

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE AKLI MOUHAND OULHADJ DE BOUIRA**

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

En Physique des Matériaux

Présenté par : Mlle khelifi hadjer

Thème

**Optimisation numérique des performances d'une  
cellule solaire à base des nitrures III**

Jury de soutenance est composé de :

Mme Boudaoud Chahrazad	MAA	Encadreur
Mme Allam Zehor	MCB	Co-encadreur
Mr Madi Djamel	MCA	Examineur
Mme Mahdid Saida	MAA	Examineur

*Année Universitaire 2019/2020*



## *Remerciement*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciement et ma profonde gratitude à Madame Boudaoud Chahrazad MAA à l'université de Bouira, ainsi qu'à madame Allam Zehor MCB à l'université de Djelfa pour leurs soutien permanent et leurs aides constante, tant sur le fond de mon travail que sur sa formulation.*

*Mes sincères remerciement a Monsieur Madi Djamel MCA à l'université de Bouira et madame Mahdid Saida MAA à l'université de Bouira d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Mes remerciements vont aux enseignant de et tout le personnel administratif du département de physique à l'université de Bouira.*



# Table de matière

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : propriétés des matériaux III.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Propriétés structurales.....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Structure cristallographique.....	4
1.2.2 La polarisation.....	6
1.2.2.1 La polarisation spontanée.....	6
1.2.2.2 La polarisation piézoélectrique.....	7
1.2.2.3 La polarisation totale.....	8
<b>1.3 Propriétés mécaniques.....</b>	<b>9</b>
1.3.1 Coefficients élastiques.....	9
1.3.2 Coefficients de dilatation thermique.....	10
<b>1.4 Propriétés électriques.....</b>	<b>10</b>
1.4.1 Expression du gap des matériaux $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	10
1.4.2 Mobilité des porteurs dans les nitrures.....	10
1.4.3 Mécanismes de recombinaison.....	11
1.4.3.1 Recombinaisons radiatives.....	11
1.4.3.2 Recombinaisons Shockley-Read-Hall.....	12
1.4.3.3 Recombinaisons Auger.....	12
<b>1.5 Hétéro-épitaxie des nitrures d'éléments III.....</b>	<b>13</b>
1.5.1 Méthodes de croissances.....	13
1.5.1.1 L'épitaxie par jets moléculaires (EJM).....	14
1.5.1.2 L'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (EPVOM).....	14
1.5.2 Épaisseur critique.....	15
1.5.3 Défauts structuraux dans les nitrures.....	16
1.5.3.1 Dislocations.....	16
<b>1.6 Dopage.....</b>	<b>16</b>
<b>1.7 Conclusion.....</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre 2 : Cellules solaires.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Spectre solaire.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 La cellule photovoltaïque.....</b>	<b>20</b>
2.3.1 Jonction p-n base de cellule photovoltaïque.....	20
2.3.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	21
2.3.3 Caractéristique courant-tension et paramètres de la cellule solaire.....	22
2.3.4 Rendement quantique.....	24
<b>2.4 Les différentes technologies photovoltaïques existantes.....</b>	<b>25</b>
2.4.1 Les cellules solaires de la première génération.....	26

2.4.1.1 La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.....	26
2.4.1.2 La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin.....	27
2.4.2 Les cellules solaires de la deuxième génération.....	27
2.4.2.1 Cellules solaires à base de Silicium amorphe.....	27
2.4.2.2 Cellules solaires à base de l'arséniure de gallium (GaAs).....	28
2.4.2.3 cellules solaires à base de tellure de cadmium (CdTe).....	28
2.4.3 Les cellules solaires de la troisième génération.....	28
2.4.3.1 Filière multi-jonctions à base des matériaux III-V.....	29
<b>2.5 Cellule photovoltaïque à base d'InGaN.....</b>	<b>30</b>
2.5.1 Cellules solaires homojonction à base d'InGaN.....	31
2.5.2 Cellules solaires hétérojonction à base d'InGaN.....	31
<b>2.6 Conclusion.....</b>	<b>32</b>
<b>Chapitre 3 : Simulation d'une cellule solaire à hétérojonction GaN/InGaN.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Logiciel de simulation SILVACO.....</b>	<b>34</b>
3.2.1 Outils de cœur.....	34
3.2.2 Outils interactifs.....	35
3.2.3 SILVACO-ATLAS.....	35
<b>3.3 Résultats de simulation.....</b>	<b>35</b>
3.3.1 Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque.....	38
3.3.2 Effet de la couche antireflet.....	39
<b>3.4 Conclusion.....</b>	<b>40</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>41</b>
<b>Références.....</b>	<b>42</b>

## Liste des figures

Figure1.1	Structure blende de zinc du GaN (a) et structure wurtzite (b).....	4
Figure1.2	Schéma de la première zone de Brillouin pour une structure hexagonale.....	5
Figure1.3	Polarisations Ga et N pour le GaN hexagonal.....	6
Figure1.4	Génération de la densité surfacique de charge ( $\sigma$ ) par la polarisation spontanée dans un cristal GaN wurtzite polarité gallium.....	7
Figure1.5	Orientation de la polarisation piézoélectrique et de la polarisation spontanée d'une couche d'InGaN polarité Gallium contrainte en tension a) et contrainte en compression b).....	8
Figure1.6	Mobilité des porteurs libres dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la température...	11
Figure1.7	Schéma de la recombinaison radiative.....	12
Figure1.8	Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).....	12
Figure1.9	Mécanisme de recombinaison Auger.....	13
Figure1.10	Épaisseur critique de relaxation plastique calculée à partir des modèles de People et Beam, Fisher et al. et Matthews et Blacklee avec celles obtenues expérimentalement par Parker et al. (●) et Srinivasan et al. (■).....	15
Figure1.11	Vecteurs de Burger des dislocations dans GaN.....	16
Figure 2.1	Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar spectrum.....	19
Figure 2.2	Jonction p-n.....	21
Figure 2.3	Principe de l'effet photovoltaïque.....	22
Figure 2.4	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	22
Figure 2.5	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	23
Figure 2.6	Caractéristiques courant-tension $I(V)$ d'une cellule solaire.....	23
Figure 2.7	Rendement historique des cellules photovoltaïques lors des essais en laboratoire.....	26
Figure 2.8	a) Fonctionnement des cellules multi-jonctions et b) absorption dans la cellule en fonction de la longueur d'onde.....	29
Figure 2.9	(a) Schéma d'une cellule triple-jonctions. Les cellules sont connectées entre elles par les jonctions tunnel. La couche tampon entre Ge et InGaAs sert à adapter leur paramètre de maille. (b) Le spectre solaire AM1.5 et les parties du spectre qui peuvent être utilisée en théorie par les cellules solaires $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{P}/\text{Ga}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{As}/\text{Ge}$ .....	30
Figure 2.10	Caractéristiques courant-tension sous illumination de chaque sous-cellule et de la cellule triple jonctions $\text{GaInP}(\text{cellule1})/\text{GaInAs}(\text{cellule2})/\text{Ge}(\text{cellule3})$ complète.....	30
Figure 3.1	Outils de SILVACO TCAD.....	34
Figure 3.2	Entrées et sorties d'ATLAS.....	35
Figure 3.2	Structure de la cellule solaire.....	36
Figure 3.2	Maillage de la structure de la cellule.....	36
Figure 3.2	Champ électrique à travers la structure.....	37
Figure 3.2	Diagramme de bandes de la cellule solaire.....	37
Figure 3.2	Caractéristique J-V de la cellule solaire.....	38
Figure 3.2	Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.....	39
Figure 3.2	Influence de la couche antireflet sur la caractéristique J-V de la cellule solaire.....	40

