci d'avoir été là, tout simplement.

### À tous mes enseignants, du premier jour d'école jusqu'aux bancs de l'université

À celles et ceux qui, par leur savoir, leur dévouement et leur patience, ont éclairé mon chemin durant ces années.

Vous m'avez transmis bien plus que des connaissances : une manière de penser, une rigueur, une curiosité qui ne m'ont jamais quitté.

À mes instituteurs, mes professeurs et mes formateurs — merci d'avoir contribué, chacun à votre manière, à forger l'étudiant et l'homme que je suis aujourd'hui.

« Chaque enfant qu'on enseigne est un homme qu'on gagne. »

—Victor Hugo

**LEYES**

## **Dédicace**

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien tout au long de mon parcours.

À mes frères, pour leur présence, leurs encouragements et leur patience.

À mes enseignants, pour leurs précieux conseils et leur encadrement.

Et à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont inspiré à persévérer malgré les difficultés.

**Hakim**

**Table des matières**

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Source d'énergie des cellules solaires .....	3
I.2.1 Rayonnement Solaire .....	3
I.2.2 Masse d'air .....	4
I.3 Cellule photovoltaïque .....	5
I.3.1 Effet photovoltaïque .....	5
I.3.2 Principe de fonctionnement .....	5
I.4 Caractéristique d'une cellule solaire .....	6
I.5 Propriétés photovoltaïques d'une cellule solaire .....	9
I.5.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	9
I.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	9
I.5.3 Puissance maximale $P_{max}$ .....	10
I.5.4 Facteur de forme FF .....	10
I.5.5 Rendement $\eta$ .....	10
I.5.6 Efficacité quantique externe (EQE) .....	10
I.6 Influence de la température et l'ensoleillement sur les cellules PV .....	11
I.6.1 Température .....	11
I.6.2 Ensoleillement .....	12
I.7 Alliance des cellules photovoltaïques .....	14
I.7.1 Association des cellules photovoltaïques en série .....	14
I.7.2 Association des cellules photovoltaïques en parallèle .....	15

## Table des matières

---

I.8 Les diverses générations de cellules photovoltaïques .....	16
I.8.1 Première génération .....	16
I.8.2 Deuxième génération .....	17
I.8.3 Troisième génération .....	18
I.9 Cellules solaires à base de InGaN .....	20
I.9.1 Cellule homo-jonction .....	20
I.9.2 Cellule hétérojonction .....	21
I.9.3 Cellule multi-jonction .....	22
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	23
I.11 Conclusion .....	24

## Chapitre II : Notion générales sur les semi-conducteurs III-V

II.1 Introduction .....	25
II.2 Définition des semi-conducteurs III-V .....	25
II.3 Alliages des semi-conducteurs III-V .....	26
II.3.1 Alliage binaire .....	26
II.3.2 Alliage ternaire .....	27
II.4 Semi-conducteurs .....	28
II.4.1 Bandes d'énergie d'un semi-conducteur .....	28
II.4.2 Gap direct et indirect .....	28
II.4.3 Semi-conducteurs intrinsèques .....	29
II.4.4 Semi-conducteurs extrinsèques .....	29
II.5 Description de nitrure de gallium-indium(InGaN) .....	30
II.6 Propriétés structurales de l'InGaN .....	30
II.7 Propriétés électriques .....	32

## Table des matières

---

II.7.1 Bande interdite de nitrure .....	32
II.7.2 Variation de l'énergie de gap dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	32
II.7.3 Variation de l'énergie interdite en fonction de la température .....	33
II.7.4 Mobilité des porteurs de charge dans les nitrures .....	34
II.7.5 Affinité électronique .....	34
II.7.6 Longueur de diffusion .....	35
II.8 Propriétés optiques .....	36
II.8.1 Indice de réfraction .....	37
II.8.2 Permittivité relative .....	38
II.8.3 Coefficient d'absorption .....	39
II.9 Génération et Recombinaison des paires électrons trous .....	39
II.9.1 Génération .....	39
II.9.2 Recombinaison .....	40
II.9.3 Mécanismes de recombinaison .....	40
II.9.3.1 Recombinaison SRH .....	40
II.9.3.2 Recombinaison Auger .....	41
II.9.3.3 Recombinaison radiative .....	41
II.10 Équations fondamentales des semi-conducteurs .....	41
II.10.1 Équation de Poisson .....	41
II.10.2 Équation de Transport .....	42
II.10.3 Équation de continuité .....	42
II.11 Conclusion .....	43

## Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III.1 Introduction .....	44
III.2 Présentation du logiciel SCAPS-1D .....	44

## Table des matières

---

III.2.1 Fonctionnement du logiciel .....	44
III.2.2 Définition de la cellule solaire .....	45
III.2.3 Adjonction des couches .....	46
III.3 Description de la structure .....	48
III.4 Simulation de la structure .....	50
III.5 Résultat de simulation .....	50
III.5.I.1 Variation des différents paramètres de la cellule tandem .....	51
III.5.1.1.1 Effet de dopage de la couche GaN .....	51
III.5.1.1.2 Effet de l'épaisseur de la couche GaN .....	53
III.5.1.1.3 Effet de dopage de la couche $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ .....	54
III.5.1.1.4 Effet de l'épaisseur de la couche $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$ .....	55
III.5.1.1.5 Effet de dopage de la couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ .....	57
III.5.1.1.6 Effet de l'épaisseur de la couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ .....	58
III.5.1.1.7 Effet de dopage de la couche InN .....	59
III.5.1.1.8 Effet de l'épaisseur de la couche InN .....	60
III.5.2 Cellule Tandem optimisée .....	61
III.6 Conclusion .....	62
Conclusion générale .....	63
Références bibliographiques .....	65

## **Liste des figures**

<b>Figure I.1 :</b> Répartition spectrale du rayonnement solaire .....	4
<b>Figure I.2 :</b> Schéma de la masse d'air (AMx) en fonction de la position géographique .....	5
<b>Figure I.3 :</b> Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	6
<b>Figure I.4 :</b> Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement .....	7
<b>Figure I.5 :</b> Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque .....	8
<b>Figure I.6 :</b> Effet de la température sur la caractéristique I(V).....	12
<b>Figure I.7 :</b> Effet de la température sur la caractéristique P(V) .....	12
<b>Figure I.8 :</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) .....	13
<b>Figure I.9 :</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) .....	13
<b>Figure I.10 :</b> Caractéristiques résultantes d'un groupement de Ns cellules en série .....	14
<b>Figure I.11 :</b> Montage en série des panneaux PV .....	15
<b>Figure I.12 :</b> Caractéristiques résultantes d'un groupement de Np cellules en parallèle .....	15
<b>Figure I.13 :</b> Montage en parallèle des panneaux PV .....	16
<b>Figure I.14 :</b> Cellule solaire PN homo-jonction proposée par Zhang et al .....	20
<b>Figure I.15 :</b> Cellule solaire PIN homo-jonction étudiée par Doolittle et al .....	21
<b>Figure I.16 :</b> Cellule solaire à puits quantiques InGaN/GaN étudiée par Liu et al .....	22
<b>Figure I.17 :</b> Cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al .....	22
<b>Figure I.18 :</b> Cellule solaire multi-jonction proposée par Young et al .....	23
<b>Figure II.1 :</b> Tableau périodique .....	26
<b>Figure II.2 :</b> Semi-conducteurs à gap direct .....	28
<b>Figure II.3 :</b> Semi-conducteurs à gap indirect .....	29
<b>Figure II.4 :</b> Structure wurtzite .....	31
<b>Figure II.5 :</b> Structure zinc-blende .....	31

<b>Figure II.6 :</b> Evolution de largeur de la bande interdite en fonction de x .....	33
<b>Figure II.7 :</b> Variation de l'affinité électronique dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction x .....	35
<b>Figure II.8 :</b> Indice de réfraction du GaN .....	37
<b>Figure II.9 :</b> Processus de recombinaison dans les semi-conducteurs .....	40
<b>Figure III.1 :</b> Panneau de démarrage de SCAPS : panneau d'action ou panneau principal .....	45
<b>Figure III.2 :</b> Définition de la structure d'une cellule solaire .....	46
<b>Figure III.3 :</b> Définition des paramètres des couches de la cellule .....	47
<b>Figure III.4 :</b> Structure de cellule double jonction .....	48
<b>Figure III.5 :</b> Script de simulation SCAPS-1D pour la cellule tandem .....	49
<b>Figure III.6 :</b> Effet de la variation du dopage GaN de sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule ...	52
<b>Figure III.7 :</b> Effet de la variation de l'épaisseur de GaN sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule .....	53
<b>Figure III.8 :</b> Effet de la variation du dopage de $\text{In}0.66\text{Ga}0.34\text{N}$ sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule .....	54
<b>Figure III.9 :</b> Effet de la variation de l'épaisseur de $\text{In}0.66\text{Ga}0.34\text{N}$ sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule .....	56
<b>Figure III.10 :</b> Effet de la variation du dopage de $\text{In}0.8\text{Ga}0.2\text{N}$ sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule .....	57
<b>Figure III.11 :</b> Effet de la variation de l'épaisseur de $\text{In}0.8\text{Ga}0.2\text{N}$ sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule .....	58
<b>Figure III.12 :</b> Effet de la variation du dopage de InN sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule .....	59
<b>Figure III.13 :</b> Effet de la variation de l'épaisseur de InN sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule .....	60
<b>Figure III.14 :</b> Caractéristique courant-tension de la cellule tandem .....	61

**Liste des tableaux**

<b>Tableau I.1 :</b> Système solaire- hors-série spécial recherche solaire-juillet 2006 .....	19
<b>Tableau II.1 :</b> Paramètres caractéristiques pour quelques binaires III-V .....	27
<b>Tableau II.2 :</b> Paramètres structuraux a, c et u pour le GaN et l'InN .....	31
<b>Tableau II.3 :</b> Paramètres de Varshni et gap d'énergie à 0 K et 300 K du GaN et de l'InN .....	34
<b>Tableau II.4 :</b> Propriétés électriques du GaN, InN et de l'InGaN à 300 K .....	36
<b>Tableau III.1 :</b> Paramètres utilisés pour la simulation de la cellule Top, Bottom et Tandem .....	50
<b>Tableau III.2 :</b> Résultats de simulation de la cellule Top, Bottom et Tandem .....	51
<b>Tableau III.3 :</b> Paramètres caractéristiques de la cellule tandem optimisée .....	62
<b>Tableau III.4 :</b> Paramètres électriques de la cellule tandem optimisée .....	62

### Liste des abréviations

Abréviation	Définition
AM	Air mass
BC	Bande de conduction
BV	Bande de valence
Ec	Énergie de bande de conduction
Eg	Gap d'énergie interdite
EQE	Efficacité quantique externe
Ev	Énergie de bande de valence
FF	Facteur de forme
Icc	Courant de court-circuit
Imax	Courant maximale
Iph	Photo-courant
IR	Infrarouge
$N_A$	Densité d'atome accepteur
Nc	Densité d'états effective de bande de conduction
$N_D$	Densité d'atome donneur
Np	Groupement de cellules en parallèle
Ns	Groupement de cellules en série
Nv	Densité d'états effective de bande de valence
Pmax	Puissance maximale
PV	Photovoltaïque
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance shunt
SRH	Shockley-Read-Hall
$\mu_n$	Mobilité des électrons
$\mu_p$	Mobilité des trous
UV	Ultraviolet
Vmax	Tension maximale
Vco	Tension de circuit ouvert
Vs	Tension de seuil

## Introduction générale

La demande énergétique mondiale continue d'augmenter, alimentée par l'augmentation de la population, l'industrialisation et l'amélioration des conditions de vie, notamment dans les pays en développement. Cette dynamique, malgré qu'elle soit indispensable au progrès socio-économique, elle impose une pression croissante sur les ressources énergétiques conventionnelles, ce qui peut engendrer un risque imminent d'une crise énergétique mondiale. Dans ce contexte, la question de la durabilité énergétique devient une priorité stratégique à l'échelle planétaire.

L'exploitation intensive des sources d'énergies fossiles tel que le charbon, le pétrole et le gaz naturel pour la production d'électricité constitue aujourd'hui l'une des principales sources de pollution de l'aire et d'émissions de gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Ces émissions sont les principales responsables du réchauffement climatique, l'acidification des océans, la perturbation des écosystèmes, et elles accentuent également la fréquence des catastrophes naturelles. La dépendance persistante à ces ressources non renouvelables, dont les réserves s'amenuisent, expose également les sociétés modernes à des instabilités économiques et géopolitiques croissantes.

Face à ces défis multiples, le recours à des sources d'énergie renouvelables, propres et inépuisables s'impose comme une solution incontournable. Parmi elles, l'énergie solaire avec une ressource abondante, largement disponible à l'échelle du globe, capable de répondre durablement aux besoins énergétiques mondiaux occupe une place centrale. Contrairement aux sources fossiles, la conversion de l'énergie solaire en électricité, via des dispositifs photovoltaïques, ne génère aucune émission nocive pour l'environnement. De plus, les récentes progrès technologiques ont permis d'améliorer considérablement l'efficacité des cellules solaires tout en réduisant leur coût, rendant cette technologie de plus en plus accessible et compétitive [1].

Parmi les matériaux les plus efficaces et promoteurs dans le domaine photovoltaïque en trouve les matériaux semi-conducteurs du groupe III-V. Ils sont des composés d'éléments des colonnes III et V du tableau périodique. Ils permettent d'ajuster la bande interdite sur une large plage d'énergies, ce qui les rend capables d'absorber différentes longueurs d'onde de la lumière solaire. InGaN (indium gallium nitride) est l'un des matériaux III-V, notamment III-N (nitride), qui se distingue par sa bande interdite modulable, sa forte absorption optique, sa stabilité thermique et sa résistance aux radiations. Ces atouts font de ce matériau un candidat idéal pour les cellules solaires à haut rendement. Il permet de développer

des cellules à la fois efficaces, durables et adaptées à des environnements exigeants [2].

Dans ce contexte, notre travail porte sur l'optimisation et la simulation d'une cellule solaire double jonction à base des matériaux III-V, en particulier l'alliage InGaN. L'objectif est d'étudier les performances de cette cellule à travers une analyse détaillée de sa structure et des propriétés des matériaux utilisés.

Ce manuscrit est organisé comme suit :

Le premier chapitre est un aperçu général de l'énergie solaire ainsi que des principes de base des cellules photovoltaïques. En examinant la source d'énergie solaire, le phénomène photovoltaïque, ainsi que le fonctionnement d'une cellule solaire. Il inclut également les caractéristiques qui influencent leur efficacité, les diverses technologies et structures disponibles, ainsi que les avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre consiste à la description des matériaux de type III-V et leurs alliages, et une part est donnée au matériau InGaN, qui possède des caractéristiques électriques et optiques ajustables. Les propriétés fondamentales, comme la bande interdite et la mobilité des porteurs, ainsi que les processus de génération et de recombinaison des paires électron-trou, qui sont essentiels pour comprendre le fonctionnement des cellules photovoltaïques, sont donnés.

Le troisième chapitre contient deux sections. La première présente la méthodologie suivit pour réaliser la simulation d'une cellule solaire à double jonction à base des matériaux III-N sur le logiciel SCAPS. La deuxième est dédiée à l'optimisation des paramètres en analysant les divers paramètres technologiques, tels que l'épaisseur des couches actives et le dopage des matériaux ainsi que la discussion des résultats.

Une conclusion générale qui résume les différents résultats obtenus et quelques perspectives envisagées.

## **Chapitre I**

### **Généralités sur les cellules photovoltaïques**

#### **I.1 Introduction**

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) figure parmi les sources renouvelables les plus répandues. Son principe repose sur la transformation directe de la lumière en électricité grâce à des cellules PV.

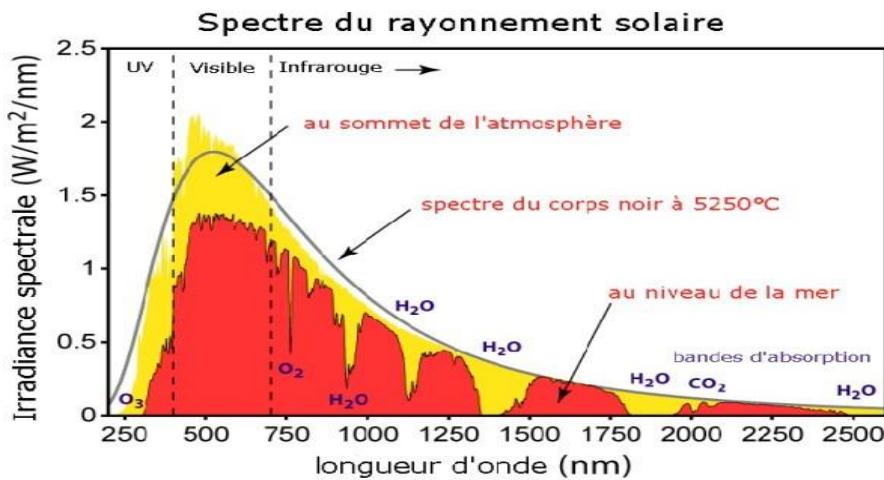
Ce chapitre présente des notions fondamentales sur les cellules solaires. Nous rappelons en premier lieu la source de l'énergie solaire et le principe de l'effet photovoltaïque. Ensuite, nous décrivons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, ainsi, leurs caractéristiques principales et l'effet de l'ensoleillement et la température sur les ces composants. En deuxième lieu, nous explorons les différentes générations des cellules PV, en illustrant leurs rendements en fonction de la structure, une grande part est donnée à celle à base de matériau InGaN, puis nous citons quelques avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

#### **I.2 Source d'énergie des cellules solaires**

##### **I.2.1 Rayonnement Solaire**

L'énergie que le Soleil émet se présente d'abord sous forme de rayonnements électromagnétiques, ensemble appelé rayonnement solaire, qui est la principale source d'énergie extérieure pour notre atmosphère. La lumière du Soleil se propage à la vitesse de la lumière. Ce rayonnement est composé d'une variété de longueurs d'onde qui incluent des parties ultraviolettes, visibles et infrarouges du spectre solaire [3]. La figure I.1 illustre la quantité d'énergie radiante reçue du Soleil de la manière suivante :

La région ultraviolette (UV) s'étend de 200 nm à 380 nm, la lumière visible perceptible par l'œil humain, couvre la plage de 380 nm à 780 nm et la région infrarouge (IR) s'étend de 780 nm à 10000 nm.



**Figure I.1 :** Répartition spectrale du rayonnement solaire [3].

### I.2.2 Masse d'air

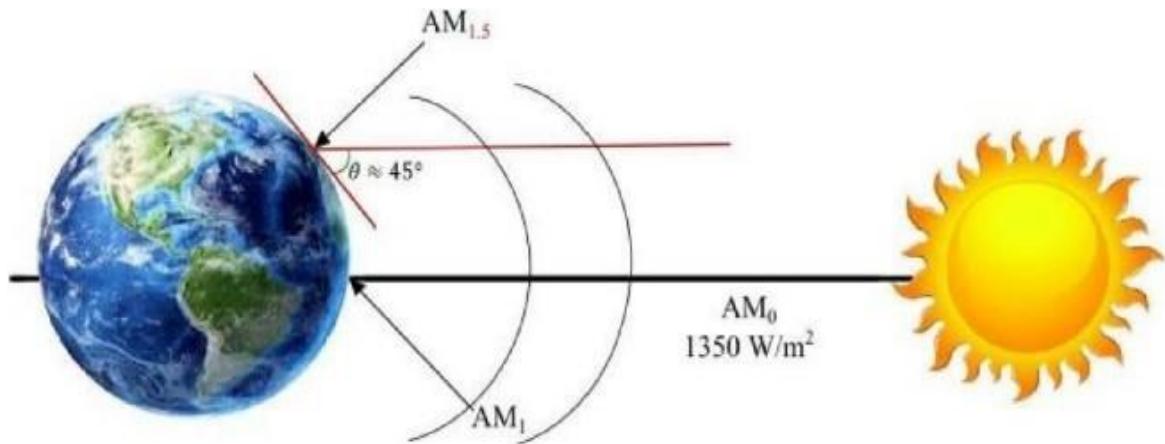
Dans la figure I.1, on observe clairement que le spectre solaire mesuré dans l'espace diffère de celui que l'on trouve sur Terre. Cette différence est due à l'atténuation et à la filtration causées par l'absorption de certaines longueurs d'onde par les molécules présentes dans l'atmosphère, telles que l'ozone ( $O_3$ ) et la vapeur d'eau ( $H_2O$ ).

Pour tenir compte de ces variations, afin d'évaluer l'efficacité des panneaux solaires et de caractériser les divers spectres solaires, un coefficient connu sous le nom de masse d'air ( $AM_x$ ) est utilisé [3] (voir Figure I.2). Son expression est donnée par :

$$AM_x = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- $\theta$  : l'angle que fait le soleil avec son zénith.
- $AM0$  : la masse d'air nulle en dehors de l'atmosphère.
- $AM1$  : le rayonnement quand il traverse l'atmosphère avec un angle de  $0^\circ$  (l'équateur).
- $AM1.5$  : le rayonnement faisant un angle de  $41,8^\circ$  par rapport à l'équateur.