## Liste des tableaux

Tableau 1.1	Paramètres de maille des nitrures en phase cubique et hexagonale.....	5
Tableau 1.2	Tableau 1.2 – Paramètres piézoélectriques et valeur de la polarisation spontanée pour GaN et InN.....	8
Tableau 1.3	Propriétés mécaniques et constantes d'élasticité du GaN et de l'InN.....	9
Tableau 1.4	Coefficients de dilatation thermique des III-nitrures en phase hexagonale..	10
Tableau 1.5	Caractéristiques physiques des substrats utilisés pour la croissance du GaN.....	13
Tableau 1.6	Caractéristiques des techniques de croissance généralement utilisées pour l'épitaxie de structures à base des nitrures III.....	14
Tableau 2.1	Etat de l'art de cellules solaires homo-jonctions à base d'InGaN.....	31
Tableau 2.2	Etat de l'art de cellules solaires hétérojonctions à base d'InGaN.....	32
Tableau 3.1	Résultats de simulation.....	38
Tableau 3.2	Influence de la couche antireflet sur les paramètres de la cellule solaire.....	40

## **INTRODUCTION GENERALE**

La demande mondiale d'électricité est en augmentation. Les réserves limitées de combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre ont suscité de graves inquiétudes concernant les crises énergétiques et les menaces climatiques. Ces préoccupations ont conduit les chercheurs à rechercher des sources d'énergie alternatives, et l'énergie solaire est considérée comme la source la plus acceptable parmi toutes les sources d'énergie renouvelables. L'énergie solaire est disponible en abondance et gratuitement dans le monde entier. On rapporte que la Terre reçoit de l'énergie du Soleil, ce qui est 10 000 fois plus que la demande énergétique totale de la planète. Dans les années 1950, les scientifiques travaillant aux laboratoires Bell ont mis au point les premières cellules photovoltaïques (PV) commerciales. Ces cellules photovoltaïques étaient capables de convertir la lumière du soleil en énergie électrique pour alimenter des équipements électriques. Ces cellules photovoltaïques ont commencé à être utilisées dans les programmes spatiaux, c'est-à-dire pour alimenter des satellites, etc. Les progrès de la technologie ont permis de réduire le prix du photovoltaïque solaire et celui-ci a commencé à être utilisé pour des applications domestiques [1].

Dans le secteur du photovoltaïque, les attentes sont nombreuses : augmentation de l'efficacité de conversion, diminution des coûts de production, diminution de l'impact environnemental, etc. Actuellement, la filière est largement dominée par la technologie silicium cristallin avec près de 93% de la production mondiale en 2016. Cependant, la production des cellules solaires à base de silicium reste coûteuse et nécessite une importante quantité de matériau. En outre, les cellules en silicium présentent actuellement en laboratoire, un rendement maximal de 25,6%, ce qui est très proche de la limite théorique maximale pour une cellule simple jonction. Par conséquent, le besoin grandissant d'énergie photovoltaïque a poussé les travaux de recherche sur l'utilisation d'autres matériaux alternatifs, bien que cela ne signifie nullement l'arrêt des recherches dans la filière silicium. Aujourd'hui, ces recherches, très nombreuses et variées, se focalisent principalement sur les technologies à couches minces. Parmi ces technologies, on trouve notamment, celle à base de matériaux III-V [2].

Dans ce travail on s'intéresse au matériau InGaN, qui est devenu au cours des dernières années un matériau prometteur pour les applications optoélectroniques, notamment photovoltaïques grâce à son énergie de gap modulable qui couvre presque tous le spectre solaire, son coefficient d'absorption élevé et sa résistance à de fortes puissances. L'objectif

principal de cette mémoire est d'optimiser le rendement d'une cellule solaire à hétérojonction à base d'InGaN/GaN.

Ce travail se décompose en trois chapitres.

Le premier chapitre présente les matériaux III-V, ses caractéristiques, ses principales propriétés et sa croissance.

Le deuxième chapitre explique le fonctionnement d'une cellule solaire, ses paramètres importants, ainsi que les différentes technologies photovoltaïques existantes.

Le troisième chapitre, présente l'étude de simulation d'une structure de cellule solaire hétérojonction à base d'InGaN/GaN. La simulation des performances est réalisée en utilisant le logiciel Atlas de SILVACO.



# *Chapitre 1 : propriétés des matériaux III*

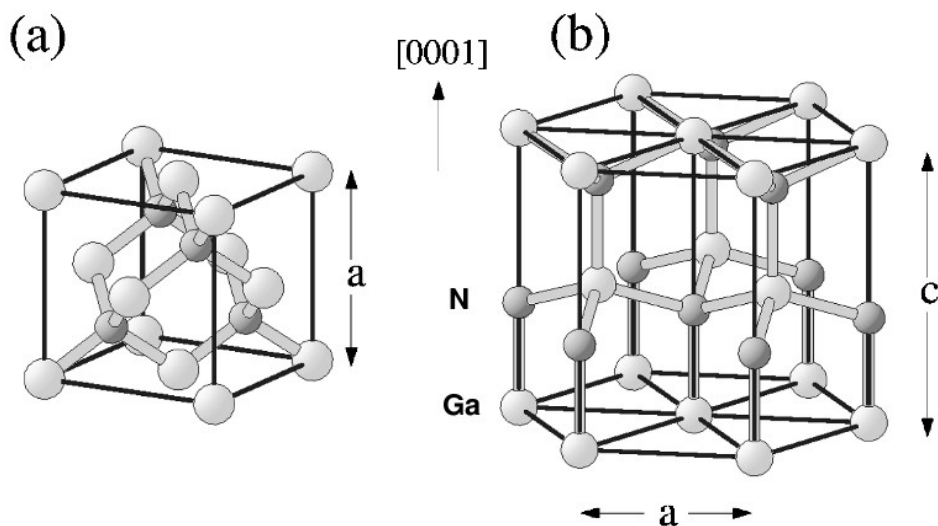
## 1.1 Introduction

Les matériaux III-V sont des alliages des éléments du groupe III et du groupe V du tableau Mendeleïev. Ces alliages peuvent se constituer de deux éléments, les alliages binaires comme GaAs, InP, GaN ou trois éléments, les alliages ternaires comme InGaP, AlGaIn, AlInN, ou aussi de quatre éléments, les alliages quaternaires comme GaInAsP. Ce chapitre présente les propriétés structurales, mécaniques, et électriques du matériau de nitrure de gallium-indium (InGaN). Le matériau InGaN est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN), ces deux matériaux sont des semi-conducteurs faisant partie des nitrures d'éléments III.

## 1.2 Propriétés structurales

### 1.2.1 Structure cristallographique

Les nitrures d'éléments III sont formés par l'association d'un élément de la colonne III (Ga, In, Al, B) et de l'élément N de la colonne V de la classification de Mendeleïev. Leurs alliages ternaires et quaternaires sont également définis comme des nitrures d'éléments III. Ces matériaux existent sous deux formes cristallines : la phase wurtzite (hexagonale) et la phase blende de zinc (cubique). D'un point de vue thermodynamique, La phase cubique est métastable alors que la phase hexagonale est stable. Ces deux phases sont représentées sur la figure I.1 dans le cas du GaN [3].



**Fig. 1.1** – Structure blende de zinc du GaN (a) et structure wurtzite (b) [4].

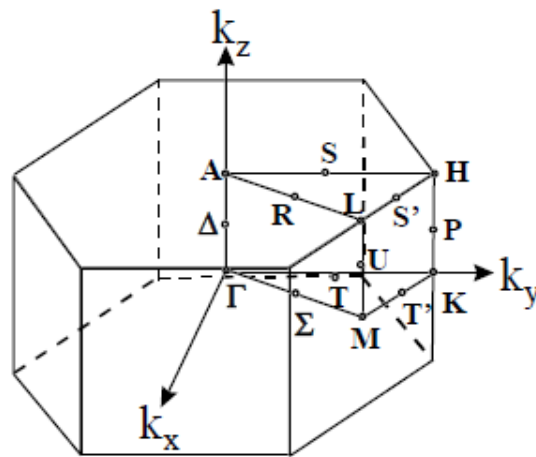
La structure blende de zinc (figure I.1.a) est formée par deux sous réseaux cubiques à faces centrées, l'un est constitué du Ga et l'autre de l'azote, les deux sous réseaux étant décalés du quart de la diagonale principale. La deuxième structure dite « wurtzite » est constituée de deux réseaux hexagonaux compacts, l'un forme par l'azote et l'autre par le Ga, décalés de

3/8ème de  $c$  (figure I.1.b), En plus du côté  $a$  de l'hexagone et de la hauteur  $c$  de la maille, la structure wurtzite est décrite par la longueur de la liaison (notée  $u$ ) entre les atomes d'azote et les atomes d'éléments III. [5], [6]. Le tableau 1.1 présente les paramètres de maille des nitrures GaN et InN pour les deux structures.

Tableau 1.1– Paramètres de maille des nitrures en phase cubique et hexagonale [7], [8].

Composés binaires	Hexagonal (Wz)			Cubique (ZB)
	a (Å)	c (Å)	u (Å)	a (Å)
GaN	3.18	5.18	0.37	4.47
	9	5	7	
InN	3.54	5.70	0.37	4.96
	5	3	8	

L'espace réciproque est également souvent utilisé pour décrire une structure. Il correspond à l'espace des vecteurs d'onde décrivant la périodicité du réseau cristallin. Dans l'espace réciproque, la maille élémentaire de l'espace direct s'identifie à la première zone de Brillouin. Cette dernière peut être définie comme le volume délimité par des surfaces issues de l'ensemble des points équidistants de l'atome et de ses plus proches voisins. La Figure 1.2 montre la zone de Brillouin pour une structure hexagonale. Certains points de haute symétrie revêtent un intérêt particulier, se sont les points critiques. Parmi ceux-ci, le centre de la zone de Brillouin est appelé le point  $\Gamma$ .



**Fig. 1.2** – Schéma de la première zone de Brillouin pour une structure hexagonale [9].

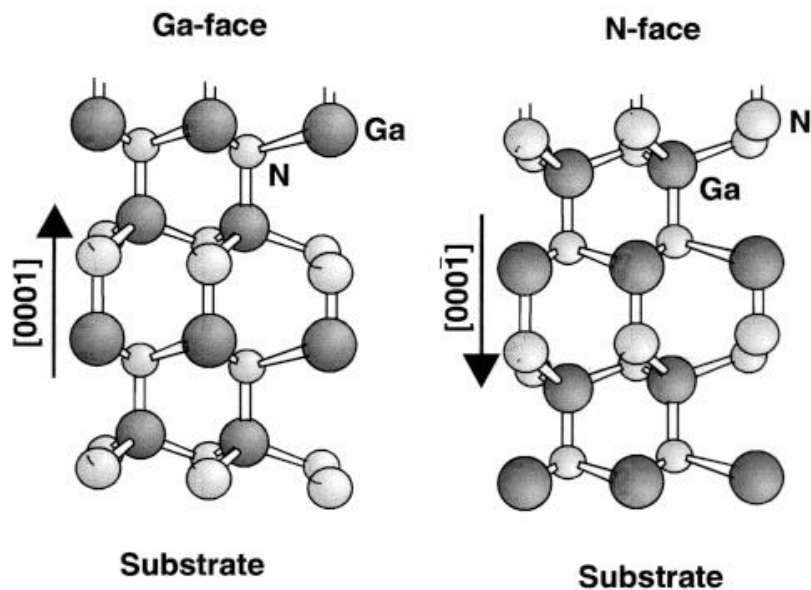
Pour résumer, les nitrures-III peuvent se présenter sous trois formes cristallines (wurtzite, zinc-blende et NaCl), mais la plus stable est la wurtzite.

## 1.2.2 La polarisation

La structure wurtzite est non centrosymétrique, c.à.d. les barycentres des charges positives ne superposent pas avec celui des charges négatives. Deux types de polarisations sont ainsi observés dans les nitrures d'éléments III, la polarisation spontanée existant à l'équilibre, et la polarisation piézoélectrique due à des contraintes extérieures.

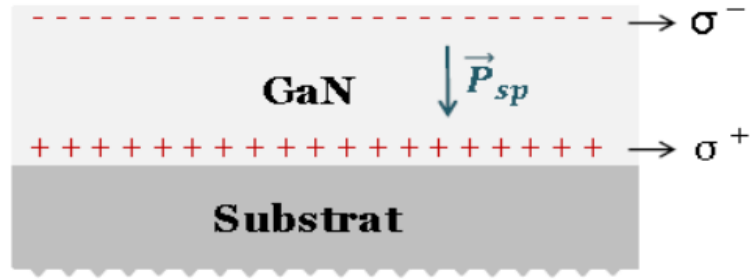
### 1.2.2.1 La polarisation spontanée

Les nitrures d'éléments III sont naturellement polarisés, cette polarisation dite spontanée existe sans excitation extérieure appliquée. La structure wurtzite n'est pas symétrique par rapport au plan (0001). En effet, les directions [0001] et [000-1] ne sont pas équivalentes. Pour le nitrure de gallium, il existe deux arrangements possibles des atomes de gallium et d'azote lors de la croissance. Dans le cas où la liaison orientée Ga-N pointe vers la surface, on dit que l'on a une polarité gallium et la direction de croissance sera [0001] (figure 1.3). Dans le cas contraire, on a une polarité azote, et la direction de croissance sera [000-1] [2].