**Figure I.2 :** Schéma de la masse d'air (AMx) en fonction de la position géographique [3].

## I.3 Cellule photovoltaïque

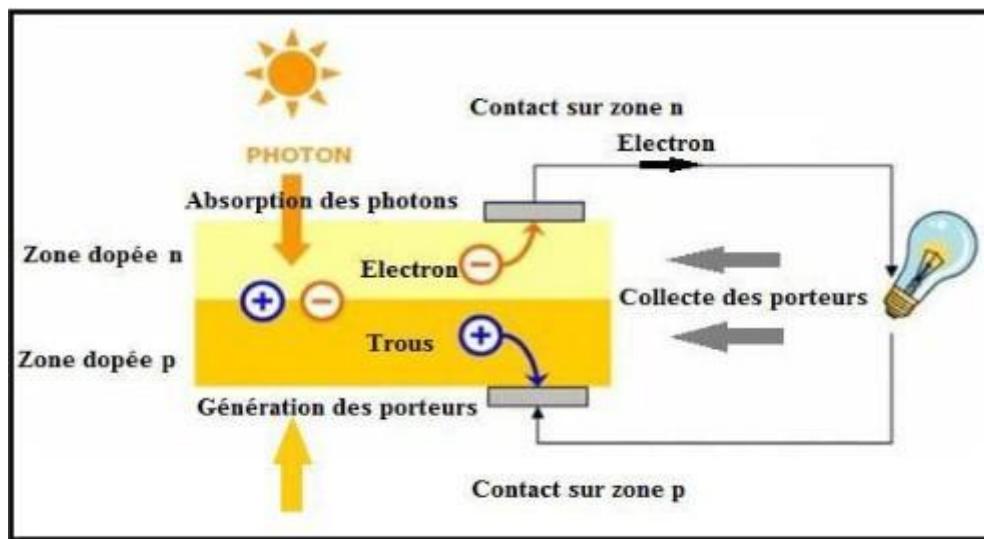
### I.3.1 Effet photovoltaïque

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. 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. L'effet photovoltaïque est le phénomène physique par lequel certains matériaux, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, génèrent une différence de potentiel électrique (tension) et un courant électrique. C'est le principe de base sur lequel fonctionnent les cellules photovoltaïques pour convertir la lumière solaire directement en électricité [4].

### I.3.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque, qui permet de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Ce processus s'appuie sur la génération et le déplacement de charges électriques positives et négatives dans un matériau semi-conducteur sous l'action de la lumière. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [5] :

- Absorption des photons grâce à l'écart entre les bandes de valence et de conduction.
- Conversion de l'énergie photonique en énergie électrique, ce qui permet de créer les paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- La jonction p-n ou l'hétérojonction, lorsqu'il s'agit de deux semi-conducteurs différents permet de collecter les particules générées dans le matériau.

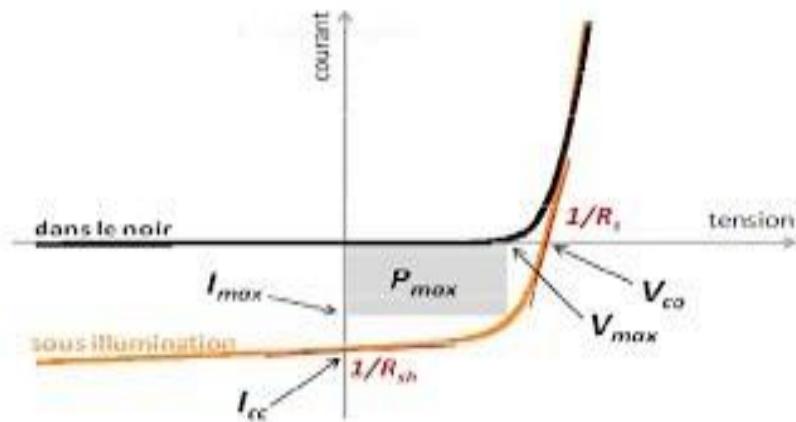


**Figure I.3 :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [5].

## I.4 Caractéristique d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque présente une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire. L'analyse de la variation du courant (I) en fonction de la tension (V) à l'obscurité et sous éclairement permet d'évaluer les performances de la cellule solaire.

La figure I.4 illustre un exemple de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire, à la fois sans et avec éclairage [3].



**Figure I.4 :** Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement [3].

On observe que la cellule solaire se comporte comme une diode classique à l'obscurité : elle commence à conduire lorsque la tension appliquée dépasse la tension maximale  $V_{max}$ .

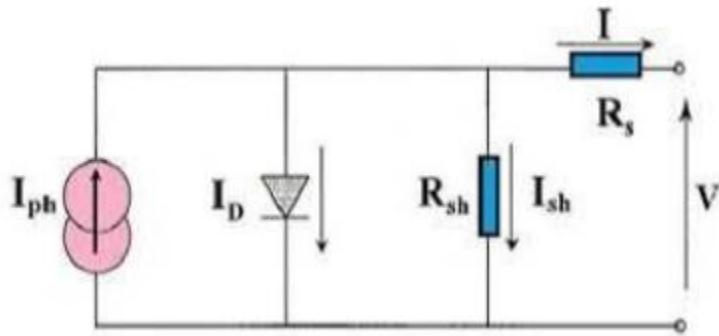
Pour une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique courant-tension (I-V) peut être décrite par la relation suivante [3] :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s (e^{\frac{qV}{akT}} - 1) \quad (\text{I.2})$$

Avec :

- $I_{ph}$  : le courant généré sous éclairement.
- $I_s$  : le courant de saturation.
- $k$  : la constante de Boltzmann ( $1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ).
- $T$  : la température absolue en Kelvin (K).
- $q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb.
- $a$  : le facteur technologique dépendant du type de diode et de la manière dont elle est fabriquée,  $1 < a < 2$  pour les diodes en silicium.

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque peut être décrit par le modèle à une exponentielle montré sur la figure I.5. :



**Figure I.5 :** Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque [6].

- **Générateur de courant ( $I_{ph}$ ) :** Il produit le courant photo-généré  $I_{ph}$ , correspondant au courant généré par l'effet photovoltaïque.
- **Diode (D) :** Elle représente la jonction p-n de la cellule photovoltaïque.
- **Résistance série ( $R_s$ ) :** Elle modélise les pertes résistives internes, notamment dues aux métallisations et à l'impédance des électrodes et du matériau. Ces pertes entraînent une différence entre la tension aux bornes de la cellule et celle aux bornes de la jonction P-N. Idéalement, cette résistance doit être aussi faible que possible pour minimiser son impact sur le courant de la cellule.
- **Résistance parallèle (résistance shunt  $R_{sh}$ ) :** Elle modélise la fuite de courant entre les zones n et p de la jonction. Cette résistance doit être aussi élevée que possible pour limiter ces pertes.

Pour une cellule réelle, la caractéristique courant-tension (I-V) est donnée par la relation (I.3) [3] :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{akT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.3})$$

## I.5 Propriétés photovoltaïques d'une cellule solaire

### I.5.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant mesuré lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, ce qui correspond à une tension  $V$  nulle dans le schéma équivalent. Ce courant augmente de manière linéaire avec l'intensité de l'éclairement reçu par la cellule. Il dépend également de plusieurs facteurs, tels que la surface exposée à la lumière, la longueur d'onde du rayonnement, la mobilité des porteurs de charge et la température [5]. On a donc la relation suivante :

$$I = I_{ph} \quad (\text{I.4})$$

### I.5.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

La tension de circuit ouvert correspond à la tension au bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le courant traversant est nul. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [6].

$$V_{oc} = \frac{k \times T_c}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{I.5})$$

Avec :

- $\frac{k \times T_c}{q}$  : la potentielle thermodynamique.
- $T_c$  : la température absolue.
- $q$  : la constante de charge d'un électron= $1.602 \times 10^{-19}$  C.
- $k$  : la constante de Boltzmann= $1.38 \times 10^{-23}$ .
- $I_{ph}$  : le photo-courant.
- $I_s$  : le courant de saturation inverse.

### I.5.3 Puissance maximale Pmax

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance. Elle est donnée par la relation [6] :

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (\text{I.6})$$

### I.5.4 Facteur de forme FF

C'est un paramètre important utilisé à partir de la caractéristique (I-V) pour qualifier l'efficacité et le vieillissement de la cellule. Défini aussi par le rapport entre la puissance maximale et le produit Icc et Vco [6].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{I.7})$$

### I.5.5 Rendement $\eta$

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_i$  [6].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{P_i} \quad (\text{I.8})$$

### I.5.6 Efficacité quantique externe (EQE)

C'est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents [6]. Il est défini comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{e}{e} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{h.c}{e.\lambda} \quad (\text{I.9})$$

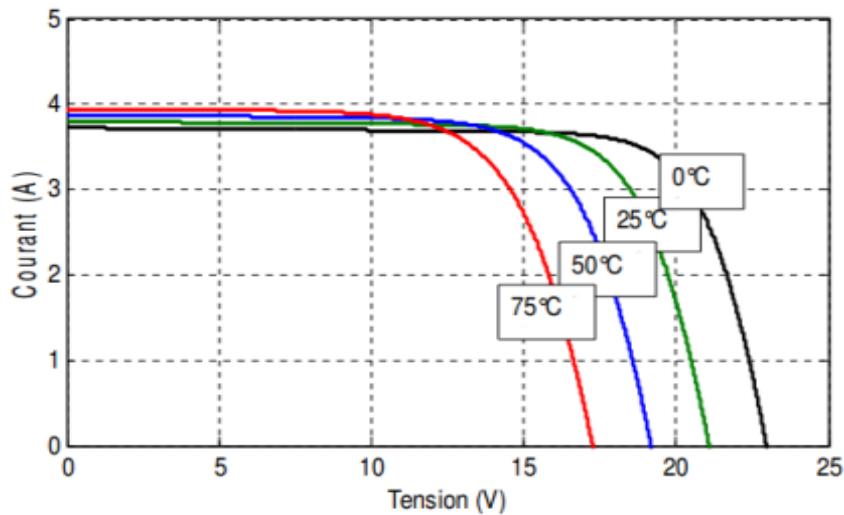
D'où :

- $I_{cc}(\lambda)$  : le courant de court-circuit ( $A.cm^{-2}$ ).
- $\phi(\lambda)$  : la puissance lumineuse incidente ( $w.cm^{-2}$ ).
- $\lambda$  : la longueur d'onde monochromatique ( $nm$ ).
- $h$  : la constante de Planck ( $J.s$ ).
- $c$  : la vitesse de la lumière ( $J.ms^{-1}$ ).
- $e$  : la charge électronique.
- $E(\lambda)$  : L'énergie du photon.

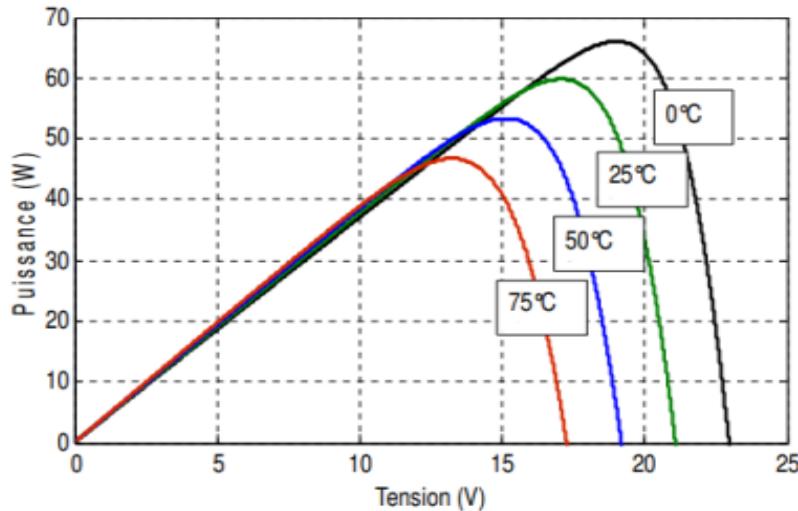
## I.6 Influence de la température et de l'ensoleillement sur les cellules PV

### I.6.1 Température

La température joue un rôle important pour les cellules photovoltaïques. Comme le montre la figure I.6 (pour un niveau d'irradiation G constant ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ )), le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, cette dernière influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue, et par contre la puissance maximale du générateur se réduit lorsque la température augmente comme l'illustre la figure I.7 [7].



**Figure I.6 :** Effet de la température sur la caractéristique I(V) [7].

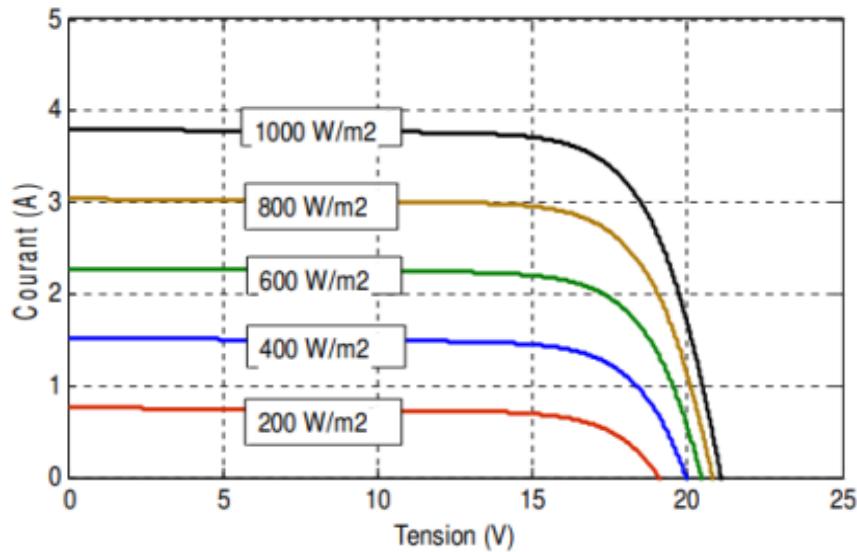


**Figure I.7 :** Effet de la température sur la caractéristique P(V) [7].

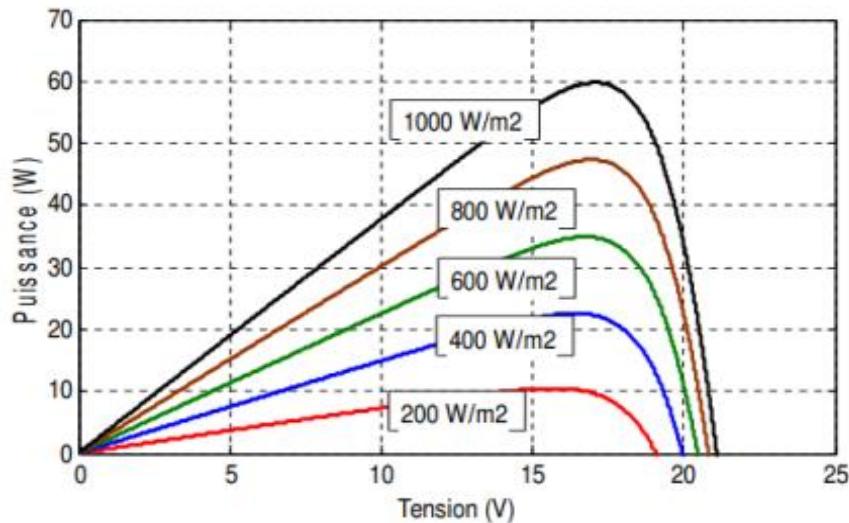
## I.6.2 Ensoleillement

Les figures I.8 et I.9 montrent comment l'irradiance affecte le fonctionnement du panneau photovoltaïque (avec une température constante  $T=25^\circ$ ) où on constate d'abord que le courant produit augmente avec l'éclairement comme le montre la figure I.8. Ensuite la figure I.9 démontre que la puissance suit cette tendance à la hausse mais cet effet bénéfique est atténué par l'échauffement du panneau qui réduit le

rendement global, ce qui nécessite de trouver un équilibre entre un bon éclairement et une gestion thermique efficace pour optimiser la production énergétique tout en notant que la tension à puissance maximale varie en fonction de l'irradiance [7].



**Figure I.8 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) [7].



**Figure I.9 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) [7].

## I.7 Alliance des cellules photovoltaïques

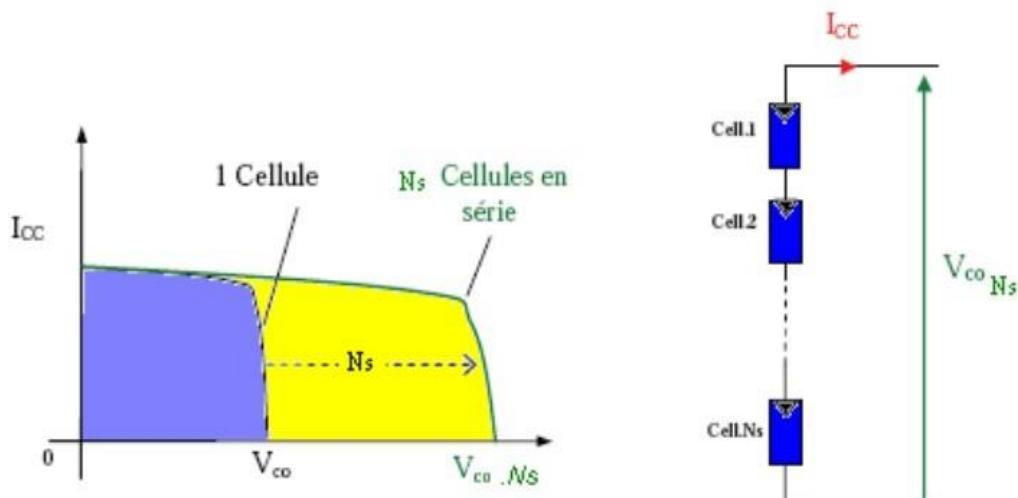
Une cellule photovoltaïque élémentaire est un générateur électrique de faible puissance, souvent insuffisante pour les applications domestiques ou industrielles. Pour augmenter la puissance, on associe plusieurs cellules, soit en série, soit en parallèle, créant ainsi un générateur photovoltaïque.

En série, les tensions des cellules s'additionnent, augmentant la tension totale. En parallèle, c'est le courant qui augmente, permettant une production d'énergie plus adaptée [8].

### I.7.1 Association des cellules photovoltaïques en série

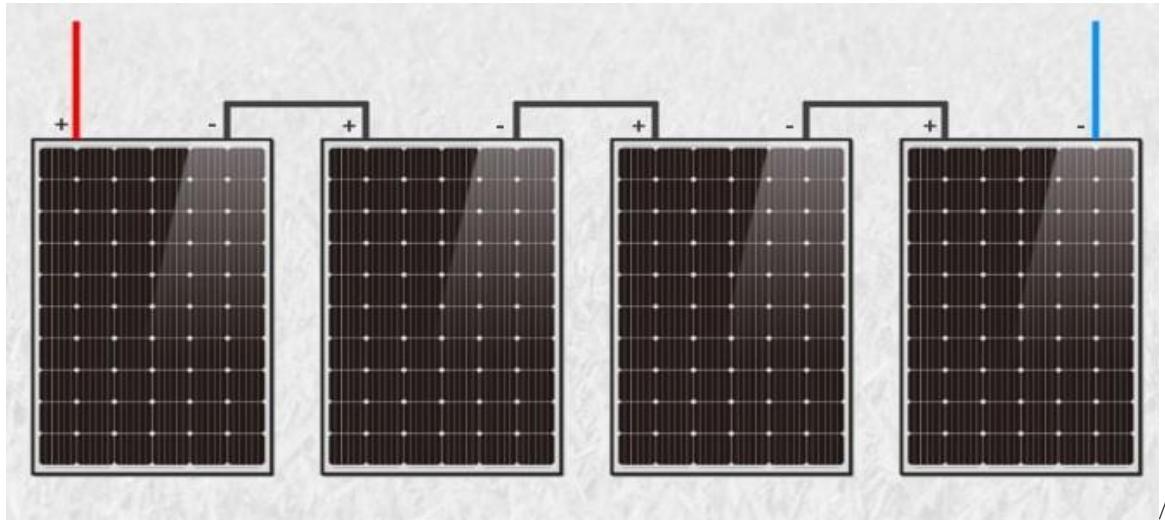
Un groupement de ( $N_s$ ) cellules en série permet d'accroître la tension du générateur photovoltaïque. Dans ce cas, les cellules sont parcourues par le même courant, et la caractéristique globale du groupement en série est obtenue en additionnant les tensions individuelles de chaque cellule.

La figure I.10 illustre les caractéristiques électriques d'un tel assemblage en série de ( $N_s$ ) cellules [8].



**Figure I.10 :** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_s$  cellules en série [8].

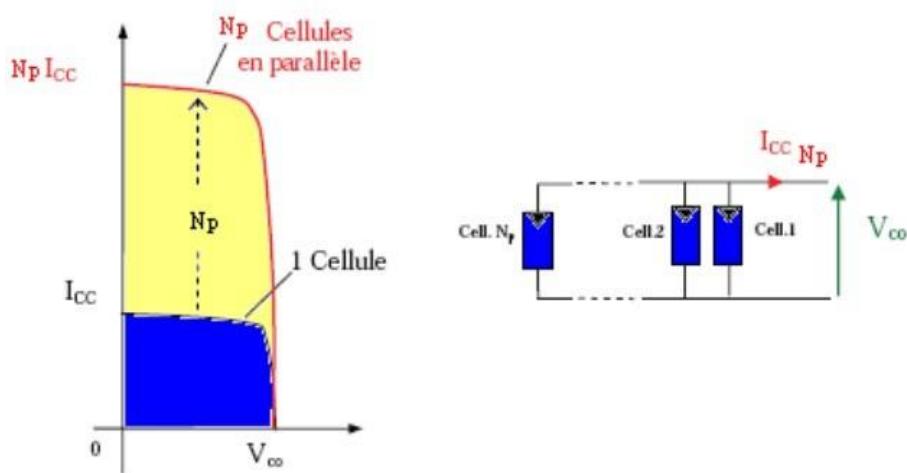
La figure I.11 montre un exemple de montage des panneaux solaires en série.