**Fig 1.3** – Polarisation Ga et N pour le GaN hexagonal [10].

En somme, la polarisation spontanée va entraîner une séparation spatiale des porteurs de charges, créant ainsi une accumulation de charges aux interfaces qui peut changer les propriétés électriques du matériau (Figure 1.4).



**Fig. 1.4** – Génération de la densité surfacique de charge ( $\sigma$ ) par la polarisation spontanée dans un cristal GaN wurtzite polarité gallium.

Pour le nitrure de gallium indium (InGaN), la polarisation spontanée ( $P_{sp}$ ) est modélisée par une interpolation quadratique reliant les valeurs des  $P_{sp}$  des deux éléments binaires qui le composent (InN et GaN) et la composition d'indium ( $x$ ) avec un paramètre de courbure  $b = 0,038\text{C/m}^2$ . On a donc l'expression suivante.

$$P_{sp}^{In_xGa_{1-x}N} = x \times P_{sp}^{InN} + (1 - x) \times P_{sp}^{GaN} - b \times x \times (1 - x) \quad (1)$$

où  $x$  est la concentration en indium dans  $In_xGa_{1-x}N$ ,  $b$  est le paramètre de courbure,  $P_{sp}^{In_xGa_{1-x}N}$  est la polarisation spontanée de  $In_xGa_{1-x}N$ ,  $P_{sp}^{InN}$  et  $P_{sp}^{GaN}$  sont les polarisations spontanées de  $InN$  et  $GaN$  respectivement [2].

### 1.2.2.2 La polarisation piézoélectrique

Outre la polarisation spontanée, les nitrures-III possèdent également un caractère piézoélectrique. Cet effet est défini comme la création d'un champ électrique suite à une déformation mécanique, et réciproquement comme la création de déformations mécaniques lorsqu'on applique un champ électrique à un matériau. Il est dû au manque de symétrie dans la structure cristalline, à la nature fortement ionique des liaisons chimiques et aux déformations présentes dans le cristal (dues au désaccord de maille entre le matériau et le substrat, par exemple). Cette polarisation piézoélectrique n'est pas orientée forcément dans la même direction que la polarisation interne. Elle dépend des propriétés du matériau.

Pour l'alliage InGaN, la polarisation piézoélectrique peut être calculée à partir d'une interpolation linéaire (loi de Vegard) :

$$P_{pi}^{In_xGa_{1-x}N} = x \times P_{pi}^{InN} + (1 - x) \times P_{pi}^{GaN} \quad (2)$$

où  $x$  est la concentration d'indium dans  $In_xGa_{1-x}N$ ,  $P_{pi}^{In_xGa_{1-x}N}$  est la polarisation piézoélectrique de  $In_xGa_{1-x}N$ ,  $P_{pi}^{InN}$  et  $P_{pi}^{GaN}$  sont les polarisations piézoélectriques de  $InN$  et  $GaN$ .

La polarisation piézoélectrique dépend de la déformation du paramètre de maille et peut s'exprimer par la relation suivante :

$$P_{pi} = 2 \times \frac{a_s - a_0}{a_0} \times \left( e_{31} - \frac{c_{13}}{c_{33}} \times e_{33} \right) \quad (3)$$

où  $a_s$  est le paramètre de maille du substrat et  $a_0$ , celui de la couche épitaxie.  $e_{31}$  et  $e_{33}$  sont des constantes piézoélectriques,  $c_{13}$  et  $c_{33}$  sont des constantes élastiques [2].

Tableau 1.2 – Paramètres piézoélectriques et valeur de la polarisation spontanée pour GaN et InN [11]–[13]

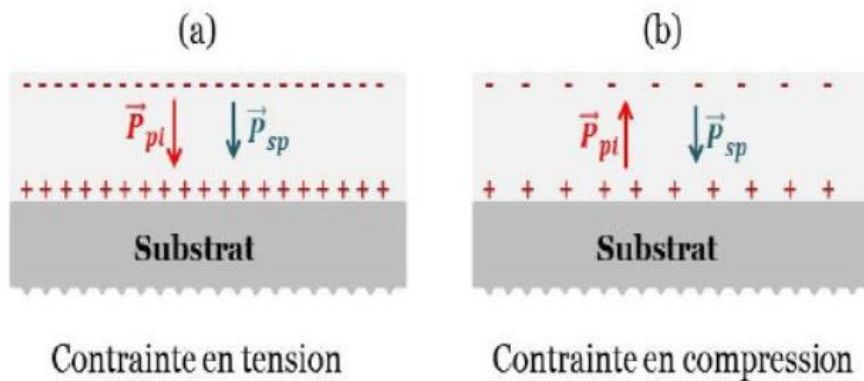
	$e_{33}$ (C/m <sup>2</sup> )	$e_{31}$ (C/m <sup>2</sup> )	$P_{sp}$ (C/m <sup>2</sup> )
<b>InN</b>	0,81	-0,41	-0,042
	0,97	-0,57	-0,032
<b>GaN</b>	0,67	-0,34	-0,034
	1,27	-0,35	-0,029

### 1.2.2.3 La polarisation totale

La polarisation totale dans un matériau à structure wurtzite est alors égale à la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique [9].

$$\vec{P} = \vec{P}_{sp} + \vec{P}_{pi} \quad (4)$$

Elle peut être positive ou négative et son orientation est elle-même définie selon que la structure est en tension ou en compression. En effet, dans le cas où le cristal est en tension, la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique sont de même sens et la polarisation totale s'en trouve augmentée. Par contre, si le cristal est en compression, les deux polarisations sont de sens opposés et la polarisation totale diminue. (Figure 1.5).



**Fig 1.5** – Orientation de la polarisation piézoélectrique et de la polarisation spontanée d'une couche d'InGaN polarité Gallium contrainte en tension a) et contrainte en compression b) [2].

### 1.3 Propriétés mécaniques

#### 1.3.1 Coefficients élastiques

Les grands désaccords de mailles entre le GaN et les substrats de croissance, ainsi qu'entre les composés III-V, entraînent des contraintes et des déformations dans les couches épitaxiales.

Selon la loi de Hooke la déformation du cristal  $\varepsilon_{kl}$  due aux forces externes ou interne ou aux contraintes  $\sigma_{ij}$  peut être décrit par :

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

Où  $\sigma_{ij}$  est la contrainte dans le matériau,  $\varepsilon_{kl}$  est la déformation et  $C_{ijkl}$  le tenseur élastique. Due à la symétrie spéciale ce quatrième rang de tenseur peut être réduit à une matrice  $6 \times 6$  qui utilise la notation :  $xx \rightarrow 1, yy \rightarrow 2, zz \rightarrow 3, yz, zy \rightarrow 4, zx, xz \rightarrow 5, xy, yx \rightarrow 6$ . Les éléments du tenseur élastique peuvent être réécrits comme  $C_{ijkl} = C_{mn}$ , où  $i, j, k, l = x, y, z$  et  $m, n = 1, \dots, 6$ . Utilisant cette notation, la loi de Hooke peut être simplifiée à

$$\sigma_i = \sum_j C_{ij} \cdot \varepsilon_j$$

La matrice  $6 \times 6$  des constantes élastiques  $C_{ij}$  pour cristaux avec structure hexagonal est donnée par [14] :

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{pmatrix}$$

Grâce aux symétries cristallines, le tenseur d'élasticité est donné par cinq paramètres:  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{33}$  et  $C_{44}$ , le tableau 1.3 donne les valeurs mesurées et calculées des constantes élastiques de GaN et InN.

Tableau 1.3 – Propriétés mécaniques et constantes d'élasticité du GaN et de l'InN [15].

	InN		GaN	
	exp.	cal.	exp.	cal.
<b>C<sub>11</sub> [GPa]</b>	190	223	374	367
<b>C<sub>12</sub> [GPa]</b>	104	115	106	135
<b>C<sub>13</sub> [GPa]</b>	121	92	70	103
<b>C<sub>33</sub> [GPa]</b>	182	224	379	405
<b>C<sub>44</sub> [GPa]</b>	10	48	101	95

### 1.3.2 Coefficients de dilatation thermique

Tout matériau soumis à un changement de température se déforme : c'est le phénomène de la dilatation thermique. Il convient d'en tenir compte lorsque l'on étudie les propriétés des semi-conducteurs à des températures différentes mais également lors de la croissance du matériau car celle-ci se fait à haute température. Ainsi une couche hétéroépitaxie complètement relaxée à la température de croissance peut être contrainte à la température ambiante. Les coefficients de dilatation thermiques permettent d'évaluer la déformation de la maille cristalline en fonction de la variation de température [9].

Tableau 1.4 – Coefficients de dilatation thermique des III-nitrures en phase hexagonale [9].

	<b>GaN</b>	<b>InN</b>
$\Delta a/a$ ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	5.59	2.85
$\Delta c/c$ ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	3.17	3.75

## 1.4 Propriétés électriques

### 1.4.1 Expression du gap des matériaux $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

La bande interdite d' $\text{InGaN}$  est calculée en utilisant la loi empirique de Vegard. Elle est déterminée par une interpolation linéaire des valeurs des gaps de GaN et InN. Pour l' $\text{InN}$  la bande d'énergie interdite est de 0,7 eV et pour GaN, la bande d'énergie interdite est de 3,42 eV. Cependant, pour le gap d' $\text{InGaN}$ , les valeurs mesurées ne sont pas en totale adéquation avec les valeurs obtenues avec l'interpolation linéaire, on introduit alors un paramètre de courbure dans l'expression afin de suivre les données expérimentales. L'expression du gap d' $\text{InGaN}$  est donc donnée par [16], [17] :

$$E_g^{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x \times E_g^{\text{InN}} + (1 - x) \times E_g^{\text{GaN}} - b \times x \times (1 - x)$$

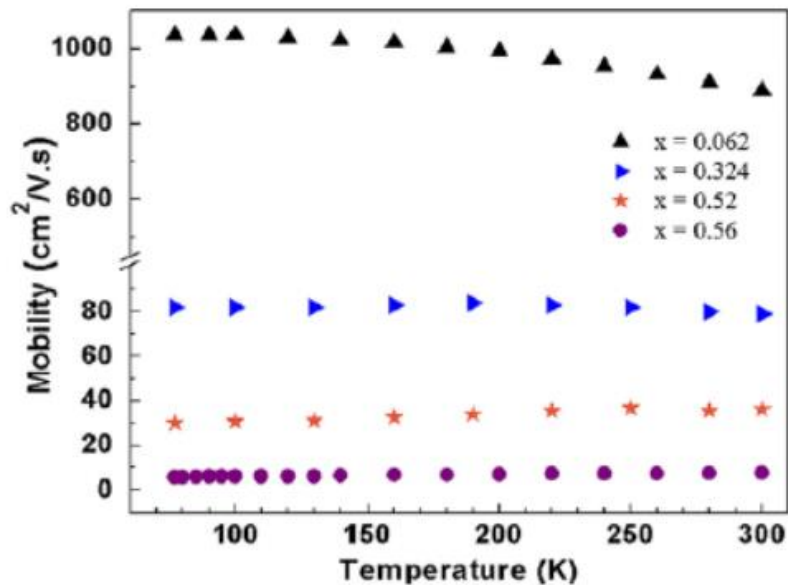
Avec  $x$  est la concentration d'indium dans  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  [s.d.],  $b$  est le paramètre la courbure [eV],  $E_g^{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}$  le gap d'énergie d' $\text{InGaN}$ ,  $E_g^{\text{GaN}}$  et  $E_g^{\text{InN}}$  sont les bandes d'énergie du GaN et d' $\text{InN}$ .

### 1.4.2 Mobilité des porteurs dans les nitrures

La mobilité des porteurs dans InN est inversement proportionnelle à la densité d'électrons libres présents dans le matériau. Ce phénomène est également présent dans les autres nitrures (GaN, InGaN). La mobilité des porteurs libres dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  est présentée dans la Figure 1.6 avec  $x$  la concentration de Ga. On observe que la mobilité diminue avec la concentration



de Ga. Ceci est dû à la fois à l'augmentation de la masse effective des électrons avec l'augmentation de la concentration de Ga dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  ( $m_e^{\text{GaN}} = 0,2 m_0$  et  $m_e^{\text{InN}} = 0,11 m_0$ ), mais aussi à l'augmentation du phénomène de diffusion des porteurs à cause de l'alliage et des défauts qui augmentent avec la concentration de Ga dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ . On observe également que la mobilité est quasiment indépendante de la température.



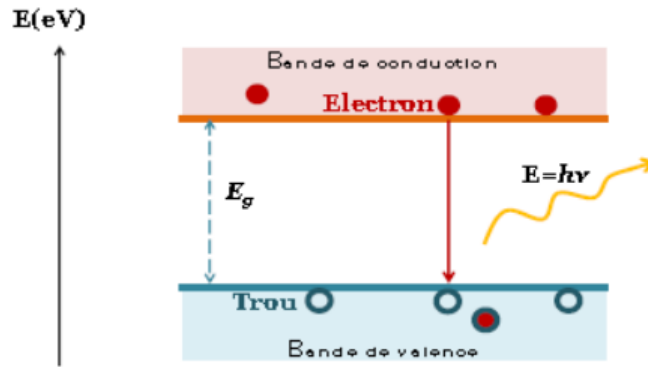
**Fig. 1.6** – Mobilité des porteurs libres dans  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  en fonction de la température [9].

### 1.4.3 Mécanismes de recombinaison

Il existe trois principaux mécanismes de recombinaison des porteurs dans les nitrures III : les recombinaisons radiatives, les recombinaisons Shockley-Read-Hall et les recombinaisons Auger.

#### 1.4.3.1 Recombinaisons radiatives

C'est une transition d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence accompagnée de l'émission d'un photon, voir Figure 1.7. L'énergie du photon émis correspond à l'énergie de gap du matériau.