**Figure I.11:** Montage en série des panneaux PV [8].

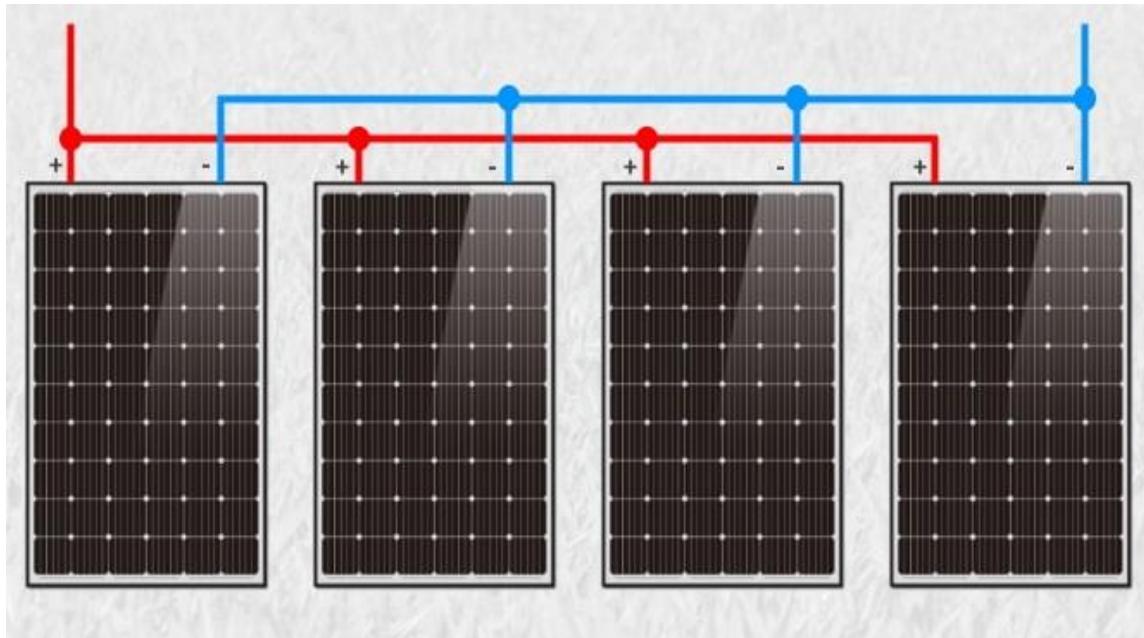
### I.7.2 Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Un groupement parallèle de ( $N_p$ ) cellules permet d'augmenter le courant de sortie du générateur photovoltaïque. Lorsque des cellules identiques sont connectées en parallèle, elles sont soumises à la même tension, et la caractéristique globale du groupement est obtenue en additionnant les courants individuels de chaque cellule. La figure I.12 présente les caractéristiques électriques d'un tel assemblage parallèle de ( $N_p$ ) cellules [8].



**Figure I.12 :** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle [8].

La figure I.13 montre un exemple de montage des panneaux solaires en parallèle.



**Figure I.13 :** Montage en parallèle des panneaux PV [8].

## I.8 Diverses générations de cellules photovoltaïques

À l'heure actuelle, on distingue trois générations de cellule photovoltaïque en fonctions des développements technologiques, sont comme suit :

### I.8.1 Première génération

Les cellules solaires de première génération reposent sur une technologie à simple jonction p-n utilisant le silicium cristallin comme matériau semi-conducteur. Elles se divisent en deux catégories principales selon leur structure cristalline :

- Les cellules monocristallines (mono-Si) sont fabriquées à partir d'un silicium ultra pur. Ce procédé nécessite plusieurs étapes de purification approfondie et une cristallisation précise, ce qui en fait une technologie coûteuse et énergivore. Cependant, cette structure cristalline parfaite leur permet d'atteindre des rendements élevés, typiquement compris entre 16% et 24% [9].

- Les cellules poly-cristallines (poly-Si), actuellement les plus répandues avec environ 50% du marché, présentent une structure composée de multiples cristaux. Leur procédé de fabrication, moins exigeant que pour le monocristallin, utilise des techniques de solidification dirigée produisant des cristaux de grande taille organisés en structures colonnaires. Cette configuration permet de limiter l'impact des joints de grains tout en offrant un bon compromis performance/prix, avec des rendements variant de 14% à 18% pour un coût de production sensiblement inférieur à celui des cellules monocristallines [9].

Le silicium monocristallin (haut rendement) et poly-cristallin (coût réduit) restent limités par leur jonction unique et la nécessité de silicium pur.

### I.8.2 Deuxième génération

Les cellules solaires de deuxième génération reposent sur une technologie innovante de dépôt de couches minces de matériaux semi-conducteurs sur un substrat. Avec des épaisseurs variant de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres, ces cellules se déclinent en trois technologies principales :

- Les cellules à base de silicium amorphe (a-Si) se distinguent par leur procédé de fabrication moins coûteux et plus écologique que le silicium cristallin. Déposées sur des substrats en verre, ces cellules présentent l'avantage de fonctionner efficacement même en conditions de faible ensoleillement. Cependant, leur rendement modeste (5- 8%) et leur phénomène de "stabilisation sous lumière" (perte de rendement initiale) limite leur adoption. Leur durée de vie d'environ 10 ans et les incertitudes sur les procédés de fabrication constituent des défis supplémentaires [9].
- Les cellules au tellurure de cadmium (CdTe) représentent la technologie la plus innovante en termes de réduction des coûts. Leur excellente capacité d'absorption lumineuse permet d'atteindre des rendements approximatifs de 17%. Cependant, la toxicité du cadmium pose des problèmes environnementaux et freine le développement de cette technologie [10].
- Les cellules CIS/CIGS (cuivre – indium – sélénium/gallium) affichent des performances en laboratoires, avec des rendements dépassant 20%. Leur potentiel est néanmoins limité par la rareté des matériaux nécessaires à leur fabrication, ce qui constitue un défi majeur pour leur industrialisation à grande échelle [10].

Les technologies de deuxième génération, plus économiques et flexibles, offrent une alternative aux cellules cristallines. Toutefois, leur faible rendement, leur durée de vie limitée et leur impact environnemental réduisent leur adoption sur le marché.

### **I.8.3 Troisième génération**

Les cellules solaires de troisième génération marquent une avancée majeure dans le domaine photovoltaïque car elles peuvent dépasser le rendement de 20%. Contrairement aux technologies traditionnelles, ces nouveaux dispositifs combinent des matériaux innovants comme les polymères organiques avec des procédés de fabrication révolutionnaires. Leur principal atout réside dans leur excellente efficacité énergétique tout en maintenant des coûts de production compétitifs. Le secteur bénéficie actuellement d'une automatisation poussée des chaînes de production, particulièrement pour les cellules en couches minces. Cette modernisation industrielle permet d'atteindre trois objectifs clés : amélioration des rendements de conversion, optimisation des procédés de fabrication, et réduction significative des coûts. Ces progrès techniques s'accompagnent de découvertes majeures dans deux domaines : le développement de nouveaux matériaux photovoltaïques aux propriétés améliorées, et la mise au point de méthodes de production plus efficaces [10].

Le tableau I.1 synthétise les performances (rendements cellule/module en labo et commercial) et le stade de développement des différentes générations de cellules photovoltaïques

**Tableau I.1** : Système solaire- hors-série spécial recherche solaire-juillet 2006 [11].

<i>Type</i>	<i>Rendement cellule (en Labo)</i>	<i>Module (en Labo)</i>	<i>Module (commercial)</i>	<i>Niveau de développement</i>
<i>1ère génération</i>				
<i>Silicium monocristallin</i>	24.70%	22.70%	12-20%	Production industrielle
<i>Silicium polycristallin</i>	20.30%	16.20%	11-15%	Production industrielle
<i>2ème génération</i>				
<i>Silicium amorphe</i>	13.40%	10.40%	5-9%	Production industrielle
<i>Silicium cristallin en couche mince</i>		9.40%	7%	Production industrielle
<i>CIS</i>	19.30%	13.50%	9-11%	Production industrielle
<i>CdTe</i>	16.70%		6-9%	Prêt pour le production
<i>3ème génération</i>				
<i>Cellule organique</i>	5.70%			Au stade de la recherche
<i>Cellule de Gratzel</i>	11%	8.40%		Au stade de la recherche
<i>Cellules multi-jonction</i>	39%	25-30%		Au stade de la recherche

## I.9 Cellules solaires à base de InGaN

L'utilisation d'alliages InGaN pour les cellules photovoltaïques, initialement proposée par J. Wu en 2003 dans son étude "Superior Radiation Resistance of InGaN Alloys: Full Solar Spectrum Photovoltaic Materials", présente des caractéristiques remarquables. Ces matériaux se distinguent par leur gap ajustable et leur excellente résistance aux radiations. Depuis cette découverte, de nombreuses recherches ont été consacrées à ces alliages. Leur application dans la fabrication de cellules solaires révèle un potentiel considérable, comme en témoignent les résultats probants obtenus pour différents types de cellules : multi-jonctions, hétérojonctions et homo-jonctions [12].

### I.9.1 Cellule homo-jonction

En 2007, Zhang et al, ont mené une étude par simulation sur une cellule solaire PN à simple jonction en  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ , éclairée sous le spectre AM1.5G dans la gamme (0,32–1,32 µm), en utilisant le logiciel AMPS (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures). Pour modéliser la mobilité des porteurs dans l'InGaN en fonction du dopage, ils ont adopté les paramètres de mobilité du GaN. Le modèle de durée de vie pour représenter le processus de génération-recombinaison. Après optimisation des épaisseurs et des niveaux de dopage des différentes couches, ils ont obtenu un rendement de conversion optimal de 20,284 % pour une concentration de dopage de  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dans les deux régions (P et N), avec une épaisseur de 130 nm pour la couche P et 270 nm pour la couche N [13].

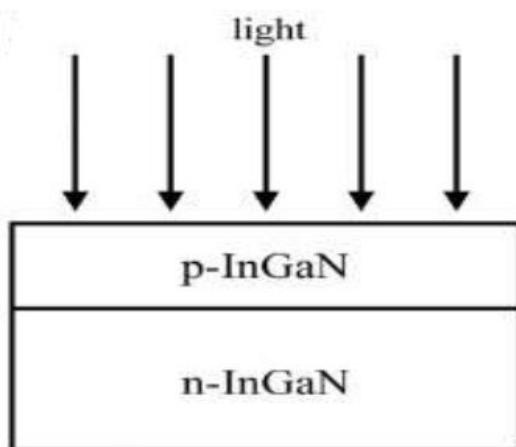
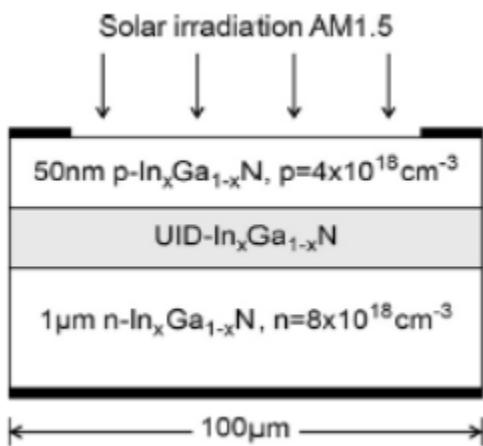


Figure I.14 : Cellule solaire PN homo-jonction proposée par Zhang et al [13].

Des simulations numériques menées par Doolittle et al, en 2014 ont évalué les performances photovoltaïques d'une structure PIN sous éclairement AM1.5, en étudiant l'influence de la concentration en indium dans la couche intrinsèque (i-InGaN). Leurs simulations révèlent un rendement maximal de 17% pour une épaisseur de 500 nm et une teneur en indium de 55%. Ces résultats démontrent que les cellules solaires InGaN atteignent leurs meilleures performances avec des compositions riches en indium (>50%), optimisant ainsi l'absorption du spectre solaire [14].

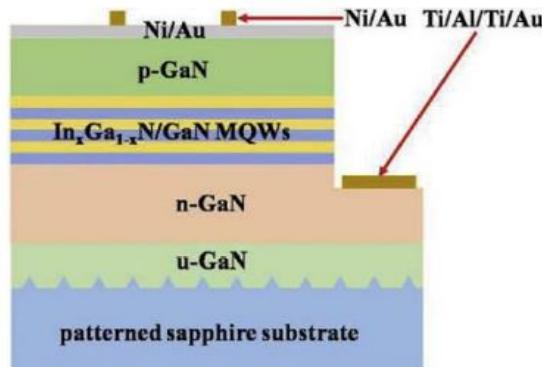


**Figure I.15 :** Cellule solaire PIN homo-jonction étudiée par Doolittle et al [14].

### I.9.2 Cellule hétérojonction

En 2011, Asgari et al, ont modélisé une cellule solaire à trous quantiques InGaN/GaN. Leurs simulations, réalisées sous illumination AM1.5, ont démontré qu'une composition optimale en indium de 63% permettait d'atteindre un rendement de conversion remarquable de 35% [14].

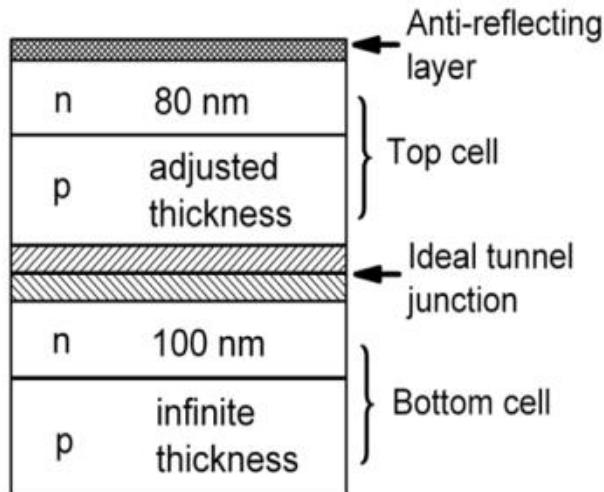
En 2017, Liu et al, se sont intéressés à deux architectures de cellules solaires à trous quantiques InGaN/GaN., en variant la concentration en indium avec une première cellule contenant 14% d'indium atteignant un rendement de conversion de 3,56% tandis qu'une seconde cellule avec 19% d'indium ne parvenait qu'à 1,04% de rendement. 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 [14].



**Figure I.16 :** Cellule solaire à puits quantiques InGaN/GaN étudiée par Liu et al [14].

### I.9.3 Cellule multi-jonction

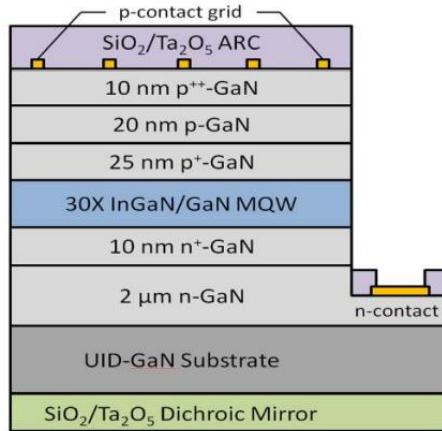
Des recherches ont également porté sur les cellules solaires multi-jonctions à base d'InGaN. En 2008, une structure à double jonction a fait l'objet d'une modélisation par Zhang et al : la première avec 48% d'indium et la seconde avec 73% d'indium, atteignant théoriquement un rendement de conversion remarquable de 35,1% [14].



**Figure I.17 :** Cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al [14].

En 2014, Young et al, ont fabriqué une cellule multi-jonction avec des puits quantiques InGaN/GaN déposés par MOVPE (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy), en utilisant un revêtement optique large bande

pour capter davantage de lumière, cette structure testée sous éclairement AM0 a atteint un rendement de 3,33% avec une tension de circuit ouvert de 2,26 V et un courant de court-circuit de 2,97 mA/cm<sup>2</sup> [13].



**Figure I.18 :** Cellule solaire multi-jonction proposée par Young et al [14].

## I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire présente de nombreux avantages [15] :

- Impact environnemental réduit : L'énergie solaire est renouvelable et inépuisable, elle réduit l'utilisation des énergies fossiles et limite la pollution, aidant ainsi à lutter contre le changement climatique.
- Rentabilité élevée sur le long terme : Investir dans le photovoltaïque réduit les factures d'électricité et permet de générer des revenus par la revente d'énergie.
- Durabilité et fiabilité : Les panneaux solaires sont durables et résistants, ils assurent une production électrique stable pendant près de 40 ans avec peu d'entretien.
- Soutien aux réseaux électriques locaux : L'énergie solaire limite les pertes énergétiques, stabilise les réseaux électriques et renforce la résilience en cas de crise ou de panne.
- Modularité et adaptabilité : Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet une installation facile et adaptable, couvrant des besoins énergétiques du milliwatt au mégawatt.

Malgré ces bénéfices, elle comporte aussi des inconvénients [15] :

- Coût initial élevé : La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Espace requis pour l'installation : Une grande surface est nécessaire pour une production suffisante.
- Faible rendement : Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).
- Besoin de stockage avec un système d'appoint : Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.

## I.11 Conclusion

Le premier chapitre est une présentation des principes fondamentaux de l'effet photovoltaïque, incluant la structure des cellules solaires, leurs caractéristiques électriques et leur fonctionnement basé sur les propriétés des semi-conducteurs, notamment les cellules à base d'InGaN.

Le chapitre suivant portera sur les semi-conducteurs III-V et s'intéressera particulièrement à l'étude de l'InGaN.

## **Chapitre II**

### **Notions générales sur les semi-conducteurs III-V**

#### **II.1 Introduction**

Les semi-conducteurs III-V, composés d'éléments des groupes III et V du tableau périodique, présentent des propriétés physiques et électroniques remarquables qui les rendent particulièrement adaptés aux applications photovoltaïques. Leur capacité à ajuster la bande interdite, leur forte absorption lumineuse et leur mobilité électronique élevée en font des matériaux de choix pour les cellules solaires à haut rendement, notamment dans les structures multi-jonctions ou à base de nitrures comme InGaN/GaN.

Ce chapitre décrit les matériaux semi-conducteurs de type III-V et les principales caractéristiques d'InGaN, et introduit les équations fondamentales des semi-conducteurs.

#### **II.2 Définition des semi-conducteurs III-V**

Les matériaux appelés semi-conducteurs III-V se forment par l'union d'éléments de la troisième colonne (3A) et de la cinquième colonne (5A) du tableau périodique (voir Figure II.1). Ils existent en différentes compositions, comme des binaires, des ternaires ou des quaternaires, et sont largement recherchés pour leur utilisation dans la conversion photovoltaïque. Bien que l'intérêt pour ces semi-conducteurs ait diminué en raison de leurs coûts élevés, il semble renaître grâce aux projets de systèmes utilisant une concentration optique qui augmentent le rendement. Par exemple, l'efficacité peut passer de 30 % à 34,2 % avec un éclairage normal, lorsqu'elle est concentrée par 100 fois [16].

## Chapitre II

---

	1A	2A		3A	4A	5A	6A	7A	8A
1	H								He
2	Li	Be		B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	3B 4B 5B 6B 7B	8B	1B 2B	Al Si P S Cl			Ar
4	K	Ca	Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr						
5	Rb	Sr	Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe						
6	Cs	Ba	La Hf Ta W Re Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Po At Rn						
7	Fr	Ra	ACT Rf Db Sg Bh Hs Mt Ds Rg Cn Uut F1 Uup Lv Uus Uuo						
Lanthanide			La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu						
Actinide			Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr						

Figure II.1 : Tableau périodique [17].

## II.3 Alliages des semi-conducteurs III-V

L'usage pratique des semi-conducteurs de type III-V demeure très important, amplifié par la capacité de créer des alliages en remplaçant partiellement un des éléments par un autre de la même colonne. Il est possible de produire des alliages ternaires, quaternaires, et même quinaires à partir des semi-conducteurs de type III-V. Ainsi, cela permet d'obtenir des matériaux ayant une largeur de bande interdite et des caractéristiques optiques qui peuvent varier sur un large éventail. Grâce à la diversité des composés que l'on peut réaliser, les semi-conducteurs proposent de nombreuses options tant pour la microélectronique rapide que pour l'optoélectronique [18].

Les alliages de semi-conducteurs se divisent en plusieurs catégories selon le nombre de composants.

### II.3.1 Alliage binaire

Les alliages binaires prennent la forme  $A^{III} B^V$ .

Dans le tableau II.1, on présente un résumé de certains composés binaires et leurs paramètres clés [18].

## Chapitre II

---

**Tableau II.1** : Paramètres caractéristiques pour quelques binaires III-V [18].

<i>Composé III-V</i>	<i>Eg(eV)</i>	<i>Structure de la bande interdit</i>
AlAs	2.16	Indirect
AlSb	1.58	Indirect
GaN	3.39	Direct
GaAs	1.42	Direct
InN	0.77	Direct
InP	1.35	Direct

### II.3.2 Alliage ternaire

Nous avons deux types :

- Alliage ternaire anionique :  $A^{III} B_x^V C_{1-x}^V$  .
- Alliage ternaire cationique :  $A_x^{III} B_{1-x}^{III} C^V$

Ces alliages se distinguent par le coefficient stœchiométrique x. Les alliages ternaires les plus significatifs et couramment étudiés sont [18] :

- Les arséniums (Arsenides) : l'AlGaAs joue un rôle essentiel dans divers dispositifs optoélectroniques et transistors, tandis que le GaInAs est fondamental pour les zones actives des appareils électroniques rapides, et l'AlInAs fonctionne comme une couche de protection dans les systèmes à hétéro-structures.
- Les phosphures (phosphides) : le GaInP possède une grande bande interdite parmi les semi-conducteurs de type III-V qui ne contiennent pas de nitre. L'AlInP a un gap direct si x est inférieur à 0.44 pour Eg à 2.4 eV, tandis que l'AlGaP a un gap direct quel que soit le niveau de concentration.
- Les antimoniums (antimonides) : on trouve GaInSb, AlInSb et AlGaSb.
- Les alliages combinant antimoniums et arséniums (arsenides antimonides) : les alliages comme GaAsSb, InAsSb et AlAsSb sont mentionnés.
- Les phosphures arséniums comprennent : GaAsP, InAsP et AlAsP.

## Chapitre II

- Les phosphures antimoniuress comprennent : GaPSb, InPSb et AlPSb.
- Les nitrures incluent : InGaN, AlGaN, AlInN, GaAsN, GaPN, InPN, InAsN, BGaN et BAIn.

### II.4 Semi-conducteurs

#### II.4.1 Bandes d'énergie d'un semi-conducteur

Dans un matériau semi-conducteur, les électrons se trouvent dans des niveaux d'énergie. Ces niveaux s'élargissent pour créer de nouveaux états discrets, qui se regroupent et forment deux bandes autorisées où les électrons peuvent se situer.

➤ **Bandé de valence (BV)** : Il s'agit de la bande inférieure, qui inclut tous les niveaux d'énergie occupés par les électrons participant à des liaisons covalentes (ceux appelés électrons de valence).