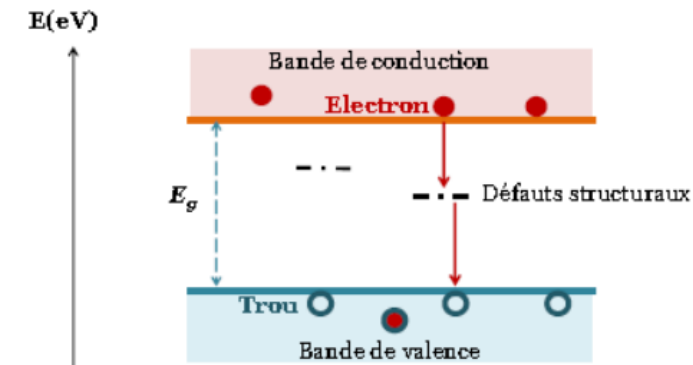


**Fig. 1.7** – Schéma de la recombinaison radiative.

Ce type de recombinaison est fréquent dans les matériaux à gap direct. A noter qu'il est à la base de la photoluminescence et des LEDs [2].

### 1.4.3.2 Recombinaisons Shockley-Read-Hall

Ce processus de recombinaison est indirect (Figure 6). En effet, il se produit par l'intermédiaire de niveaux profonds  $E_t$  situés dans la bande interdite et s'accompagne de vibrations de réseau (émission de phonons).



**Fig. 1.8** – Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).

### 1.4.3.3 Recombinaisons Auger

Dans ce mécanisme un électron se recombine avec un trou de la bande de valence et l'énergie dissipée est gagnée par un troisième porteur. La recombinaison Auger peut être directe ou indirecte (Figure 1.9). La recombinaison Auger indirecte peut se produire lorsque le semi-conducteur est fortement dopé. Ce type de recombinaison est peu probable dans les matériaux à grand gap tels que le GaN ou l'InGaN riche en gallium [2], [18].

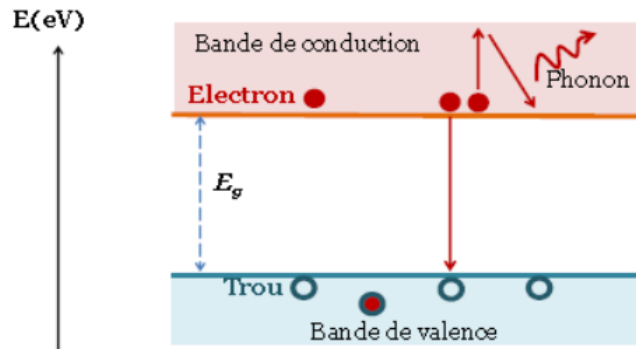


Fig. 1.9 – Mécanisme de recombinaison Auger [2].

### 1.5 Hétéro-épitaxie des nitrures d'éléments III

Les nitrures d'élément III souffrent principalement du manque de substrats massifs ou en accord de maille pour la croissance épitaxiale. Les substrats couramment utilisés sont le saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), le carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ) ou le silicium ( $\text{Si}$ ), tous trois présentant des désaccords de paramètres de réseau importants avec le GaN, respectivement de 16%, 3.5% et 17%. Ce désaccord de paramètre de maille ainsi que les différences entre les coefficients de dilatation thermiques des matériaux, provoquent une très forte contrainte dans la couche mince. Il en résulte souvent une densité importante de défauts qui sont principalement des dislocations fortement préjudiciables aux propriétés électroniques et optiques des composants que l'on développe avec ces matériaux [19].

TABLEAU 1.5 – Caractéristiques physiques des substrats utilisés pour la croissance du GaN [2], [9].

Structure des matériaux	Désaccord de maille avec GaN	paramètre de maille $a$ (300 K)	Conductivité thermique (W/cm K) (300K)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-16 %	4,76	0,25
6H-SiC	-3,4 %	3,08	3,8
Si	-17 %	5,43	1,56

#### 1.5.1 Méthodes de croissances

Trois techniques de croissance sont habituellement utilisées pour l'épitaxie des structures à base d'éléments nitrures [20] :

- l'Épitaxie par Jets Moléculaires (EJM, ou MBE en anglais)
- l'Épitaxie en Phase Vapeur d'Organo-Métalliques (EPVOM, ou MOVPE en anglais)
- l'Épitaxie en Phase Vapeur aux Halogénures (EPVH, ou HVPE en anglais).

Tableau 1.6 – Caractéristiques des techniques de croissance généralement utilisées pour l'épitaxie de structures à base des nitrures III.

	EJM	EPVOM	EPVH
<b>Pression de croissance*</b>	$10^{-5} - 10^{-11}$ Torr	50 – 500 mbar	0.5 – 1 bar
<b>Température du substrat</b>	500 à 900 °C	700 à 1100 °C	900 à 1100 °C
<b>Vitesse de croissance</b>	0,1 - 1 $\mu\text{m/h}$	> 1 $\mu\text{m/h}$	10 - 100 $\mu\text{m/h}$
<b>Précurseurs</b>	NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> , sources solides métallique (Ga, Al, In)	NH <sub>3</sub> , Triméthyl-Ga - Al -In	HCl, NH <sub>3</sub> , bain métallique (Ga, Al)
<b>Remarques</b>	- Contrôle des épaisseurs, des compositions et maîtrise des interfaces. - Contrôle in situ de la croissance.	- Croissance rapide. - Plateau mutli-substrats et substrats grande dimension. - Production industrielle.	- Couches épaisses de substrats - GaN autosupportés. - Production industrielle.

#### 1.5.1.1 L'épitaxie par jets moléculaires (EJM)

Cette technique de croissance sous vide utilise la sublimation ou l'évaporation (sous vide) de produits sources solides ou liquides, III et V, portés à haute température (entre 800°C et 850°C) qui se déposent sur un substrat chauffé. Dans le cas de sources gazeuses, la technique utilisée est appelée la CBE (Chemical Beam Epitaxy) ou MOMBE (Metal-Organic MBE). Les techniques GSMBE (Gas Source MBE) et HSMBE (Hydride Source MBE) ont recours à un élément III sous forme solide et un élément V sous forme gazeuse. Dans ce cas, pour la croissance de GaN, le gallium est chauffé dans un creuset. L'élément N est fourni de deux façons, soit par la décomposition catalytique de l'ammoniac NH<sub>3</sub> (gazeux) soit sous forme atomique fournie par une source plasma d'azote au dessus du substrat. La particularité de la croissance des nitrures est la dissociation des molécules d'azote, très stable, à la surface de l'échantillon. Généralement la chambre de croissance est équipée de RHEED (Reflexion High-Energy Electron Diffraction) in-situ [21].