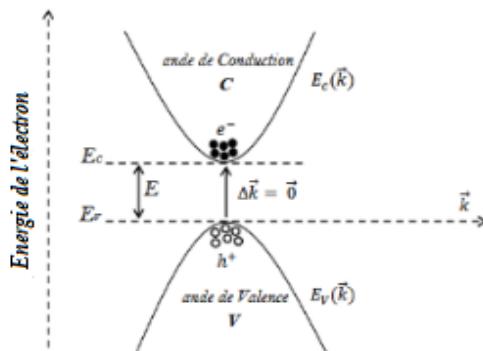
➤ **Bandé de conduction (BC)** : C'est la bande supérieure, qui contient tous les niveaux d'énergie occupés par les électrons excités issus de la bande de valence et capables de participer aux processus de conduction.

Entre ces deux bandes, il existe une zone d'énergie interdite, de largeur  $E_g$  (gap) [19].

#### II.4.2 Gap direct et indirect

##### • Gap direct

Dans les semi-conducteurs à gap direct le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont au même point (même vecteur d'onde  $\vec{k}$ ). La transition électronique entre le haut de la bande de valence (BV) et le bas de la bande de conduction (BC) conserve le vecteur d'onde ( $\Delta\vec{k} = \vec{0}$ ) [20].



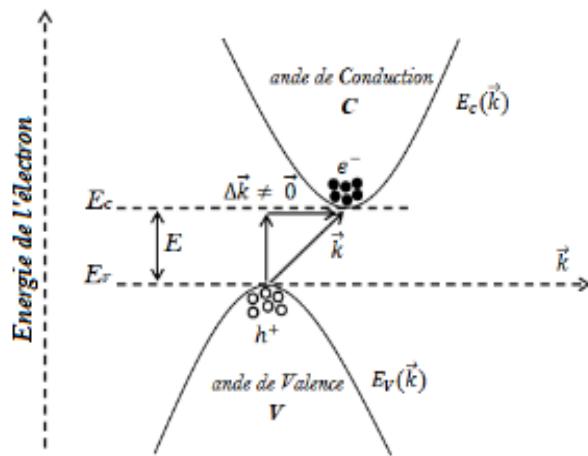
**Figure II.2 :** Semi-conducteurs à gap direct [20].

## Chapitre II

Avec :

- $\vec{k}$  : le vecteur d'onde associe à l'électron.
- **Gap indirect**

Dans les semi-conducteurs à gap indirect le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction ne sont pas au même point. La transition électronique entre le sommet de la bande de valence (BV) et le bas de la bande de conduction (BC) ne conserve pas le vecteur d'onde ( $\Delta\vec{k} \neq \vec{0}$ ) [20].



**Figure II.3 :** Semi-conducteurs à gap indirect [20].

### II.4.3 Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur est dit intrinsèque si la majorité des porteurs sont libres, c'est-à-dire les électrons et les trous, proviennent directement des atomes de ce semi-conducteur. Dans ce scénario, lorsqu'un électron acquiert assez d'énergie thermique pour passer de la bande de valence à la bande de conduction, il crée un trou dans la bande de valence. Par conséquent, chaque trou présent dans la bande de valence est égal à un électron dans la bande de conduction, et le nombre d'électrons dans la conduction correspond exactement à celui des trous dans la valence [21].

### II.4.4 Semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque se définit comme un semi-conducteur qui contient des électrons supplémentaires dans la bande de conduction à cause des défauts d'un donneur ionisé, ou un semi-conducteur qui a des trous supplémentaires dans la bande de valence en raison des défauts d'un accepteur ionisé [22].

## Chapitre II

---

- **Semi-conducteurs de type N**

Pour un tel matériau de type N des impuretés de type donneur (d'électrons) ont été introduits, le nombre d'électrons libres est beaucoup plus grand que le nombre de trous libres. Pour cette raison, ces électrons libres s'appellent des porteurs majoritaires et les trous s'appellent les porteurs minoritaires. Le semi-conducteur ainsi dopé est nommé de type N [23].

- **Semi-conducteur de type p**

Comme avec du matériau de type N, mais d'une façon opposée, ici des impuretés de type accepteur (trous) ont été introduits, le nombre de trous libres est beaucoup plus grand que le nombre d'électrons libres dans une grande plage de température. Pour cette raison, ces trous s'appellent des porteurs majoritaires et les électrons s'appellent les porteurs minoritaires. Le semi-conducteur ainsi dopé est nommé de type P [23].

## II.5 Description de nitrure de gallium-indium(InGaN)

InGaN est un matériau semi-conducteur appartenant à la catégorie des composés III-V. Ces composés sont formés en associant de l'azote avec un ou plusieurs éléments du groupe III présents dans le tableau périodique, tels que le bore, le gallium, l'aluminium et l'indium. Cet alliage, qui comprend du nitrate d'indium (InN) et du nitrate de gallium (GaN), se révèle être le matériau le plus prometteur pour les usages photovoltaïques grâce à ses caractéristiques exceptionnelles. Son gap d'énergie, qui est direct et ajustable en fonction de la quantité d'indium, lui permet de capter une vaste gamme de la lumière solaire. En outre, ses puissantes liaisons entre atomes et sa grande conductivité thermique en font un choix parfait pour des cellules solaires d'une efficacité élevée [24].

Ces caractéristiques expliquent pourquoi l'InGaN fait l'objet de recherches intensives, ouvrant des perspectives innovantes dans le domaine des énergies renouvelables.

## II.6 Propriétés structurales de l'InGaN

Les nitrures de gallium (GaN) et d'indium (InN) adoptent deux structures cristallines : la structure hexagonale dite « wurtzite » et la structure cubique appelée « zinc-blende ». À température et pression ambiantes, la forme thermodynamiquement la plus stable est la structure hexagonale wurtzite (voir Figure II.4). Cette dernière est caractérisée par trois paramètres : la longueur du côté de l'hexagone

## Chapitre II

« a », la hauteur de la maille élémentaire « c », et le paramètre interne « u », qui décrit la séparation entre les sous-réseaux d'anions ( $N^{3-}$ ) et de cations ( $Ga^{+3}$ ) le long de l'axe « c ». Le paramètre u correspond à la longueur de la liaison cation-anion divisée par « c », et il est égal à 0,375 dans un cristal wurtzite idéal [13].

La seconde structure, appelée « zinc-blende » (voir Figure II.5), est formée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées : l'un composé d'un élément du groupe III, l'autre d'un élément du groupe V. Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale du cube, soit  $a \frac{\sqrt{3}}{4}$  où « a » représente la longueur de la cube.

Le tableau II.2 présente les paramètres de maille du GaN et de l'InN pour les deux types de structures cristallines [13].

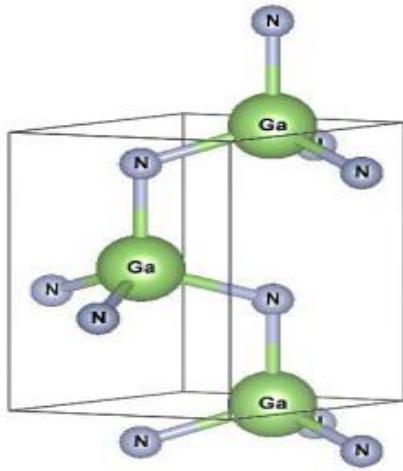


Figure II.4 : Structure wurtzite [13].

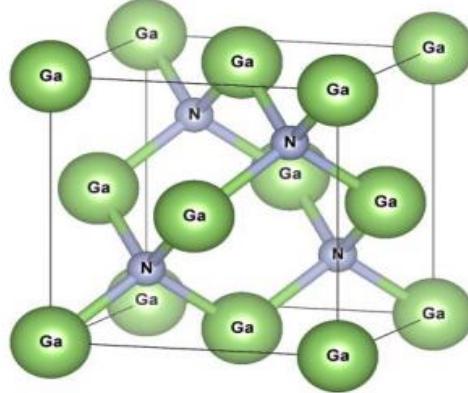


Figure II.5 : Structure cubique zinc-blende [13].

Tableau II.2 : Paramètres structuraux a, c et u pour le GaN et l'InN [13].

	Wurtzite			Cubique
	$a(A^\circ)$	$c(A^\circ)$	$u(A^\circ)$	$a(A^\circ)$
GaN	3.189	5.185	0.377	4.47
InN	3.54	5.70	0.378	4.96

## Chapitre II

---

### II.7 Propriétés électriques

Les propriétés électriques d'un matériau dépendent principalement de son énergie de gap interdite  $E_g$  ainsi que de sa densité de porteurs. Avant d'aborder ces caractéristiques de l'InGaN, il convient de rappeler que l'énergie de gap interdite correspond à la différence d'énergie entre le sommet de la bande de valence et le bas de la bande de conduction [24].

#### II.7.1 Bande interdite de nitrure

La principale raison pour laquelle les nitrures sont tant étudiés réside dans la nature directe de leur gap d'énergie interdite, y compris dans leurs alliages. Cette propriété permet d'obtenir des rendements plus élevés en conversion d'énergie ou en émission lumineuse [25]. Les bandes de valence et de conduction sont composées de niveaux énergétiques continus, le nombre de ces niveaux n'est cependant pas constant à cause des différents niveaux électroniques des atomes. Il s'agit alors de la densité d'états. Ces dernières dépendent des caractéristiques du matériau et de la température [26].

Dans le cas de la structure InGaN, la densité d'états au bord des bandes de conduction et de valence, notée respectivement  $N_c$  et  $N_v$ , est exprimée par [26] :

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

$$N_v = [5,3x + (1 - x) \times 1,8] \times 10^{19} [\text{cm}^{-3}] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- $x$  = la concentration d'indium.

#### II.7.2 Variation de l'énergie de gap dans $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

À partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaN et InN, il est possible de déterminer celui de l'InGaN en appliquant la loi de Végard, ajustée à l'aide d'un paramètre de courbure [26]. Cette loi s'exprime comme suit :

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

Avec :

- $x$  : la concentration d'indium dans InGaN.
- $b$  : le paramètre de courbure.

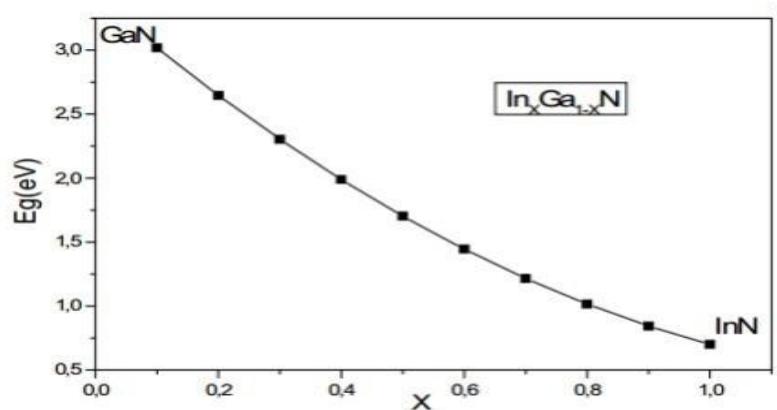
## Chapitre II

- $E_{gGaN}$  : le gap d'énergie du GaN.
- $E_{gInN}$  : le gap d'énergie de l'InN.
- $E_{gIn_xGa_{1-x}N}$  : le gap d'énergie dans l'InGaN.

La courbe en trait plein de la figure II.5 représente l'ajustement des données expérimentales à l'aide de l'expression (II.3), en considérant  $E_g^{GaN}=3.42\text{ eV}$ ,  $E_g^{InN}=0.77\text{ eV}$ , et un paramètre de courbure  $b=1.43\text{ eV}$ . Quant à la courbe pointillée, elle correspond à l'ajustement des points dans la région riche en gallium, en utilisant l'ancienne valeur du gap de l'InN, soit 1.9 eV [25].

- $x$  : le coefficient stœchiométrique évalué en %. Il correspondant à la quantité d'incorporation d'indium dans le nitre de gallium.

Sur le plan technologique, plus la teneur en indium dans le gallium augmente, plus l'énergie de la bande interdite de l'alliage ternaire InGaN diminue.



**Figure II.6:** Evolution de largeur de la bande interdite en fonction de  $x$  [28].

### II.7.3 Variation de l'énergie interdite en fonction de la température

L'évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de la température est généralement décrite par la relation de Varshni [29].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- $E_g(T)$  : le gap du matériau à une température donnée (eV).

## Chapitre II

---

- $E_g(0)$  : le gap d'énergie du matériau à 0 K (eV).
- $\alpha$  : la constante empirique ( $eV \cdot K^{-1}$ ).
- $\beta$  : la constante associée à la température de Debye (K).
- $T$  : la température en (K).

Pour le GaN et l'InN, ces paramètres sont récapitulés dans le tableau II.3.

**Tableau II.3** : Paramètres de Varshni et gap d'énergie à 0 K et 300 K du GaN et de l'InN [29].

	$E_g(0)$ [eV]	$\alpha[\frac{meV}{K}]$	$\beta[K]$	$E_g(300)$ [eV]
GaN	3.507	0.909	830	3.44
InN	0.69	0.41	454	0.64

### II.7.3 Mobilité des porteurs de charge dans les nitrures

L'équation décrivant la mobilité des porteurs de charge peut être exprimée en fonction de la densité de dopage et de la température. Pour un semi-conducteur donné, la mobilité  $\mu$  des porteurs (électrons ou trous) est généralement modélisée par l'expression suivante [30] :

$$\mu = \mu_{min}\left(\frac{T}{300}\right)^{\beta} + \frac{\mu_{max}\left(\frac{T}{300}\right)^{\alpha} - \mu_{min}\left(\frac{T}{300}\right)^{\beta}}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}}\right)^{\gamma}} \quad (\text{II.5})$$

D'où :

- $T$  : la température.
- $N_{tot}$  : la densité de dopage total.
- $N_{ref}$  : la densité de dopage de référence
- $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  : les paramètres propres à chaque semi-conducteur.

### II.7.4 Affinité électronique

L'évolution de l'affinité électronique  $\chi$  en fonction du coefficient stœchiométrique s'exprime à travers la relation suivante [24] :

## Chapitre II

$$\chi_{InGaN} = x \cdot \chi_{InN} + \chi_{GaN} (1 - x) \quad (\text{II.6})$$

Avec les affinités électroniques suivantes :

- $\chi_{InN}^{InN} = 5.8 \text{ eV.}$
- $\chi_{GaN}^{GaN} = 4.1 \text{ eV}$

La variation de l'affinité électrique en fonction du coefficient stœchiométrique  $x$  de  $In_x Ga_{1-x} N$  est donné sur la figure II.7 :

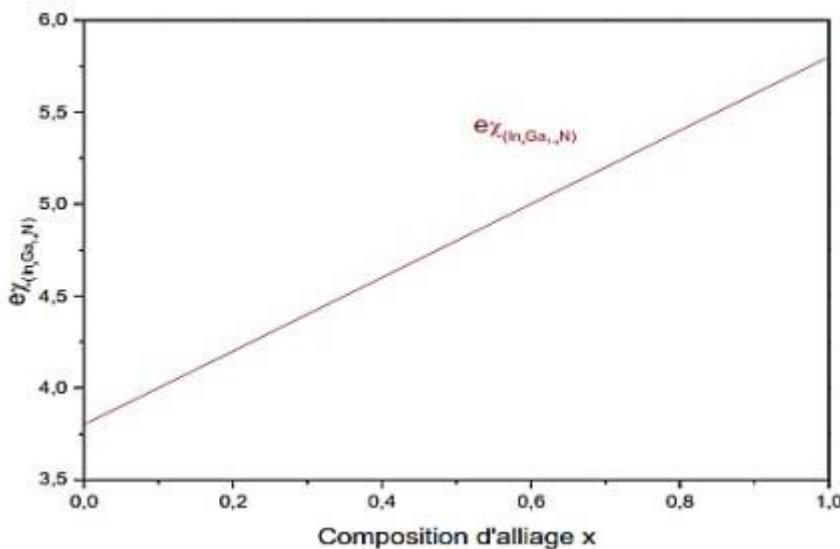


Figure II.7 : Variation de l'affinité électronique dans  $In_x Ga_{1-x} N$  en fonction x[31].

### II.7.5 Longueur de diffusion

La longueur de diffusion  $L$  correspond à la distance moyenne que peuvent parcourir les porteurs de charge par diffusion. Elle est définie par la relation suivante [32] :

$$L = \sqrt{D \times \tau} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- $\tau$  : la durée de vie des porteurs
- $D$  : le coefficient de diffusion des porteurs ( $cm^{-2} s^{-1}$ ), défini par :

$$D = \frac{KT}{q} \mu \quad (\text{II.8})$$

## Chapitre II

---

La longueur de diffusion est un paramètre essentiel 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 [26].

Le tableau II.4 présente quelques propriétés du nitrate de gallium (GaN) et du nitrate d'indium (InN) à 300 K, ainsi que celles de l'alliage InGaN avec une concentration de 65 % en InN.

**Tableau II.4 :** Propriétés électriques du GaN, InN et de l'InGaN à 300 K [33,34,35,36].

	<i>GaN</i>	<i>InN</i>	<i>InGaN</i>
<i>Gap d'énergie interdite (eV)</i>	3.39	0.7	1.32
<i>Affinité électronique</i>	4.1	5.8	5.56
<i>Mobilité des électrons (cm<sup>2</sup>.V<sup>-1</sup>.S<sup>-1</sup>)</i>	1400	3200	500
<i>Mobilité des trous (cm<sup>2</sup>.V<sup>-1</sup>.S<sup>-1</sup>)</i>	<20	17-36	5-50
<i>Paramètres de varshi: α (eV)</i>	0.909	0.41	0.7
<i>β (K)</i>	830	454	600
<i>Densité d'états effective de la bande de conduction N<sub>c</sub> (cm<sup>-3</sup>)</i>	$2.3 \times 10^{18}$ ( $4.3 \times 10^{14} \cdot T^{3/2}$ )	$9 \times 10^{17}$ ( $1.76 \times 10^{14} \cdot T^{3/2}$ )	1.93
<i>Densité d'états effective de la bande de valence N<sub>v</sub> (cm<sup>-3</sup>)</i>	$4.6 \times 10^{19}$ ( $8.9 \times 10^{15} \cdot T^{3/2}$ )	$5.3 \times 10^{19}$ ( $10^{16} \cdot T^{3/2}$ )	4.075

## II.8 Propriétés optiques

Les caractéristiques optiques d'un matériau incluent surtout son indice de réfraction ainsi que son coefficient d'absorption. Ces caractéristiques sont essentielles pour les dispositifs optoélectroniques, car elles influencent le chemin de la lumière à travers le dispositif. Par exemple, dans un appareil fait de

## Chapitre II

---

plusieurs matériaux, la lumière a tendance à se propager dans ceux ayant un indice de réfraction plus élevé. Cela permet de retenir la lumière dans une couche spécifique, comme c'est le cas dans les lasers. Cette caractéristique est également très utile pour les cellules solaires car elle permet d'améliorer l'efficacité de l'absorption de la lumière [31].

### II.8.1 Indice de réfraction

La lumière se déplace en suivant le chemin du matériau ayant l'indice de réfraction le plus élevé. Cette caractéristique est essentielle pour contrôler la façon dont la lumière passe à travers un élément composé de divers matériaux. L'indice de réfraction joue également un rôle important dans les dispositifs photovoltaïques, car il aide à améliorer l'efficacité d'absorption d'un panneau solaire, entraînant ainsi un meilleur rendement [31]. Ce rendement se calcule par le rapport :

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

- $c$  : la vitesse de la lumière dans le vide.
- $v$  : la vitesse de la lumière dans le matériau.

L'indice de réfraction des nitrides GaN et InN est estimé approximativement à 2.3 et 2.9 respectivement dans l'infrarouge.

La rapidité de la lumière à travers un matériau varie souvent en fonction de la longueur d'onde. Un exemple avec du GaN, fourni par Barker et Legems pour des longueurs d'onde comprises entre 0,35 et 10  $\mu\text{m}$ , est présenté dans la figure II.8 :

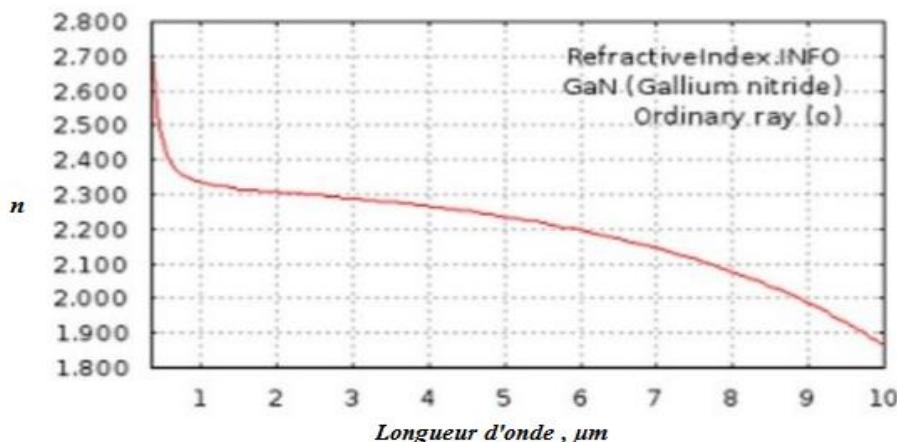


Figure II.8 : Indice de réfraction du GaN [31].

## Chapitre II

---

Il est évident que l'indice de réfraction diminue lorsque la longueur d'onde augmente. Les scientifiques ont également prouvé qu'il existe un lien entre l'indice de réfraction et l'énergie d'un photon que le matériau absorbe [31], exprimé par :

$$E_g = \frac{hv}{\lambda} \quad (\text{II.10})$$

En se basant sur cette relation, les scientifiques ont déterminé que l'indice de réfraction possède également un paramètre de courbure, tout comme le gap d'énergie interdite. L'indice de réfraction joue aussi un rôle essentiel dans le calcul des coefficients d'absorption d'après la loi de Snell-Descartes [31] :

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad (\text{II.11})$$

Où :

- $n_1$  et  $n_2$  : les indices de réfraction des milieux x.
- $\theta_1$  et  $\theta_2$  : les angles des rayons lumineux.

### II.8.2 Permittivité relative

La permittivité relative d'un matériau, aussi appelée constante diélectrique, décrit la réponse d'un matériau à un champ électrique appliqué [33] et est définie par :

$$\epsilon_r = \chi \cdot \epsilon_0 \quad (\text{II.12})$$

Avec :

- $\chi$  : la susceptibilité du matériau.
- $\epsilon_0$  : la permittivité du vide.

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

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{II.13})$$

## Chapitre II

---

### II.8.3 Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption joue un rôle crucial, surtout pour les panneaux solaires, car il détermine le nombre de photons qui sont absorbés, ce qui influence directement le nombre de porteurs générés. En d'autres mots, il s'agit de la quantité de lumière que l'on parvient à absorber [31].

L'absorption dans une couche semi-conductrice est exprimée par le terme suivant :

$$I_i(\lambda) = I_{i_0}(\lambda) \cdot e^{\alpha(\lambda) \cdot d} \quad (\text{II.14})$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{4 \cdot \pi \cdot k(\lambda)}{\lambda} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

- $I_i$  : l'intensité incidente.
- $I_t$  : l'intensité transmise.
- $\lambda$  : la longueur d'onde.
- $\alpha(\lambda)$  : le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde ( $cm^{-1}$ ).
- $k$  : le coefficient d'atténuation.

## II.9 Génération et Recombinaison des paires électrons trous

### II.9.1 Génération

La génération des électrons et les trous sont produits par des processus capables de fournir au moins l'énergie minimale de génération d'une paire électron-trou. Cela inclut l'ionisation par impact, où un électron (ou un trou) possédant suffisamment d'énergie cinétique arrache un électron lié (dans la bande de valence) à son état lié et le pousser vers un état dans la bande de conduction, créant ainsi un électron et un trou. Le même processus d'excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction peut également se produire lorsqu'une vibration du réseau cristallin (phonon) fournit l'énergie nécessaire, ou par absorption d'un photon. En présence d'impuretés introduisant des états d'énergie dans la bande interdite, l'excitation peut se faire en plusieurs étapes, et l'énergie de génération peut être fournie par portions plus petites, via des phonons ou même des photons [37].

## Chapitre II

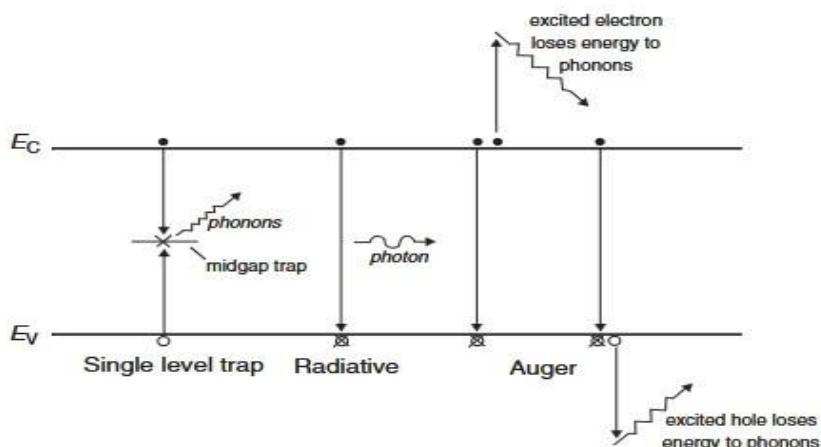
---

### II.9.2 Recombinaison

La recombinaison des paires électrons trous a un sens contraire par rapport à la génération, lorsque une cellule photovoltaïque absorbe du rayonnement solaire, le semi-conducteur est déséquilibré thermiquement, les concentrations d'électrons et de trous tendent à se détendre et à revenir à leurs valeurs d'équilibre par un processus appelé recombinaison : un électron passe de la bande de conduction à la bande de valence, éliminant ainsi un trou de bande de valence [38].

Les phénomènes de recombinaison peuvent être classés en processus directs et indirects, parmi ces recombinaisons direct et indirect : la recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH), la recombinaison radiative (de bande à bande) et la recombinaison Auger [38].

Ces trois processus sont illustrés à la figure II.10 :



**Figure II.9 :** Processus de recombinaison dans les semi-conducteurs [38].

### II.9.3 Mécanismes de recombinaison

#### II.9.3.1 Recombinaison SRH

Les niveaux énergétiques intermédiaires sont des centres de recombinaison très efficaces et favorisent fortement la recombinaison des porteurs. Ces niveaux énergétiques intermédiaires sont appelés niveaux pièges, et ce mécanisme de recombinaison est donc appelé recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH). Ce mécanisme suit un processus en deux étapes :

- Un électron dans l'état excité saute de la bande de conduction aux niveaux d'énergie intermédiaires.

## Chapitre II

---

- Un trou saute dans le niveau d'énergie intermédiaire vers la bande de valence.

L'efficacité de ce processus de recombinaison nécessite une probabilité égale des deux sauts. Cela nécessite à son tour que les niveaux d'énergie intermédiaires soient au milieu de la bande interdite [39].

### II.9.3.2 Recombinaison Auger

La recombinaison Auger est un processus non radiatif fait référence à un mécanisme à trois particules où l'énergie d'un électron de la bande de conduction (BC) ou, alternativement, l'énergie d'un trou de la bande de valence (BV) est transférée à un autre électron (ou trou). L'excès d'énergie est rapidement dissipé sous forme de chaleur dans le réseau cristallin [40].

si un électron absorbe l'énergie, deux électrons et un trou sont impliqués dans le processus ; si un trou absorbe l'énergie de recombinaison, deux trous et un électron participent [37].

### II.9.3.3 Recombinaison radiative

La recombinaison radiative ou recombinaison bande à bande est le processus inverse de l'absorption de photons. Un électron de la bande de conduction revient à la bande de valence où il occupe un trou en libérant de l'énergie via l'émission d'un photon. En raison de la thermalisation rapide des porteurs après l'absorption de photons, les photons émis auront toujours une énergie proche de  $E_g$  (le gap énergétique du matériau) [41].

## II.10 Équations fondamentales des semi-conducteurs

Trois équations aux dérivées partielles non linéaires permettent de décrire le comportement électrique des semi-conducteurs sont présentées ci-dessous :

### II.10.1 Équation de Poisson

Cette équation décrit la relation fondamentale entre la charge et l'intensité du champ électrique [42].

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{q}{\epsilon} (p(x) - n(x) - N_a + N_p) \quad (\text{II. 16})$$

Où :

- $E$  : le champ électrique.
- $\rho$  : la densité de charge.

## Chapitre II

---

- $\epsilon$  : la permittivité du matériau.
- $p$  : la densité des trous.
- $n$  : la densité d'électrons.
- $N_A$  : la densité d'atomes accepteurs.
- $N_D$  : la densité d'atomes donneurs.

### II.10.2 Équation de Transport

Les équations de transport décrivent comment les porteurs se déplacent, c'est-à-dire le flux de porteurs ou le courant. Il est plus simple d'utiliser la densité de courant  $J$ , en A/cm<sup>2</sup> plutôt que le courant absolu  $I$ , en ampères, puisque nous ne nous intéressons pas à la surface du dispositif [42].

$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{II.17})$$

$$J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E + qD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

- $J_n$  : la densité de courant des électrons.
- $\mu_n$  : la mobilité des électrons.
- $D_n$  : la diffusivité d'électron.
- $J_p$  : la densité de courant des trous.
- $\mu_p$  : la mobilité des trous.
- $D_p$  : la diffusivité d'un trou.
- $q$  : la charge électronique
- $E$  : le champ électrique.

### II.10.3 Équation de continuité

L'équation de continuité permet de suivre tous les porteurs en termes de déplacement, de génération et de recombinaison. On les appelle parfois des « équations de comptabilité » car elles veillent à ce que chaque porteur soit pris en compte [42].

## Chapitre II

---

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \frac{d j_n}{dx} - (U - G) \quad (\text{II.19})$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \frac{d j_p}{dx} - (U - G) \quad (\text{II.20})$$

D'où :

- **$U$**  : le taux de recombinaison.
- **$G$**  : le taux de génération.

Les cellules solaires fonctionnent en régime permanent, et nous ne nous intéressons pas aux régimes transitoires ni aux temps de commutation. En équilibre thermique et en régime stationnaire, les concentrations de porteurs ne varient pas avec le temps, de sorte que :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = 0 \quad (\text{II.21})$$

En réorganisant les équations ci-dessus, on obtient :

$$\frac{1}{q} \frac{d j_n}{dx} = U - G \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{1}{q} \frac{d j_p}{dx} = - (U - G) \quad (\text{II.23})$$

## II.11 Conclusion

Le deuxième chapitre est une présentation des matériaux III-V et de leurs alliages, en se focalisant sur les principales caractéristiques du matériau InGaN, ainsi que ses propriétés électriques et optiques.

Le dernier chapitre a pour objectif d'étudier et de simuler la cellule solaire tandem, conçue à partir de matériaux III-Nitrures.

## Chapitre III

### Simulation et interprétation des résultats

#### III.1 Introduction

La modélisation et l'optimisation des cellules solaires jouent un rôle fondamental dans l'amélioration de leur rendement, en permettant d'anticiper et de comprendre les comportements et les performances des cellules solaires avant leur fabrication réelle.

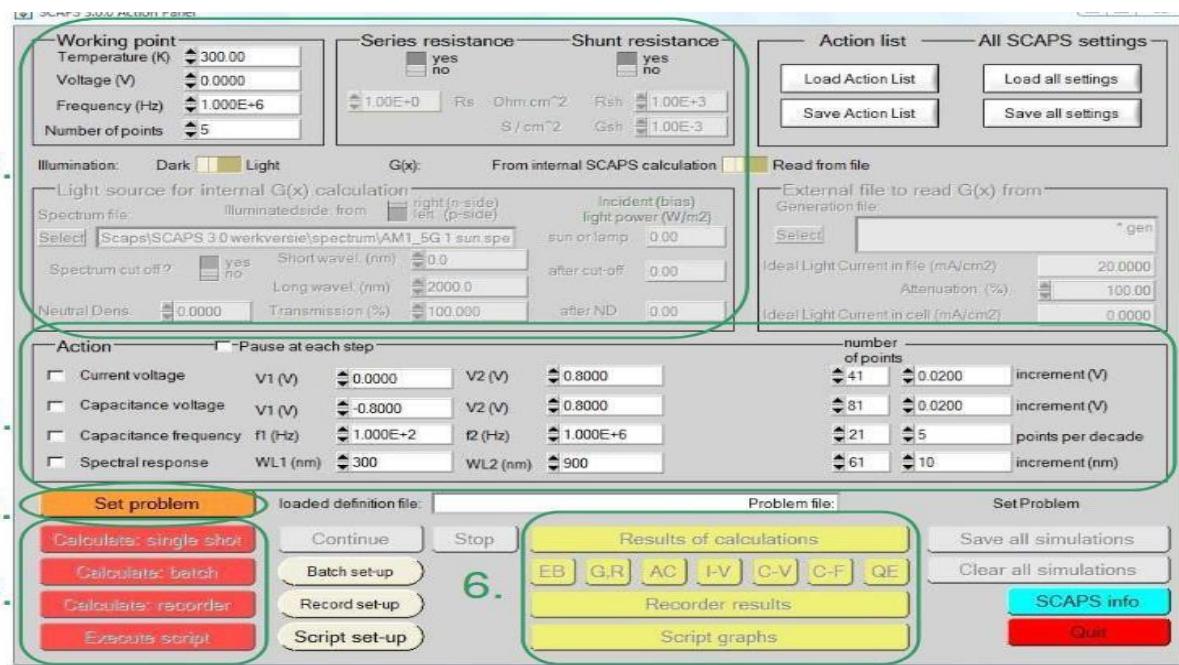
Ce présent chapitre est une description de la méthode de simulation de la cellule solaire tandem conçue à base de matériaux III-N en utilisant le logiciel SCAPS-1D et d'interprétation des résultats. Au début, une présentation du logiciel est fournie, ainsi que son fonctionnement pour comprendre les fondamentaux de la modélisation des dispositifs photovoltaïques dans cet outil. Ensuite, une description est détaillée sur la cellule tandem étudiée. Cette dernière est composée de deux sous-cellules ; une cellule supérieure de  $GaN/In_{0.66}Ga_{0.34}N$  et une cellule inférieure de  $In_{0.8}Ga_{0.2}N/InN$  reliées par une jonction tunnel. Après avoir établi la structure, la simulation avec SCAPS est réalisée. Une analyse paramétrique a suivi pour améliorer les performances de la cellule. Cette phase a impliqué de faire des variations sur l'épaisseur et le dopage de chaque couche, afin de trouver les meilleures combinaisons pour un rendement optimal. Les résultats de cette étude ont permis d'identifier les configurations les plus efficaces pour chaque sous-cellule. Enfin, les caractéristiques électriques de la cellule tandem sont extraites de la courbe courant-tension (I-V).

#### III.2 Présentation du logiciel SCAPS-1D

SCAPS est un logiciel conçu pour simuler des cellules solaires en une seule dimension. Ce programme a été créé par le département d'électronique et de systèmes d'information de l'Université de Gand, située en Belgique [43].

##### III.2.1 Fonctionnement du logiciel

Le logiciel SCAPS se compose de divers panneaux, chacun étant consacré à la configuration des paramètres et à l'évaluation des résultats. L'interface principale, nommée "Action Panel" (voir Figure III.1), tous les paramètres de simulation externes peuvent être manipulés à travers ce panneau [43].



**Figure III.1 :** Panneau de démarrage de SCAPS : panneau d'action ou panneau principal [43].

SCAPS s'initialise avec le panneau d'action illustré dans la figure III.1. Ce panneau est formé de plusieurs sections, comme indiqué dans le texte :

1. Lancer SCAPS.
2. Déterminer la problématique, y compris la géométrie, les matériaux et toutes les paramètres de votre panneau solaire.
3. Décrire les conditions dans lesquelles vous voulez réaliser la simulation, c'est-à-dire précisez le point de fonctionnement.
4. Indiquez ce que vous allez calculer, c'est-à-dire quelle mesure vous allez simuler.
5. Lancer la simulation.
6. Afficher les courbes simulées.

### III.2.2 Définition de la cellule solaire

En cliquant sur le bouton « Set Problem » du panneau d'action, le panneau « Solar cell definition » s'affiche.

Ce panneau permet de créer/modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer dans des fichiers de définition ou de les charger à partir de ces fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers

ASCII standard avec l'extension « \*.def » qui peuvent être lus avec, par exemple, le bloc-notes.

Même si le format de ces fichiers semble s'expliquer de lui-même, il est fortement conseillé de ne pas les modifier manuellement.

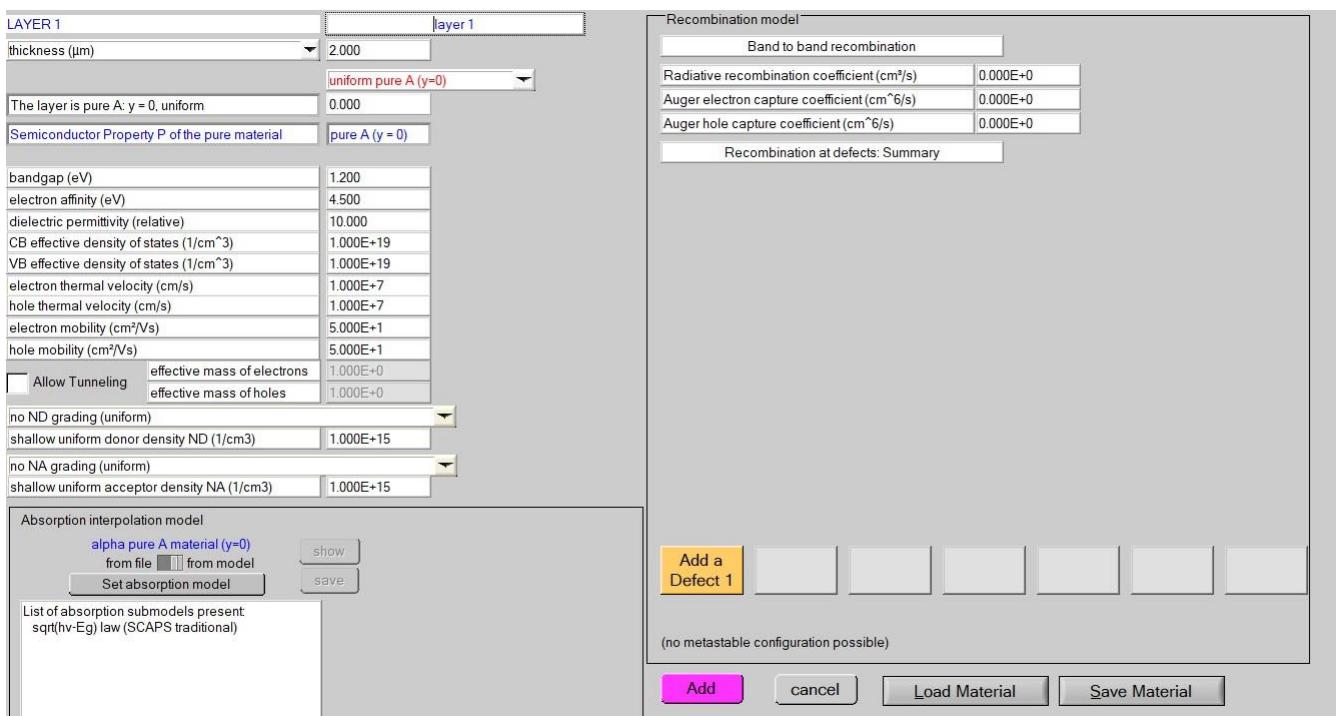
Les propriétés des couches, des contacts et des interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur la case appropriée, comme le montre la figure III.2. De la même manière, les couches peuvent être ajoutées en cliquant sur « add layer » [43].



**Figure III.2 :** Définition de la structure d'une cellule solaire [43].

### II.2.3 Adjonction des couches

La fenêtre sur la figure III.3 permet de définir les propriétés physiques de chaque couche dans la cellule solaire simulée. Elle s'affiche après avoir cliqué sur « add layer » dans la fenêtre principale (Figure III.2) [1].



**Figure III.3 :** Définition des paramètres des couches de la cellule [43].

Les paramètres essentiels à introduire sont :

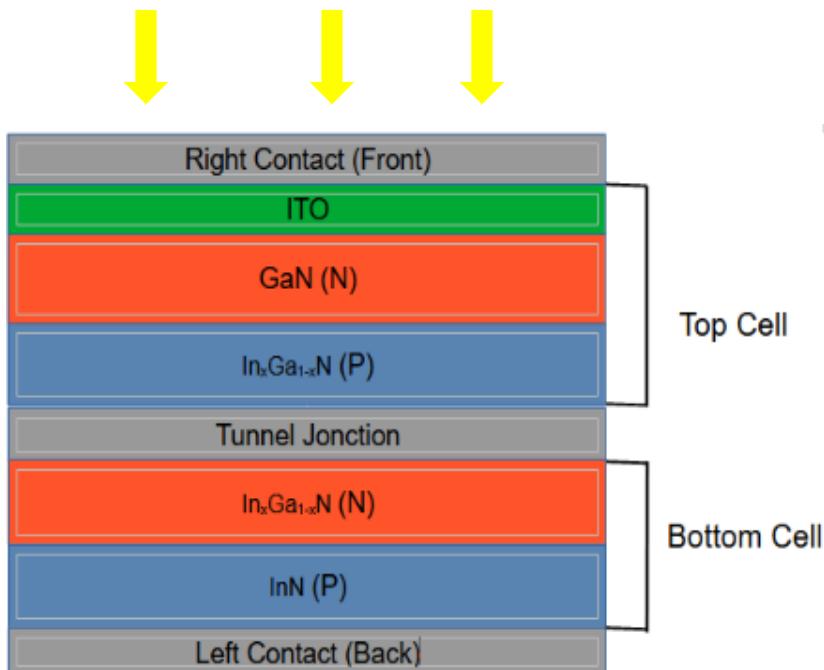
- Nom de la couche : Par défaut « layer 1 », à personnaliser selon le matériau.
- Épaisseur ( $\mu\text{m}$ ) : Exprimée en micromètres.
- Type de matériau : Choix d'un matériau pur ou allié (paramètre  $\gamma$ ).
- Propriétés du matériau semi-conducteur pur :
  - Bandgap (eV) : Énergie de gap.
  - Affinité électronique (eV).
  - Permittivité relative.
  - Densité des états effectifs (CB et VB) : En  $\text{cm}^{-3}$ .
  - Vitesse thermique des porteurs : Pour électrons et trous (cm/s).
  - Mobilité des électrons et des trous ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ).
  - Effet tunnel : Peut être activé. S'il est pris en considération, dans ce cas il est nécessaire de définir les masses effectives des porteurs de charges.
- Dopage :
  - ND (dopage donneur) et NA (dopage accepteur) : Uniformes ou gradés, exprimés en  $\text{cm}^{-3}$ .

- Modèle d'interpolation d'absorption :
  - Choix entre loi  $\sqrt{hv - Eg}$  ou chargement de modèles personnalisés via fichier.
- Modèle de recombinaison :
  - Recombinaison bande-à-bande : Coefficients de recombinaison radiative et Auger à définir (ici tous mis à zéro).
  - Possibilité d'ajouter des défauts via « Add a Defect ».

### III.3 Description de la structure

Une cellule solaire double jonction (tandem) à base des matériaux du groupe III-V est modélisée dans cette section. La structure comprend une couche fenêtre en ITO (Indium Tin Oxyde), qui bloque partiellement le rayonnement ultraviolet, protégeant ainsi les couches actives de la dégradation. La cellule est composée de deux sous-cellules reliées en série: la sous-cellule supérieure, constituée de  $GaN/In_xGa_{1-x}N$ , et la sous-cellule inférieure, faite de  $In_xGa_{1-x}N/InN$  (voir Figure III.4). La simulation est réalisée à l'aide du logiciel SCAPS-1D. Cependant, comme ce logiciel ne permet pas de simuler directement une cellule tandem complète sur une seule interface, un script de configuration est utilisé pour combiner les deux sous-cellules tel qu'indiqué à la figure III.5.

La figure III.4 illustre la structure de la cellule tandem organisée verticalement de l'avant vers l'arrière, l'éclairage est appliqué par le côté avant.