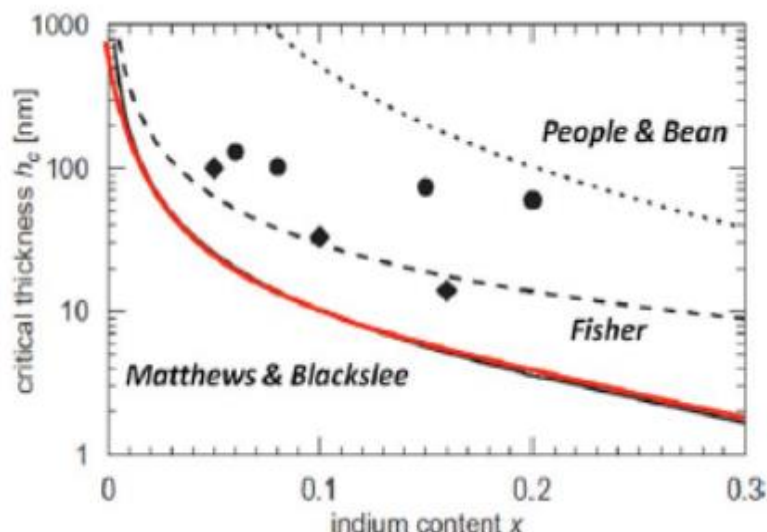
#### 1.5.1.2 L'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (EPVOM)

Cette technique de croissance utilise des composés organo-métalliques pour l'apport des éléments III (Al, Ga, In) tels que le triméthylgallium (TMGa), le triméthylaluminium (TMAI) et le triméthylindium (TMIn). Ces composés organométalliques sont acheminés par un gaz vecteur (hydrogène H ou azote N<sub>2</sub>) et leur pyrolyse en surface de l'échantillon chauffé permet

de libérer l'élément III. L'ammoniac  $\text{NH}_3$  est utilisé comme précurseur d'azote  $\text{N}_2$ . La pression, la température, le rapport V/III ou encore la présence ou non d'hydrogène dans le réacteur auront des conséquences importantes sur le mode de croissance et la qualité des couches épitaxiées. En particulier, le couple pression-température jouera fortement sur les vitesses de croissance latérale et verticale. Cet aspect, moindre en EJM (basses températures et plus faible mobilité des espèces en surface) est très important pour la croissance de GaN à faible densité de dislocations traversantes par la technique ELO (Epitaxial Lateral Over growth) classique [20].

### 1.5.2 Épaisseur critique

Pour un désaccord de maille donné, l'énergie emmagasinée par la couche augmente avec l'épaisseur jusqu'à une épaisseur dite "épaisseur critique" de relaxation plastique à partir de laquelle des dislocations sont générées dans le film. En dessous de cette épaisseur critique, l'alliage épitaxié est déformé élastiquement pour adapter son paramètre de maille  $a$  à celui du substrat. Au-delà de cette épaisseur, le matériau se relaxe en générant des dislocations (zones de libération des contraintes) lui permettant de reprendre partiellement ou totalement ses paramètres de maille nominaux. La figure 1.10 présente les modèles théoriques développés par People et Bean, Fischer et al. et Matthews et Blakeslee ainsi que les modèles expérimentaux de la variation de l'épaisseur critique de relaxation plastique ( $h_c$ ) de l'InGaN sur pseudo substrat GaN en fonction du taux d'indium dans la couche.



**Fig. 1.10** – Épaisseur critique de relaxation plastique calculée à partir des modèles de People et Bean, Fisher et al. et Matthews et Blackslee avec celles obtenues expérimentalement par Parker et al. (●) et Srinivasan et al. (■) [19].

### 1.5.3 Défauts structuraux dans les nitrures

Le manque de substrat en accord de maille pour la croissance des nitrures d'éléments III induit des défauts structuraux qui sont majoritairement des dislocations induites par le désaccord de maille couche/substrat.

#### 1.5.3.1 Dislocations

Une dislocation est définie par un vecteur de Burgers  $\vec{b}$ , ainsi que par un vecteur unitaire  $\vec{u}$  parallèle à la ligne de dislocation. Trois types de dislocations peuvent apparaître lors de l'hétéroépitaxie de nitrures : des dislocations de type  $\vec{a}$  ayant un vecteur de Burgers  $\vec{b}$  parallèle à l'axe  $\vec{a}$  et égal à  $1/3 \langle 11-20 \rangle$ , des dislocations  $\vec{c}$  ayant un vecteur de Burgers parallèle à l'axe  $\vec{c}$  et égal à  $c = \langle 0001 \rangle$ , et les dislocations  $\vec{a} + \vec{c}$  qui, comme leur nom l'indique, ont un vecteur de Burgers selon  $\vec{a} + \vec{c}$ , égal à  $1/3 \langle 11-23 \rangle$ . Les vecteurs de Burgers  $\vec{b}$  des trois types de dislocations sont représentés sur la Figure 1.11 [22].

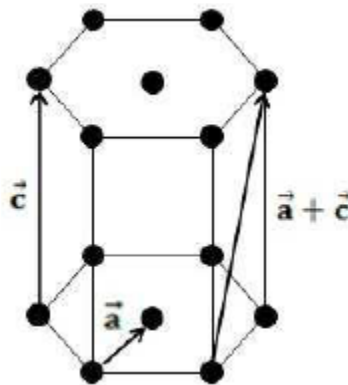


Fig. 1.11 – Vecteurs de Burger des dislocations dans GaN [22].

### 1.6 Dopage

L'élément de base d'une cellule solaire est la jonction PN, c'est une extra position de deux couche de semi-conducteur, l'une de type P et l'autre de type N. Alors que les nitrures sont intrinsèquement de type N, le dopage de type N est relativement facile à obtenir et le dopage de type P est plus compliqué à atteindre.

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

Le dopage de type P reste toujours un défi majeur pour le développement des nitrures. En effet, du fait du caractère intrinsèque de type N des nitrures (InN, GaN et InGaN), il faut dans un premier temps compenser les électrons en excès présents dans le matériau, avant d'arriver à créer un excès de trous. Le dopage P est généralement réalisé avec le magnésium(Mg). Les résultats expérimentaux donnent une valeur limite à l'incorporation du Mg de quelques  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  dans le GaN hexagonal avec une concentration de trous plus faible du fait de la forte énergie d'activation des impuretés Mg. Au-delà, la morphologie est dégradée [2].

## **1.7 Conclusion**

Nous avons parlé dans ce chapitre des propriétés structurales, mécaniques, et électriques des semi-conducteurs GaN, InN, et le matériau ternaire InGaN, puis nous avons présenté les méthodes de croissance de ces matériaux ainsi que les fameux substrats utilisés pour la croissance.

## ***Chapitre 2 : Cellules solaires***



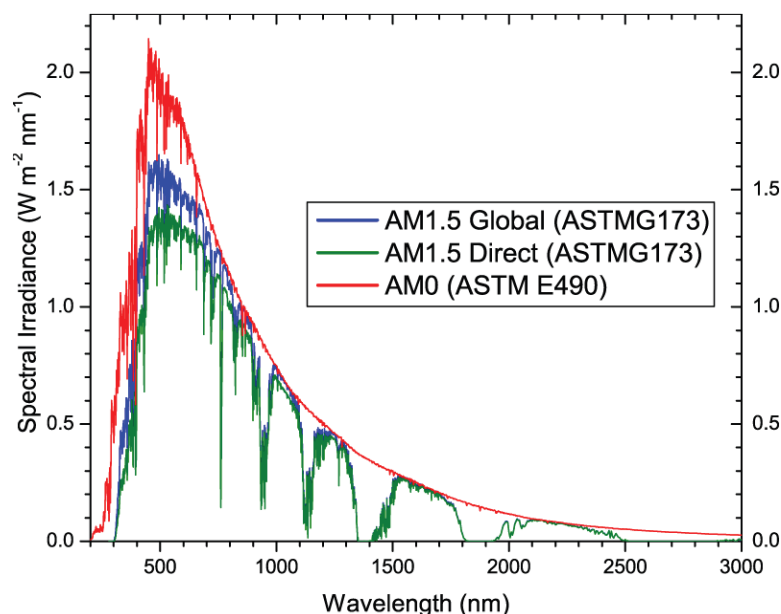
## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire le spectre solaire arrivant sur la Terre, et nous allons présenter le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et définir ses paramètres. Ensuite, nous allons présenter les différentes technologies photovoltaïques actuelles. Enfin, nous allons présenter les cellules solaires à base du matériau InGaN.