**Figure III.4 :** Structure de cellule double jonction.

Chaque couche est définie précisément dans SCAPS en indiquant les paramètres physiques essentiels tels que : l'épaisseur (en  $\mu\text{m}$ ), la bande interdite (en eV), l'affinité électronique, la permittivité diélectrique relative, les densités effectives d'états dans les bandes de conduction et de valence ( $N_c$  et  $N_v$ ), les mobilités des électrons et des trous, ainsi que les concentrations de dopage ( $N_D$  et  $N_A$ ). Des modèles de recombinaison (radiative, Auger) peuvent également être intégrés, ainsi les défauts.

```

clear all
clear actions

action light

action iv.startv 0
action iv.stopv 3

action iv.increment 0.02
action iv.checkaction
action iv.stopaftervoc

//Simulation the Top Cell
load definitionfile Top Cell.def
calculate singleshot
get iv zu

//Simulation the Bottom Cell
load definitionfile Bottom Cell.def
calculate singleshot
get iv vw

//Calculate the Series Connection IV Curve
math series xyzuvw nz

//Visualize the Results
plot draw zu
plot draw vw
plot draw xy

//Extract the Solar Cell Characteristics
math characteristics.all cxy
math characteristics.voc xxy
math characteristics.jsc yxy
math characteristics.ff zxy
math characteristics.eta uxy
math characteristics.vmpp vxy
math characteristics.jmpp wxy

//Show Script Variables
show scriptvariables

```

**Figure III.5 :** Script de simulation SCAPS-1D pour la cellule tandem.

### III.4 Simulation de la structure

Les cellules à base des matériaux III-N ont montré un rendement élevé pour les cellules multi-jonctions. Des recherches précédentes ont réalisé séparément des cellules de structure hétérojonction  $GaN/In_{0.66}Ga_{0.34}N$  et  $In_{0.8}Ga_{0.2}N/InN$  pour leurs performances en tant que cellules solaires à simple jonction [44-47]. Ces deux configurations ont montré des rendements prometteurs. Le choix des paramètres sont tirés des travaux réalisé en les combinant dans une cellule solaire double jonction et les reliant en série au moyen d'une jonction tunnel. Le choix des fractions molaires  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  et  $In_{0.8}Ga_{0.2}N$  est motivé par les résultats optimaux obtenus dans les simulations antérieures, où ces compositions ont permis de maximiser l'absorption du spectre solaire tout en conservant de bonnes propriétés électroniques (bande interdite adaptée, forte absorption, mobilité correcte, etc.)[43-47]. En associant ces deux sous-cellules, on cherche à augmenter le rendement global de la cellule tandem.

Dans cette simulation, les défauts de volume et de surface ont été laissés aux valeurs par défaut proposées par SCAPS.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont récapitulés sur le Tableau III.1.

**Tableau III.1 :** Paramètres utilisés pour la simulation de la cellule Top, Bottom et Tandem [43-47].

Matériau	$E_g$ (eV)	$\epsilon_r$	$\chi$ (eV)	$N_c$ $10^{18}(cm^{-3})$	$N_v$ $10^{19}(cm^{-3})$	$N_A$ ( $cm^{-3}$ )	$N_D$ ( $cm^{-3}$ )	$\mu_n$ ( $cm^2/V_s$ )	$\mu_p$ ( $cm^2/V_s$ )	Epaisseur ( $\mu m$ )
<b>ITO</b>	3.5	9	4.5	2.2	1.8	0	$10^{19}$	40	5	0.1
<b>GaN</b>	3.39	9	4.9	2.3	4.6	10	$10^{19}$	1400	20	0.1
<b><math>In_{0.66}Ga_{0.34}N</math></b>	1.3	13.1	5.4	1.4	4.075	$10^{19}$	10	1000	170	2
<b><math>In_{0.8}Ga_{0.2}N</math></b>	1.07	13.1	5.46	1.18	4.6	10	$10^{19}$	1000	170	0.01
<b>InN</b>	0.77	15.3	5.8	0.9	5.3	$10^{19}$	10	3200	36	2

### III.5 Résultats de simulation

En utilisant les paramètres du tableau III.1, nous avons simulé séparément les sous-cellules supérieure (top) et inférieure (bottom), ainsi que la cellule tandem. Les résultats obtenus sont portés sur le tableau III.2.

**Tableau III.2** : Résultats de simulation de la cellule Top, Bottom et Tandem.

<i>Cellule</i>	$\eta( \%)$	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$FF( \%)$
<i>Top Cell</i>	23.26	0.9313	34.146686	73.15
<i>Bottom Cell</i>	17.45	0.4088	55.311053	77.17
<i>Tandem Cell</i>	35.464	1.338	34.627	76.544

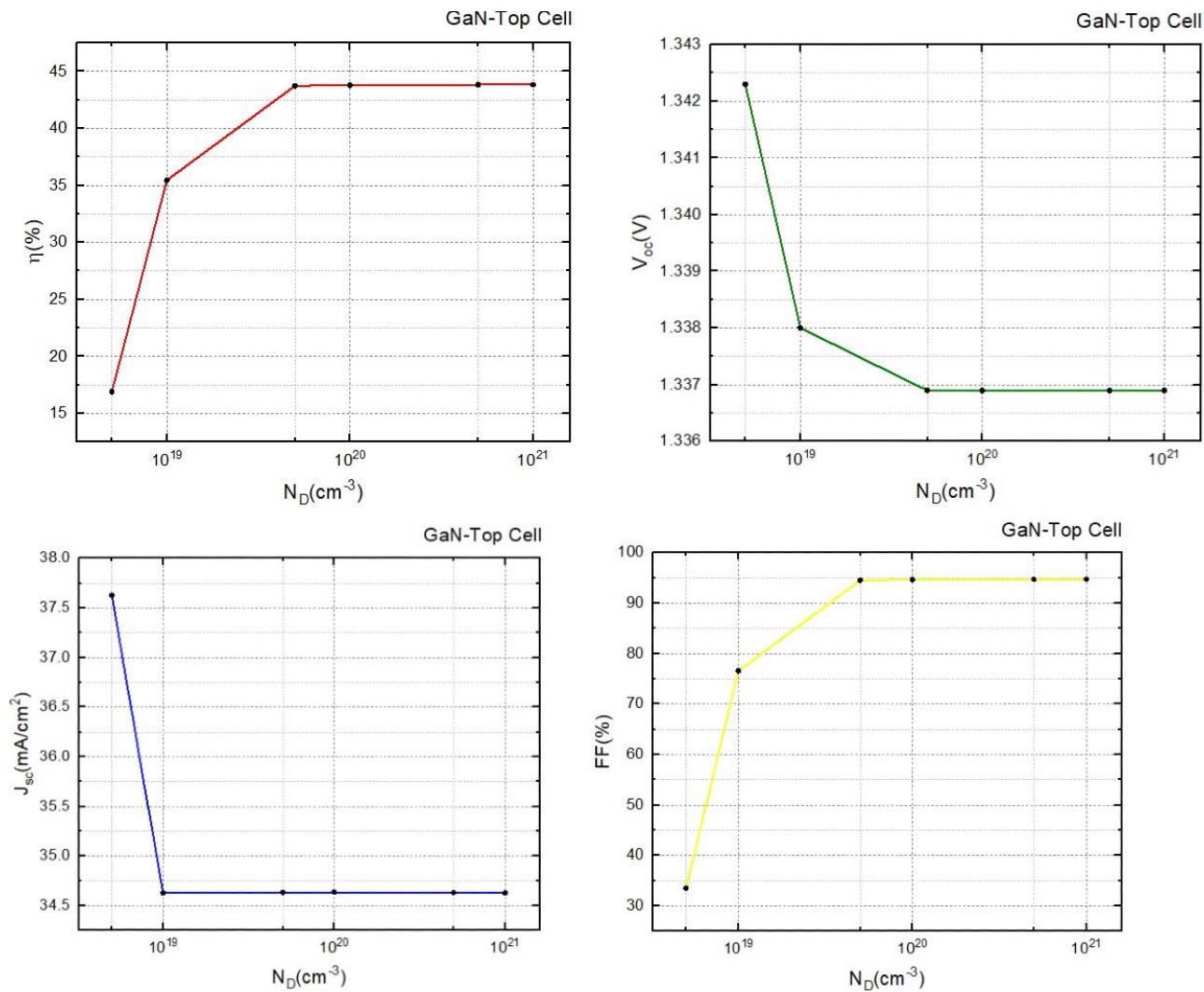
D'après les résultats obtenus, la cellule tandem est clairement la plus performante avec un rendement de 35.464 %, ce qui dépasse largement celui des deux sous-cellules prises individuellement. Cela s'explique par la combinaison efficace des deux sous-cellules, permettant une meilleure utilisation du spectre solaire.

### III.5.1.1 Variation des différents paramètres de la cellule tandem

Dans le but de trouver le meilleur rendement de la cellule tandem, une étude paramétrique a été menée en faisant varier l'épaisseur et la concentration du dopant de chaque couche de la cellule.

#### III.5.1.1.1 Effet de dopage de la couche GaN

L'effet de dopage de la couche GaN sur les différents paramètres électriques ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) de la cellule est présenté sur la figure III.6. Le dopage est varié dans une plage comprise entre  $5 \times 10^{18}$  et  $1 \times 10^{21}$ .



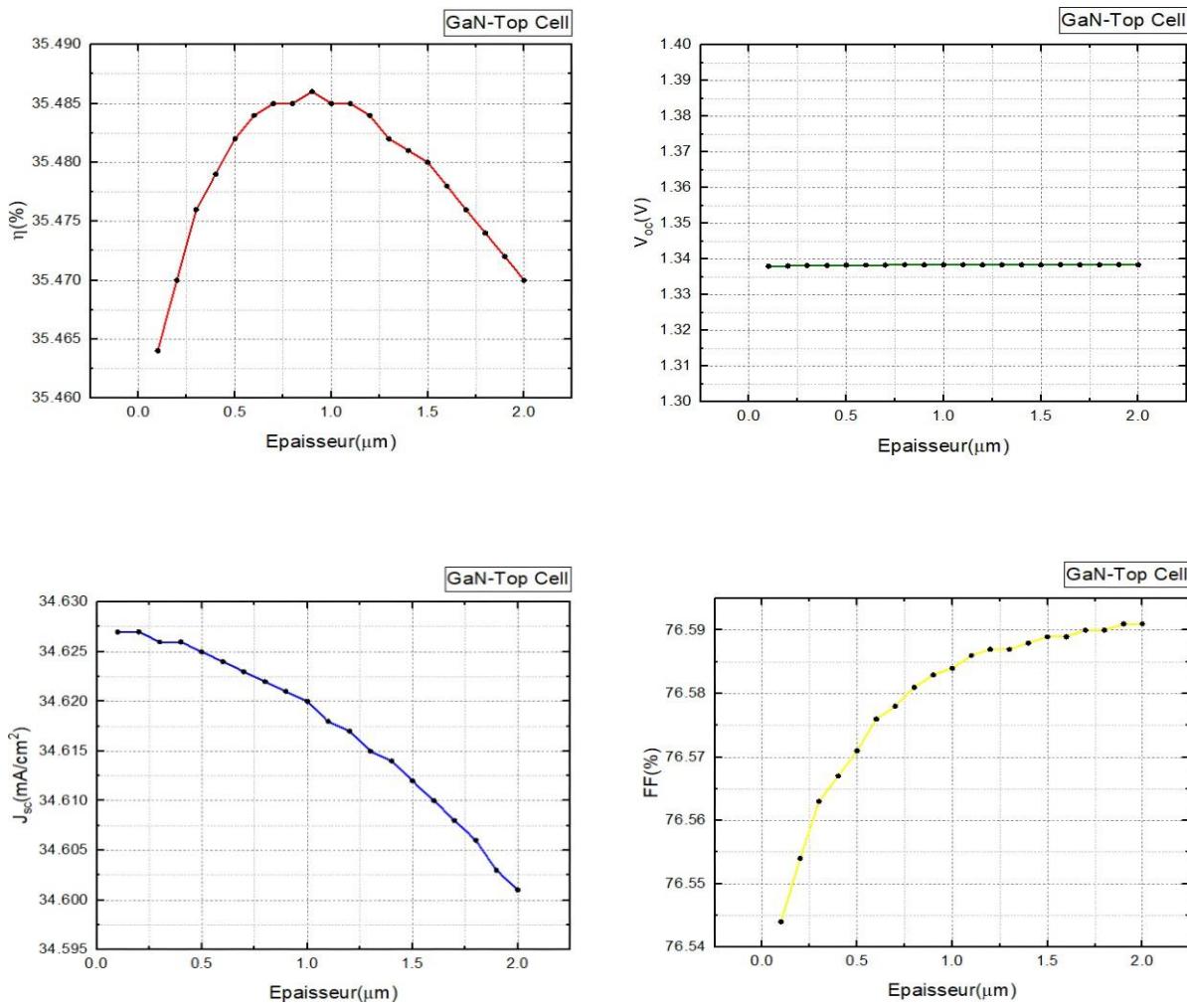
**Figure III.6 :** Effet de la variation du dopage GaN de sur les paramètres ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) de la cellule.

Les résultats obtenus montrent que le rendement de la cellule augmente avec concentration de dopage, passant de 16.905 % à 43.744 %. Au-delà de cette valeur, le rendement devient presque constant avec une valeur aux alentours de 43.8 %. La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) diminue légèrement avec l'augmentation du dopage, passant de 1.3423 V à 1.3369 V entre  $5 \times 10^{18}$  et  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , puis reste stable à 1.3369 V jusqu'à  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . La dépendance de l'efficacité ( $\eta$ ) en fonction du dopage est similaire à celle rapportée par boudaoud et al.[45]. En revanche, la valeur de la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) obtenu dans notre travail est sensiblement inférieur à celle obtenu par ces mêmes auteurs. Ceci est probablement due à la différence structurale (empilement des couches, et la fraction molaire de In dans les différentes couches) entre les deux cellules. Le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) chute rapidement de 37.627 à 34.627 mA/cm<sup>2</sup> entre  $5 \times 10^{18}$  et  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , avant de se stabiliser autour de 34.587 à 34.633 mA/cm<sup>2</sup> à partir de  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Quant au facteur de forme (FF), il augmente nettement de 33.47 % à 94.474 % entre

$5 \times 10^{18}$  à  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , puis se stabilise autour de 94.474 % à 94.742 % jusqu'à  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Ces résultats indiquent que le dopage optimal se situe au-delà  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , où la cellule atteint de hautes performances sans compromettre significativement le Voc ni le Jsc.

### III.5.1.1.2 Effet de l'épaisseur de la couche GaN

L'influence de l'épaisseur de la couche de GaN sur les performances de la cellule est analysée pour des valeurs comprises entre 0.1  $\mu\text{m}$  et 2.0  $\mu\text{m}$ . Les résultats de la variation des principaux paramètres de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche GaN sont illustrés dans la figure II.7.



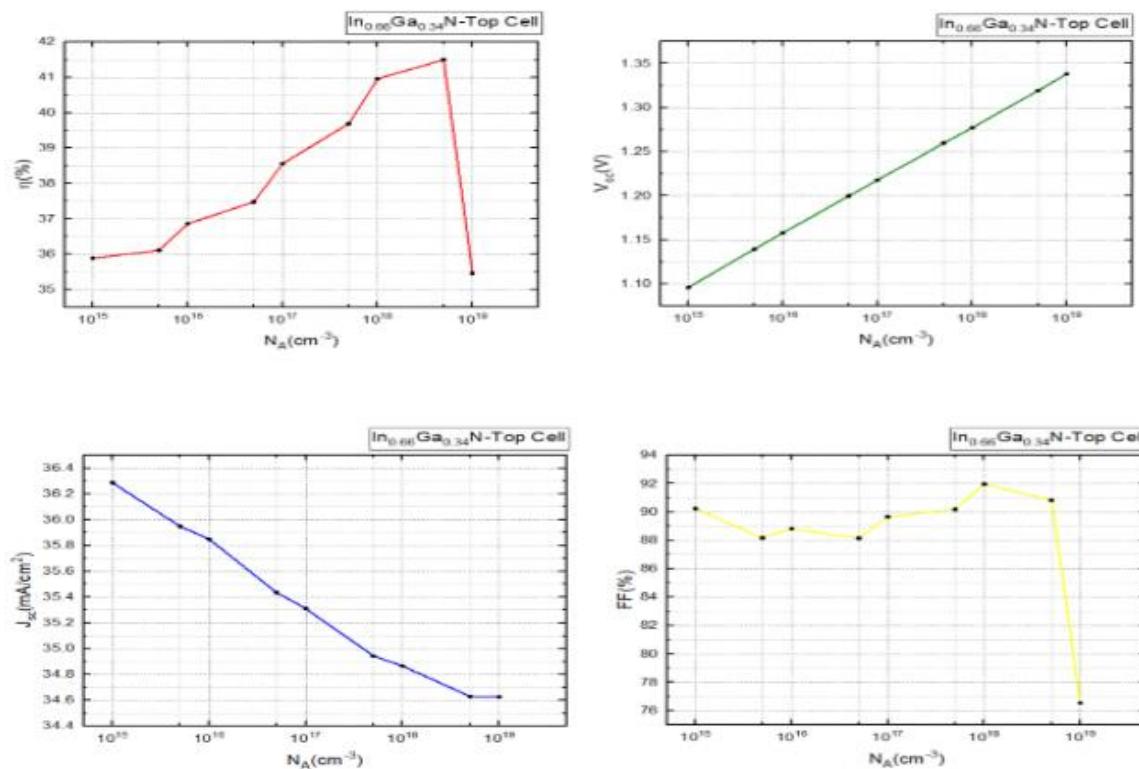
**Figure III.7 :** Effet de la variation de l'épaisseur de GaN sur les paramètres ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) de la cellule.

Le rendement ( $\eta$ ) présente une légère amélioration avec l'augmentation de l'épaisseur, atteignant un maximum de 35.486 % autour de 0.9  $\mu\text{m}$ , ensuite il diminue (il redescend légèrement à 35.470 % pour une

épaisseur de 2  $\mu\text{m}$ ), ce qui montre l'existence d'une épaisseur optimale. L'augmentation du rendement en fonction de l'épaisseur s'explique par l'augmentation de l'absorption de la lumière dans la couche concernée. Toutefois, au-delà d'une certaine épaisseur, de la résistance électrique de la couche domine et une diminution du rendement est observée. En plus, la grande épaisseur oblige les porteurs de charge à parcourir plus de distance avant d'être collectés ce qui augmente la recombinaison des porteurs de charge dans le volume de la couche. La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) reste pratiquement constante à environ 1.338 V, indiquant qu'elle est peu influencée par l'épaisseur de la couche. Le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) diminue légèrement de 34.627 à 34.601 mA/cm<sup>2</sup> avec l'augmentation de l'épaisseur. Le facteur de forme (FF) quant à lui augmente légèrement de 76.544 % à 76.591 %, ce qui reflète une meilleure qualité de la courbe I-V pour les épaisseurs plus importantes. Ainsi, une épaisseur autour de 0.9  $\mu\text{m}$  semble offrir le meilleur compromis entre rendement, courant et facteur de forme.

### III.5.1.1.3 Effet de dopage de la couche In<sub>0.66</sub>Ga<sub>0.34</sub>N

L'effet de la concentration du dopage de la couche In<sub>0.66</sub>Ga<sub>0.34</sub>N sur les performances électriques de la cellule est présenté sur la figure III.8. La concentration du dopage est variée sur une plage allant de 10<sup>15</sup> à 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>.



**Figure III.8 :** Effet de la variation du dopage de la couche In<sub>0.66</sub>Ga<sub>0.34</sub>N sur les paramètres ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF,  $\eta$ ) de la cellule.

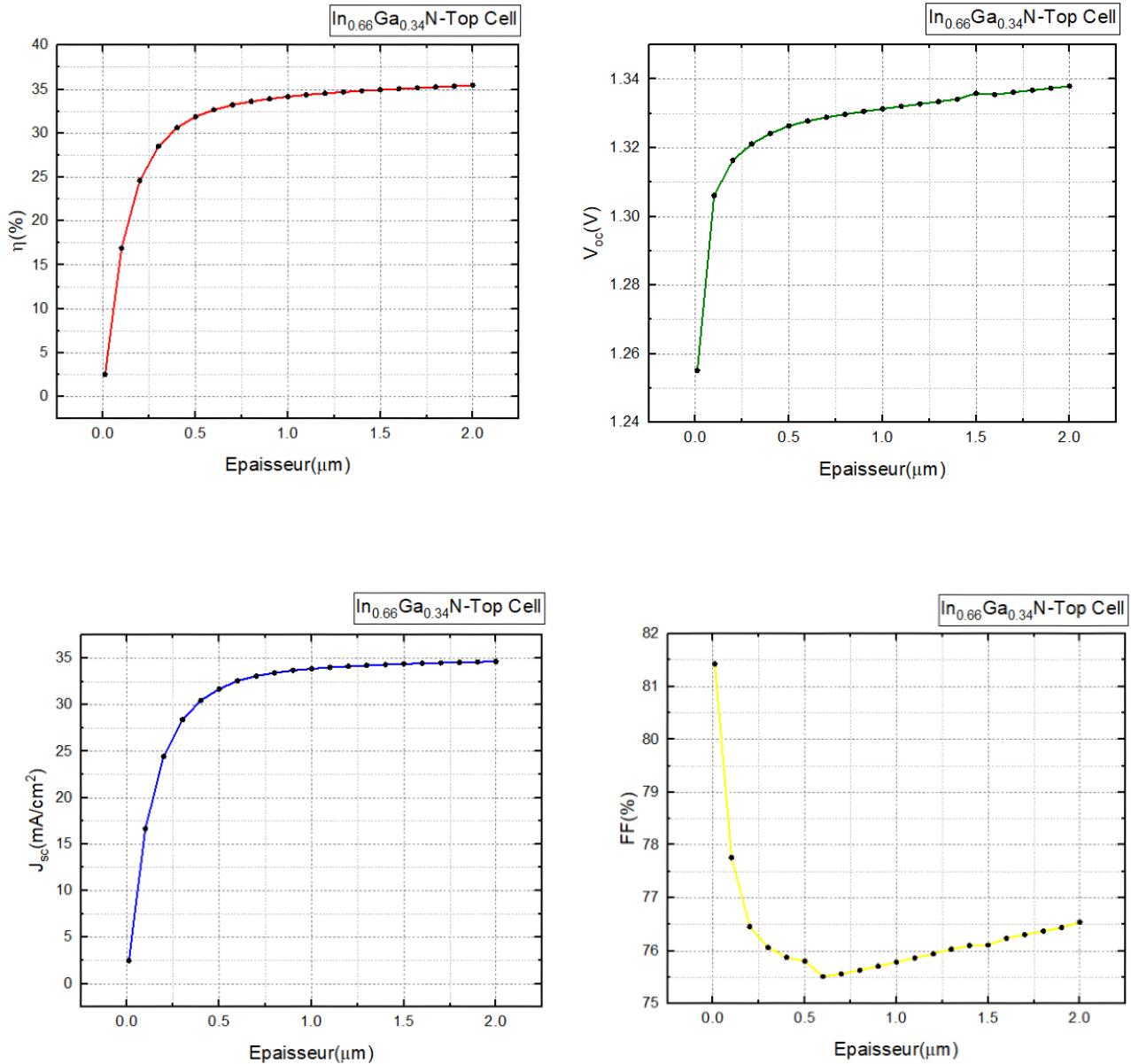
La figure III.8 montre que le rendement ( $\eta$ ) augmente avec la concentration du dopage de la couche  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  jusqu'à une certaine valeur de dopage ( $N_a=5\times10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) ensuite, une diminution brutale du rendement est constatée. En effet, le rendement passe de 35.888 % à 41.502 % lorsque  $N_a$  augmente de  $1\times10^{15}$  à  $5\times10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , atteignant ainsi un maximum. Cependant, une augmentation supplémentaire du dopage jusqu'à  $1\times10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , entraîne une diminution brutale du rendement à environ 35.464 %. La tension en circuit ouvert (Voc) montre une croissance régulière de 1.0961 V à 1.338 V. En revanche, le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) diminue continuellement de 36.287 à 34.627 mA/cm<sup>2</sup>. Le facteur de forme (FF) reste relativement stable autour de 88–91 %, avec une légère augmentation jusqu'à 92 % à  $5\times10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , puis une baisse notable à 76.544 % au-delà de cette valeur. La diminution continue de  $J_{sc}$  est probablement due à la faible épaisseur de cette couche, ce qui accentue l'effet de recombinaison des porteurs de charge à l'interface (interface GaN/  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  et  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  /jonction tunnel) domine le mécanisme de transport dans cette couche.

Ainsi, une concentration optimale de dopage se situe à  $5\times10^{18} \text{ cm}^{-3}$  pour maximiser les performances de cette cellule.

### III.5.1.1.4 Effet de l'épaisseur de la couche $In_{0.66}Ga_{0.34}N$

La figure III.9 illustre l'effet de l'épaisseur de la couche  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  sur les performances de cellule tandem. L'épaisseurs de cette couche est varié entre 0.01 µm et 2 µm.

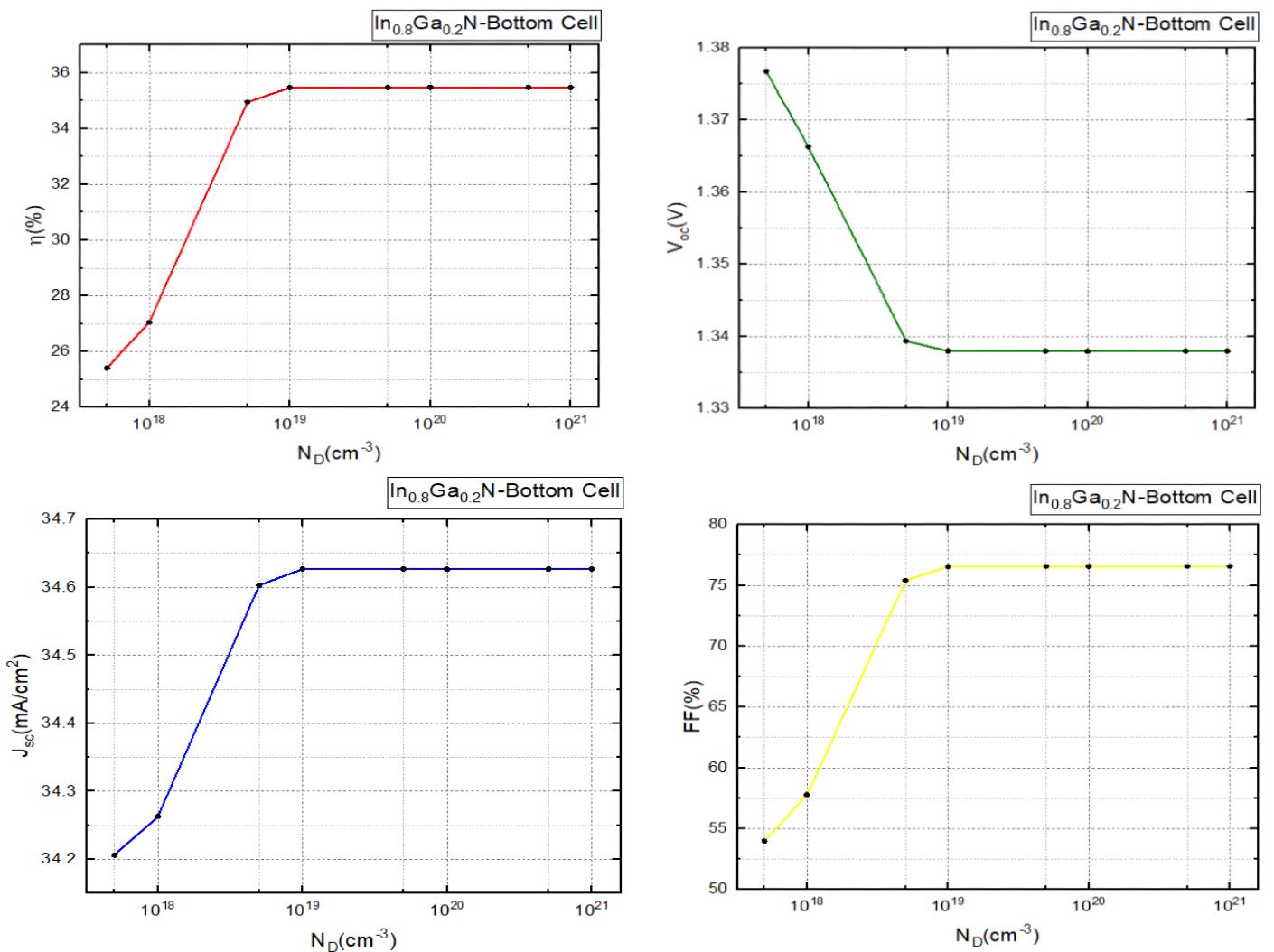
L'évolution des performances de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  montre une amélioration notable de l'efficacité ( $\eta$ ), passant de 2.508 % à environ 35 % lorsque l'épaisseur augmente jusqu'à environ 1.5 µm, au-delà elle se stabilise. Cette hausse est principalement liée à l'augmentation du courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), qui suit la même forme que le rendement, passant de 2.4541 à environ 34.5 mA/cm<sup>2</sup> lorsque l'épaisseur augmente jusqu'à environ 1.5 µm, au-delà il se stabilise. La tension en circuit ouvert (Voc) suit une croissance plus modérée, passant de 1.2551 V à environ 1.338 V et se stabilise progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur. En revanche, le facteur de forme (FF) connaît une chute initiale de 81.427 % à 75.514 % entre 0.01 et 0.6 µm, avant de se stabiliser progressivement entre 75.514 – 76.544 % avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à 2.0 µm. Globalement, une épaisseur de 1.5 à 2.0 µm permet d'atteindre les meilleures performances sans gains significatifs supplémentaires au-delà.



**Figure III.9 :** Effet de la variation de l'épaisseur de la couche  $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{N}$  sur les paramètres électriques ( $J_{\text{sc}}, V_{\text{oc}}, \text{FF}, \eta$ ) de la cellule.

### III.5.1.1.5 Effet de dopage de la couche $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$

L'influence de la concentration du dopage sur les performances électriques de la cellule tandem est donné sur la figure III.10. Dans cette analyse, la concentration de dopage a été variée sur une place entre  $5.10^{17}$  et  $1.10^{-18} \text{ cm}^{-3}$  pour voir comment cela influence le fonctionnement de la cellule.

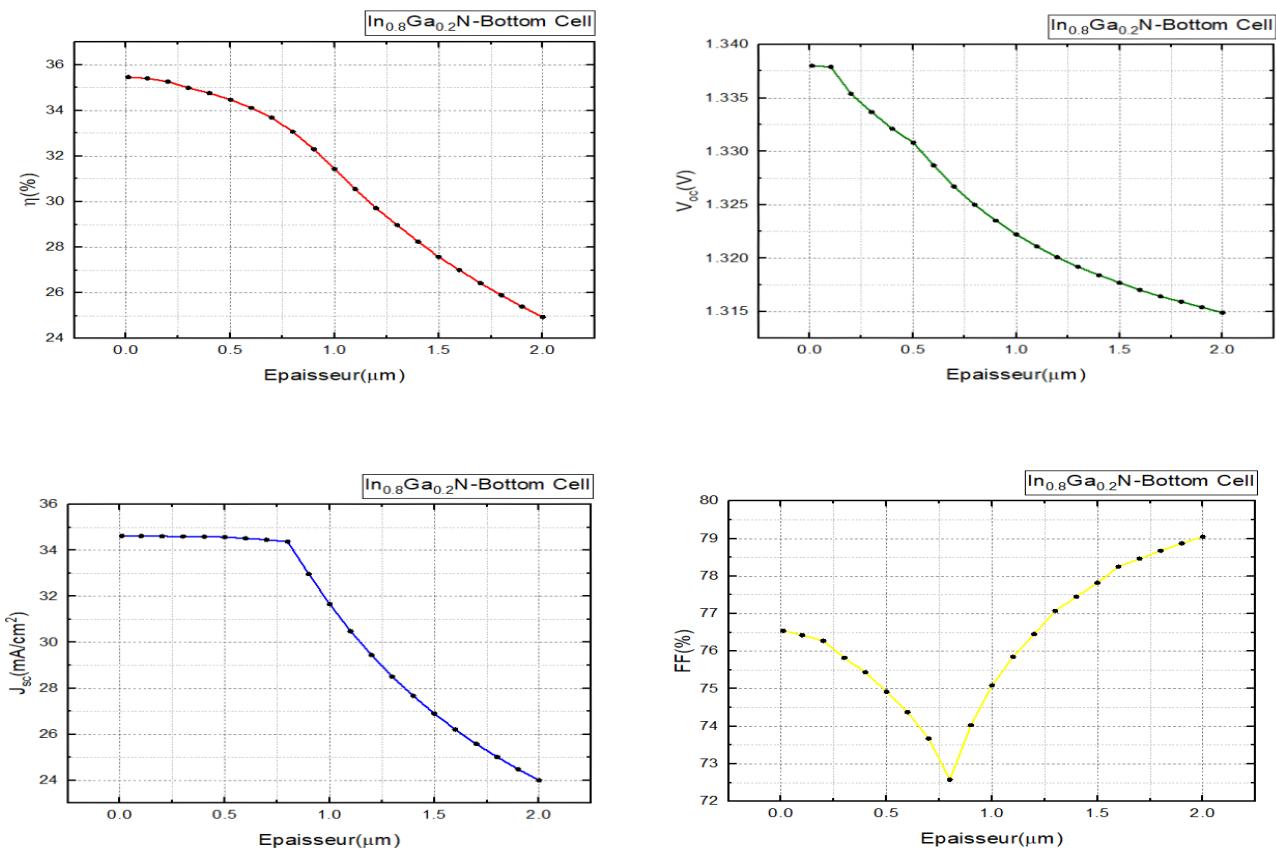


**Figure III.10 :** Effet de la variation du dopage de couche  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$  sur les paramètres électriques ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) de la cellule.

Les résultats obtenus révèlent que l'efficacité de collecte ( $\eta$ ) augmente fortement avec l'augmentation du dopage, passant de 25.417 % à 35.47 % lorsque la concentration de dopage croît de  $5.10^{17}$  à  $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , au-delà de laquelle elle se stabilise. Cette amélioration est liée à l'augmentation simultanée du courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), qui passe de 34.206 à 34.627  $\text{mA/cm}^2$  et stabilise à 34.627, et du facteur de forme (FF), qui connaît une nette progression de 53.969 % à 76.561 % et stabilise aussi dans la même gamme de dopage. En revanche, la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) diminue légèrement de 1.3768 V à 1.338 V et stabilise à la même valeur. Ces résultats suggèrent qu'un dopage au-delà  $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$  offre un bon compromis entre les différents paramètres photovoltaïques, avec une efficacité maximale et des performances stables au-delà de cette valeur.

### III.5.1.1.6 Effet de l'épaisseur de la couche In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N

L'influence de l'épaisseur de la couche In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N sur les performances de la cellule est illustrée sur la figure III.11. L'épaisseur a été variée sur une plage comprise entre 0.01 µm et 2 µm, afin d'étudier son impact sur les performances électriques de la cellule.



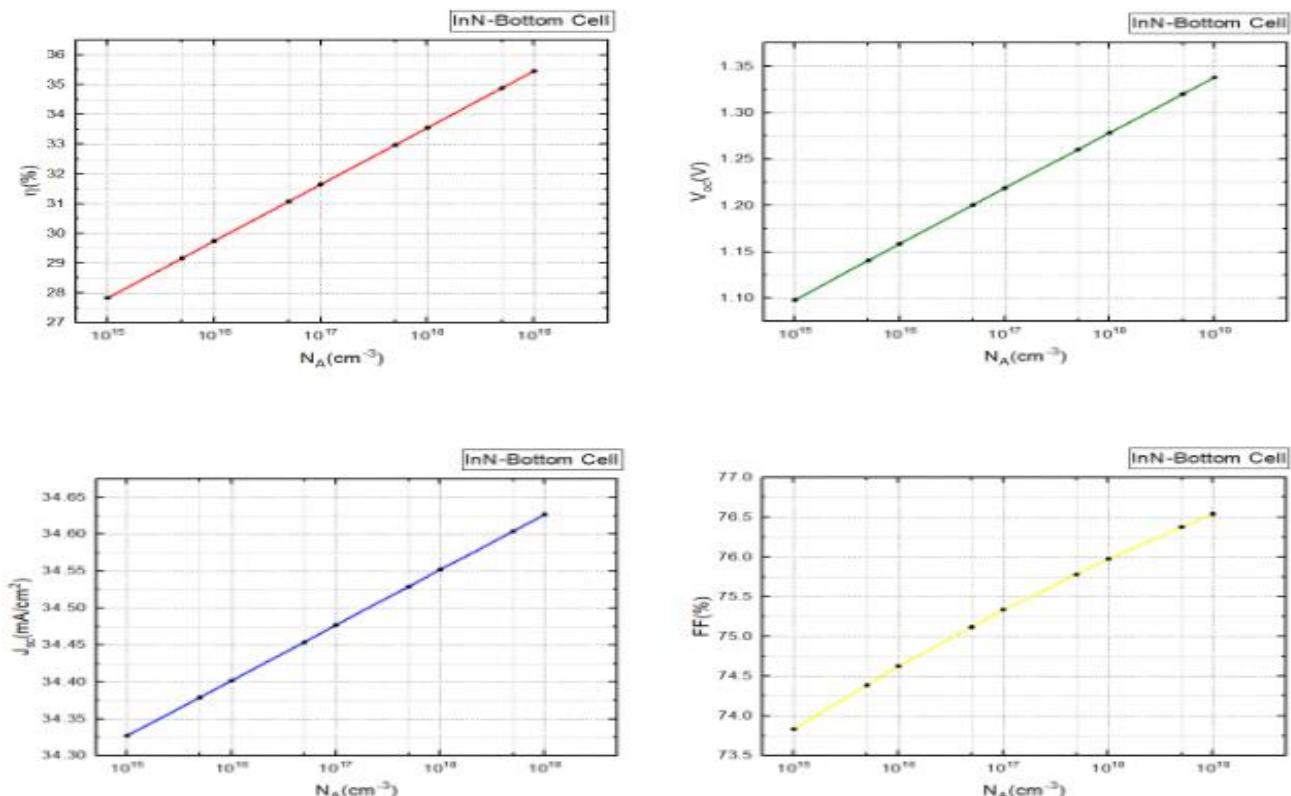
**Figure III.11 :** Effet de la variation de l'épaisseur de In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N sur les paramètres (J<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,FF,η) de la cellule.

Les résultats montrent que rendement de la cellule diminue en fonction de l'épaisseur de la couche In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N. Il diminue progressivement de 35.464 % à 24.941 % lorsque l'épaisseur augmente de 0.01 à 2 µm, suivant une forme décroissante continue. Cette baisse est principalement liée à la diminution du courant de court-circuit (J<sub>sc</sub>), qui reste stable autour de 34.5 % à 0.8 µm, puis chute rapidement à 23.995 mA/cm<sup>2</sup> à 2 µm. De même, la tension en circuit ouvert (V<sub>oc</sub>) diminue légèrement de 1.338 V à 1.3149 V, traduisant une dégradation des propriétés électriques de la jonction avec l'augmentation de l'épaisseur. Quant au facteur de forme (FF), il présente une décroissance de 76.544 % jusqu'à 72.58 % pour une épaisseur de 0.01 à 0.8 µm, puis il augmente pour atteindre 79.048 % à 2 µm. Globalement, ces

Résultats suggèrent qu'une faible épaisseur ( $0.01\text{ }\mu\text{m}$ ) est préférable pour cette couche afin d'optimiser son rendement.

### III.5.1.1.7 Effet de dopage de la couche InN

Le dopage a été varié entre  $10^{15}$  et  $10^{19}\text{ cm}^{-3}$  afin d'étudier l'influence la concentration de dopage de cette couche sur les paramètres électriques de la cellule et identifier la concentration de dopage optimal permettent d'atteindre un meilleur rendement de la cellule. Les résultats de simulation sont porté sur la figure III.12.



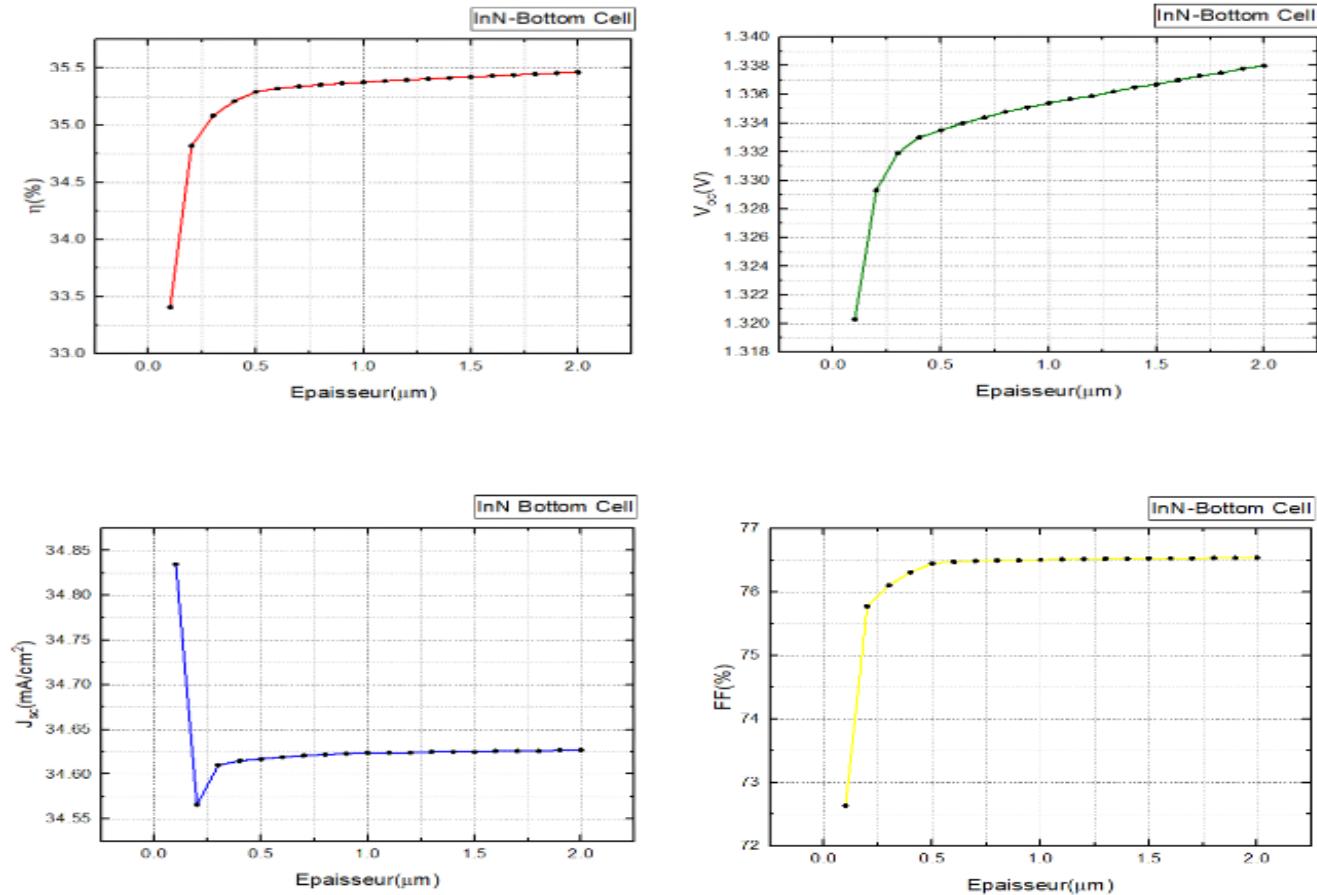
**Figure III.12 :** Effet de la variation du dopage de la couche InN sur les paramètres électriques ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) de la cellule.

Les différents paramètres électriques de la cellule augmentent avec l'augmentation du dopage. L'efficacité ( $\eta$ ) suit une croissance linéaire, passant de 27.832 % à 35.464 %, traduisant une amélioration globale du comportement photovoltaïque de la cellule. Cette évolution est principalement due à la hausse de la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), qui augmente nettement de 1.0982 V à 1.338 V. Le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), bien que moins sensible, montre également une progression modérée de 34.327 à 34.627  $\text{mA/cm}^2$ . Enfin, le facteur de forme (FF) évolue de 73.833 % à 76.544 %. Les résultats suggèrent que le dopage a contribué à la réduction de la résistance électrique de la couche, ce qui se traduit par une amélioration de la performance globale des performances de la cellule, malgré l'augmentation des pertes

électriques à cause de l'augmentation des recombinaisons des porteurs de charges via les recombinaisons Auger. Ces résultats suggèrent qu'un dopage plus élevé ( $10^{19}\text{cm}^{-3}$ ) améliore les propriétés électriques de la couche InN.

### III.5.1.1.8 Effet de l'épaisseur de la couche InN

La figure III.13 présent la variation des différents paramètres de la cellule en fonction l'épaisseur de la couche InN. L'épaisseur de la couche variée entre 0.01  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$ .



**Figure III.13 :** Effet de la variation de l'épaisseur de InN sur les paramètres ( $J_{sc}, V_{oc}, FF, \eta$ ) de la cellule.

Les résultats indiquent que le rendement de la cellule augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche InN, passant de 33.406 à 35.423 % lorsque celle-ci augmente jusqu'à environ 1.5  $\mu\text{m}$ . Au-delà cette valeur seuil, il se stabilise aux alentours de 35.45 %. Cette amélioration est principalement due à l'amélioration de l'absorption des phonons (plus la couche est épaisse plus elle absorbe plus de lumière) dans cette couche. Par ailleurs, l'augmentation de l'épaisseur a contribué à la hausse de la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), qui croît progressivement de 1.3209 V à 1.338 V. Le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) présente une légère instabilité au tout début (entre 0.1 et 0.2  $\mu\text{m}$ ), mais devient stable au-delà, autour de  $34.62 \text{ mA/cm}^2$ .

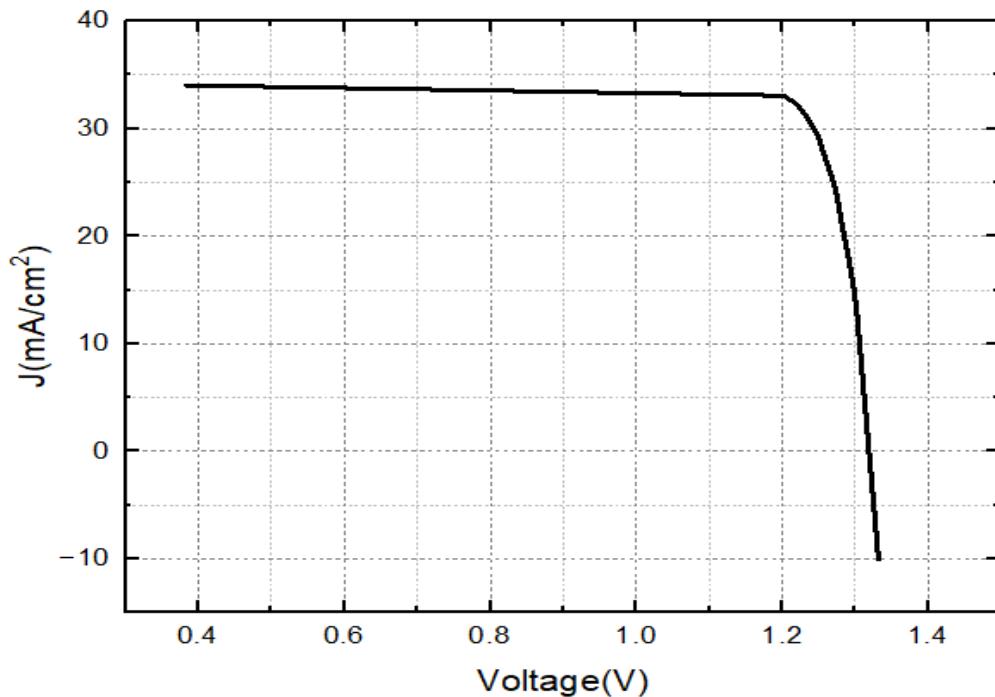
Quant au facteur de forme (FF), il progresse rapidement entre 0 et 0.5 µm, atteignant 76.452 %, puis reste presque constant à 76.5 %. Ces résultats indiquent qu'un gain de performance est obtenu avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à (~1.5 µm), au-delà duquel les paramètres électriques n'évoluent plus significativement.

### III.5.2 Cellule Tandem optimisée

Après avoir effectué les simulations et analysé les résultats obtenus, nous avons retenu les épaisseurs et niveaux de dopage optimaux pour chaque couche (voir tableau III.3), dans le but de concevoir une cellule double jonction offrant un meilleur rendement. La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule optimisée est montrée sur la figure III.14.

**Tableau III.3** : Paramètres caractéristiques de la cellule tandem optimisée.

Paramètres	GaN	In <sub>0.66</sub> Ga <sub>0.34</sub> N	In <sub>0.8</sub> Ga <sub>0.2</sub> N	InN
Épaisseur(µm)	0.9	2	0.01	2
Dopage(cm <sup>-3</sup> )	1×10 <sup>21</sup>	5×10 <sup>18</sup>	1×10 <sup>21</sup>	1×10 <sup>19</sup>



**Figure III.14** : Caractéristique courant-tension de la cellule tandem.

Les paramètres électriques de la cellule tandem optimisée sont portés sur le tableau III.4.

**Tableau III.4 :** Paramètres électriques de la cellule tandem optimisée.

Cellule	$\eta$ ( %)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF( %)
Tandem	42.281	1.3189	34.498	92.926

Le facteur de forme (FF) obtenu dans cette simulation a atteint une valeur élevée (92.926 %). Ce résultat peut être expliqué par négligence des résistances parasites notamment la résistance série et la résistance shunt dans notre étude. En effet, dans SCAPS, ces résistances doivent être définies manuellement et ne sont pas activées automatiquement dans les scripts de simulation. L'absence de ces résistances rend le modèle utilisé dans cette étude plus idéal que réaliste, ce qui conduit à l'obtention de telle valeur élevée de FF.

### III.6 Conclusion

La simulation de la cellule solaire tandem à base de matériaux III-nitrides à l'aide du logiciel SCAPS-1D nous a permis d'identifier les paramètres technologiques clés pour atteindre un meilleur rendement. Ces résultats confirment le potentiel des structures tandem dans le développement de dispositifs photovoltaïques à haut rendement.

La simulation a permis de déterminer que les paramètres optimaux des sub-cellules qui forment la cellule tandem. Pour la cellule inférieure  $In_{0.8}Ga_{0.2}N/InN$ , les paramètres optimaux sont 2 μm d'épaisseur pour la couche InN et 0.01 μm pour  $In_{0.8}Ga_{0.2}N$ , et un dopage respectif de  $1.10^{19}$  cm<sup>-3</sup> et  $5.10^{19}$  cm<sup>-3</sup>.

Concernant la cellule supérieure (GaN / $In_{0.66}Ga_{0.34}N$ ), les épaisseurs optimales sont de 2 μm pour la couche  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  et de 0.9 μm pour celle du GaN. Les concentrations des dopages respectifs de  $5.10^{18}$  cm<sup>-3</sup> pour la couche  $In_{0.66}Ga_{0.34}N$  et  $1.10^{21}$  cm<sup>-3</sup> pour GaN.

La cellule tandem simulée présente d'excellentes performances électriques avec une tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) de 1.3189 V, un courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) de 34.498 mA/cm<sup>2</sup>, un facteur de forme (FF) de 92.926 % et un rendement global ( $\eta$ ) de 42.281 %. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité potentielle de ce type de cellule dans la conversion photovoltaïque.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le contexte actuel des recherches visant l'amélioration des performances des cellules solaires.

Notre objectif est l'optimisation et simulation d'une cellule solaire à base des matériaux III-N en utilisant le logiciel SCAPS-1D. Notre étude est basée sur l'optimisation des paramètres physiques des différentes couches des sous cellules (top et bottom) constituant la cellule tandem à base de matériaux III-N (InN, GaN et InGaN). Nous avons analysé l'influence des paramètres technologiques, l'épaisseur et la concentration de dopage, de ces couches sur les performances électriques globales de la cellule tandem. Les paramètres électriques étudiées sont, la tension à circuit ouvert (Voc), le courant de court-circuit (Jsc), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion ( $\eta$ ).

Dans un premier temps, la comparaison entre les performances des cellules simples (à jonction unique) et de la cellule tandem a mis en évidence l'avantage certain de cette dernière. En effet, un rendement global de 34,464 % a été obtenu pour la structure tandem, contre 23,26 % et 17,45 % pour les deux sous-cellules considérées séparément.

L'étude paramétrique a permis d'identifier les combinaisons optimales d'épaisseur et de dopage pour chaque couche active :

- *GaN* (première couche de la sous-cellule supérieure) : Le rendement augmente avec le dopage jusqu'à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et atteint une valeur optimale pour une épaisseur de  $0.9 \mu\text{m}$ . Au-delà de cette épaisseur critique, le rendement diminue.
- *In<sub>0.66</sub>Ga<sub>0.34</sub>N* (deuxième couche de la sous-cellule supérieure) : Les meilleures performances sont obtenues avec un dopage de  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et une épaisseur de  $0.9 \mu\text{m}$ .
- *In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N* (première couche de la sous-cellule inférieure) : Le rendement augmente avec le dopage mais diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Le rendement optimal de la cellule est atteint avec un dopage de  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et une épaisseur de  $0.01 \mu\text{m}$ .
- *InN* (deuxième couche de la sous-cellule inférieure) : Le rendement est maximisé avec un dopage de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  et une épaisseur de  $2 \mu\text{m}$ .

Ces optimisations ont permis d'atteindre une configuration optimale d'une cellule tandem avec des performances électriques remarquables, un rendement de conversion ( $\eta$ ) de 42,281 %, une tension en circuit ouvert (Voc) de 1,3189 V, un courant de court-circuit (Jsc) de 34,498 mA/cm<sup>2</sup> et un facteur de forme (FF) de 92,926 %. Ces résultats mettent en évidence le fort potentiel des cellules tandem à base d'InGaN pour les futures générations de dispositifs photovoltaïques à haut rendement.

Enfin, ce travail ouvre la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine photovoltaïque. On propose d'ajouter des couches supplémentaires à base de  $In_xGa_{1-x}N$  avec différentes fractions molaires et d'étudier l'impact de l'épaisseur et du dopage de chaque couche sur les performances de la cellule. Il semble également intéressant d'envisager d'autres combinaisons d'alliages III-V afin d'améliorer l'absorption de la lumière et de réduire les pertes. Cette démarche permettra d'optimiser la structure de la cellule, de faciliter le procédé de fabrication et d'obtenir des meilleures performances de conversion photovoltaïque.

## Références bibliographiques

- [1] Kannan N, Vakeesan D. «Solar energy for future world: -A review», Renewable and sustainable energy reviews, Vol (62), pages [1092-1105], 2016.
- [2] Boudaoud C. « Cellules solaires Tandem à base d'InGaN, pour haut rendement : Modélisation et Simulation des performances », thèse doctorat. Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen,2021.
- [3] Amanaine A. « Caractérisation par simulation des panneaux solaires photovoltaïques », mémoire master. Université Ibn-Khaldoun – Tiaret, 2022.
- [4] Girault C, James E, Monfort A. « Les cellules Grätzel: L'avenir de la filière photovoltaïque », projet fin d'étude. ENSTA ParisTech, 2011.
- [5] Mimoune M. « Étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies », mémoire master. Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [6] Mohamed K, Bouzaouia AA. « Simulation et caractérisation d'une cellule solaire multi-jonction », mémoire master. Université Saad Dahlab - Blida, 2019.
- [7] Mimouni F, « Etude et simulation d'une cellule solaire à base des nitrures des éléments III-V », mémoire master. Université Ahmed Draia – Adrar,2023.
- [8] Cherif AM. « Modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque », mémoire master. Université Badji Mokhtar - Annaba, 2012.
- [9] Bouchelaghem A, Meriai F. « Étude et simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium nanocristallin », mémoire master. Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel, 2022.
- [10] Belkhamssa M, Bettayeb B. « Optimisation par simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de  $Sb_2(Se_{1-x}S_x)_3$  », mémoire master. Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2023.
- [11] [www.ef4.be/fr/pv/composants-d-un-systeme/cellules-photovoltaïques.html](http://www.ef4.be/fr/pv/composants-d-un-systeme/cellules-photovoltaïques.html).
- [12] Jani O et al. « Effect of phase separation on performance of III-V nitride solar cells », Proc. 22nd Eur. Photovolt. Sol. Energy. Conf., pages [64–67],2007.
- [13] Marouf Y. « Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V », thèse doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra,2019.
- [14] Adaine A. « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base

- d'InGaN », thèse doctorat. Université de Lorraine - Nancy, 2018.
- [15] <https://techniquesolaire.com/solaire-photovoltaïque/avantages-énergie-solairephotovoltaïque>.
- [16] Lincot D. « Matériaux pour la conversion photovoltaïque », Actualité Chimique.Vol (3), pages [144-9], 2002.
- [17] Torrens Zaragozá F. « Periodic table of the elements, history, education and evaluation », Nereis. Vol (13) pages [147-64], 2021.
- [18] Laval S. « Physique des semi-conducteurs III-V », compte rendu. École d'été d'optoélectronique, Orsay,2002.
- [19] Girault C, James E, Monfort A. « Les cellules Grätzel: L'avenir de la filière photovoltaïque », projet fin d'étude. ENSTA ParisTech, 2011.
- [20] Slamani A. « Physique des semi-conducteurs », cours. Université Ahmed Zabana - Relizane 2019.
- [21] Souici AH, « Physique des semi-conducteurs », cours. Université Abderrahmane Mira - Bejaïa, 2013.
- [22] Colinge JP, Colinge CA. «Physics of semiconductor devices», New York: Springer Science & Business Media, pages [1-49],2005.
- [23] Fahrenbruch AL, Bube RH. « Fundamentals of solar cells: Photovoltaic solar energy conversion », New York: Academic Press, pages [50-60],1983.
- [24] Menacer F. « Simulation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco », mémoire master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [25] Gorge V. « Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V », thèse doctorat. Université Paris-Sud 11-Paris, 2012.
- [26] Makhtour D, Gharbi S. « Étude et simulation d'une structure à base de InGaN pour le photovoltaïque », mémoire master, Université Saad Dahlab – Blida, 2013.
- [27] [https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-bandes-denergie-dun-conducteur-dun-isolant-et-dun-semiconducteur\\_fig3\\_277045717](https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-bandes-denergie-dun-conducteur-dun-isolant-et-dun-semiconducteur_fig3_277045717).
- [28] Asselah R, Taibi I. « Simulation numérique et optimisation des cellules solaires à base de InGaN », mémoire master, Université Saad Dahlab – Blida, 2020.

## Références bibliographiques

---

- [29] Mostefaoui MA. « Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires à base de InGaN », mémoire master, Université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen, 2015.
- [30] Mehrazi A, Laterche H. « Étude par TCAD-Silvaco d'une structure n-on-p dans le cadre du projet ATLAS du CERN », mémoire master, Université Saad Dahlab – Blida, 2015.
- [31] Kim S. « Effet de la fraction molaire sur la cellule solaire en InGaN », mémoire master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018.
- [32] Zouad MS, Mahieddine M. « Étude et simulation d'une cellule solaire à multi-jonction à base de InGaN », mémoire master, Université Saad Dahlab- Blida, 2014.
- [33] Marouf Y. « Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas silvaco », mémoire master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [34] Lu IL, Wu YR, Singh J. « A study of the role of dislocation density, indium composition on the radiative efficiency in InGaN/GaN polar and no-polar light-emitting diodes using drift-diffusion coupled with a Monte Carlo method», Journal of Applied Physics, Vol (108), pages [1-8], 2010.
- [35] Na H et al. « Effect of low-temperature InGaN inter layers on structural and optical properties of In-rich InGaN », Journal Cryst Growth, Vol (300), pages [177-81], 2007.
- [36] [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401807007882.](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401807007882)
- [37] Wiirfel, P. « Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts », Université Karlsruher Institut für Technologie - Bade-Wurtemberg, 2005.
- [38] Gray, J. L. «The physics of the solar cell », Handbook of photovoltaic science and engineering, pages [82-128], 2011.
- [39] Solanki, C. S. « Solar photovoltaics: fundamentals, technologies and applications », Phi learning pvt. Ltd, 2015.
- [40] Riverola, A., Vossier, A., & Chemisana, D. « Fundamentals of solar cells », Nanomaterials for Solar Cell Applications, pages [3-33]. Elsevier, 2019.
- [41] Victoria, M. «Fundamentals of Solar Cells and Photovoltaic Systems Engineering », Academic Press (Elsevier),2024.
- [42] Basore, P. A. (1990). « Numerical modeling of textured silicon solar cells using PC-1D », IEEE Transactions on Electron Devices, Vol (37), pages [337–343], 1990.

## Références bibliographiques

---

- [43] Burgelman M et al. « SCAPS manual ». University of Ghent-Ghent-Belgium,2016.
- [44] Lazari R, Salhi A. « Étude et simulation numérique d'une cellule solaire à base des semi-conducteurs III-N », mémoire master. Université Université Abderrahmane Mira-Béjaia,2024.
- [45] Boudaoud L et al. « Numerical Study of InGaN based Photovoltaic by SCAPs Simulation », Energy Procedia, Vol (74), pages [745-751], 2015.
- [46] Sarollahi et al. « Study of simulations of double graded InGaN solar cell structures », Journal of Vacuum Science & Technology B. Vol (40), pages [2-4],2022.
- [47] Abboudi et al. « Efficiency of InN/InGaN/GaN Intermediate-Band Solar Cell under the Effects of Hydrostatic Pressure, In-Compositions, Built-in-Electric Field, Confinement, and Thickness », Nanomaterials, Vol (14), pages [3-10],2024.

## Résumé

Le travail présenté dans ce manuscrit s'est inscrit dans le des recherches actuelles sur l'amélioration des cellules solaires, en s'intéressant particulièrement aux matériaux III-V. L'alliage InGaN, grâce à sa large couverture spectrale et ses bonnes propriétés électriques se révèle prometteur pour les applications photovoltaïques.

L'objectif de notre travail est la simulation et l'optimisation d'une cellule solaire tandem à base de matériaux III-N. L'étude, réalisée avec le logiciel SCAPS-1D, porte sur les jonctions simples ITO/GaN/In<sub>0.66</sub>Ga<sub>0.34</sub>N et In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N/InN, puis la jonction double, en analysant l'impact de l'épaisseur et du dopage sur les performances électriques de la cellule.

Les simulations ont permis d'identifier les configurations optimales des couches, améliorant significativement le rendement global. La cellule tandem optimisée a atteint un rendement ( $\eta$ ) de 42,281 %, avec une tension en circuit ouvert (Voc) de 1.3189 V, un courant de court-circuit (Jsc) de 34.498 mA/cm<sup>2</sup> et un facteur de forme (FF) de 92.926 %. Ces résultats confirment le fort potentiel des structures tandem III-N pour le photovoltaïque à haut rendement.

**Mots clés :** Matériaux III-N, InGaN, Cellule solaire, Double jonction, SCAPS 1D.

## Abstract

The work presented in this manuscript is part of ongoing research aimed at improving solar cell performance, with a particular focus on III-V materials. The InGaN alloy, due to its broad spectral coverage and excellent electrical properties, proves to be a promising candidate for photovoltaic applications.

The objective of this study is the simulation and optimization of a tandem solar cell based on III-nitride materials. The analysis, carried out using the SCAPS-1D software, focuses on the single-junction structures ITO/GaN/In<sub>0.66</sub>Ga<sub>0.34</sub>N and In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>N/InN, followed by the double-junction configuration. The influence of layer thickness and doping on the electrical performance of the cell was thoroughly examined.

The simulations enabled the identification of optimal layer configurations, resulting in a significant improvement in overall efficiency. The optimized tandem cell achieved a power conversion efficiency ( $\eta$ ) of 42.281%, with an open-circuit voltage (Voc) of 1.3189 V, a short-circuit current density (Jsc) of 34.498 mA/cm<sup>2</sup>, and a fill factor (FF) of 92.926%. These results confirm the high potential of III-N tandem structures for high-efficiency photovoltaic applications.

**Keywords:** III-N materials, InGaN, Solar cell, Tandem junction, SCAPS-1D.

## ملخص

يُندرج العمل المُقدم في هذا المخطوط ضمن سياق الأبحاث الحالية الهدفة إلى تحسين أداء الخلايا الشمسية، مع التركيز بشكل خاص على مواد المجموعة III-V. نظرًا لطبيعتها الطيفية الواسعة وخصائصها الكهربائية الجيدة يُعد سبيكة InGaN واحدة من التطبيقات الكهروضوئية.

يهدف هذا العمل إلى محاكاة وتحسين خلية شمسية تراديافية تعتمد على مواد III-V. أُنجزت الدراسة باستخدام برنامج SCAPS-1D. وتركزت على التراكيب أحادية أحادية In<sub>0.88</sub>Ga<sub>0.2</sub>N وITO/GaN/In<sub>0.66</sub>Ga<sub>0.34</sub>N. تليها البنية التراديافية المزدوجة، من خلال تحليل تأثير كل من السمك ودرجة التعليم على الأداء الكهربائي للخلية.

مكّنت المحاكاة من تحديد التراكيب المثلث لكل طبقة، مما أدى إلى تحسين كبير في الكفاءة العامة. وقد حققت الخلية التراديافية المثلث مردودية ( $\eta$ ) قدرها 42.281%، جهد دائرة المفتوحة (Voc) بلغ 1.3189 فولت، وكثافة تيار دائرة قصر (Jsc) بلغت 34.498 ميلي أمبير/سم<sup>2</sup>، وعامل امتلاء (FF) بلغ 92.926%.

تؤكّد هذه النتائج الإمكانات الكبيرة لهيكل III-V التراديافية في مجال الطاقة الكهروضوئية عالية الكفاءة.

**الكلمات المفتاحية :** مواد III-N، نيتريد إنديوم غاليم، نمذجة، خلية شمسية، SCAPS-1D.