## 2.2 Spectre solaire

Le soleil est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes majoritairement comprises entre 0.2  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ . Hors atmosphère le rayonnement émis par le soleil (AM0) est constitué de :9% d'UV ( $0.1 < \lambda < 0.4 \mu\text{m}$ ), 43% de visible ( $0.4 < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$ ), et 48% d'infrarouge ( $0.75 < \lambda < 5 \mu\text{m}$ ).

On représente le rayonnement par un spectre donnant l'irradiance en fonction de la longueur d'onde (figure 2.1). Pour le soleil, ce spectre est comparable à celui d'un corps noir à température d'environ 5800 °K [23].



**Fig. 2.1**– Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.

Source NREL solar spectrum.

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le

rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m<sup>2</sup> du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m<sup>2</sup> (AM1.5).

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m<sup>2</sup>, la Figure 2.1 correspondant à nos latitudes [24].

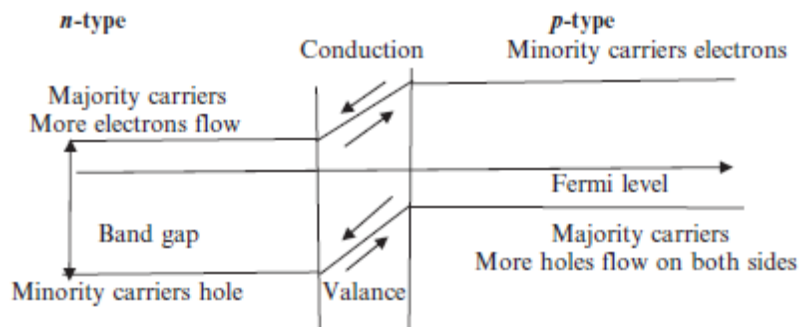
## **2.3 La cellule photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) en énergie électrique continue directement utilisable. Il a été découvert par Antoine Becquerel en 1839 qui mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle. Ce n'est que 115 ans plus tard en 1954 que Chapin et al. des laboratoires *Bell Telephone* ont développé la première cellule solaire au silicium, avec un rendement énergétique de 6 %. Dès lors, de nombreux et rapides progrès ont été réalisés dans ce domaine, notamment motivés par la conquête de l'espace. Cependant pour des raisons techniques et économiques, cette nouvelle source d'énergie a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial et ce n'est qu'au cours des années 1980, que la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel (montres, calculatrices,...) [25].

### **2.3.1 Jonction p-n base de cellule photovoltaïque**

Les cellules solaires sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui présentent des caractéristiques particulières pour convertir l'énergie de la lumière solaire en énergie électrique. La partie principale d'une cellule photovoltaïque est la jonction PN créé par la juxtaposition d'un matériau semi-conducteur de type p avec un autre de type n. Le matériau de type p est un semi-conducteur dopé par des matériaux d'impuretés accepteurs qui augmentent les trous dans la bande de valence (BV), et le matériau de type n est un semi-

conducteur dopé par des matériaux d'impuretés donneurs qui augmentent les électrons dans la bande de conduction (BC). Lorsque ces types de matériaux sont mis en contact, une jonction p-n est formée. La figure 2.2 montre la jonction p-n. Les électrons du matériau de type n s'écoulent dans les trous du matériau de type p. Le matériau de type n se charge positivement et le matériau de type p se charge négativement à proximité de la jonction p-n. Le processus de diffusion des porteurs se poursuit jusqu'à ce que le potentiel de la jonction atteigne l'équilibre, au moment où le flux d'électrons et les trous sont égaux des deux côtés de la jonction [26].



**Fig. 2.2** – Jonction p-n [26].

### 2.3.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge (figure 2.3). Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs. La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite:

- l'absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
  - la collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation)
- [27].

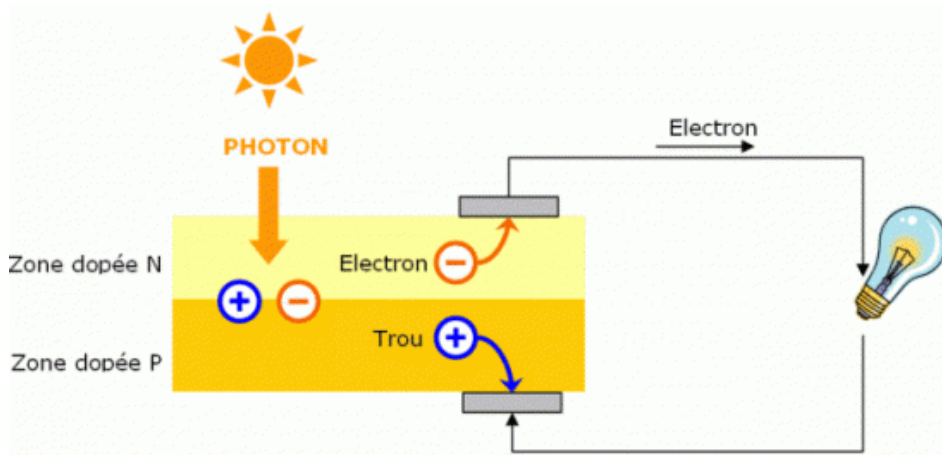


Fig.2.3 – Principe de l’effet photovoltaïque [28].

### 2.3.3 Caractéristique courant-tension et paramètres de la cellule solaire

Dans le cas idéal, la jonction PN soumise à l’éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode, délivrant un courant selon la figure 2.4, qui représente le circuit équivalent d’une cellule solaire idéale. Les équations régissant ce modèle sont:

$$I = -I_S \left[ \exp\left(\frac{qV}{n k T}\right) - 1 \right] + I_{ph} \quad (2.1)$$

$$i = I_S \left[ \exp\left(\frac{qV}{n k T}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

Avec  $I_S$  le courant de saturation de la jonction ;  $K$  la constante de Boltzmann ( $1.381 \cdot 10^{-23}$  Joules/Kelvin) ;  $T$  la température de la jonction en Kelvin ;  $e$  la charge d’un électron ;  $n$  le facteur de non idéalité de la jonction ;  $i$  le courant circulant dans la diode ;  $I$  le courant de sortie et  $V$  la tension de sortie.

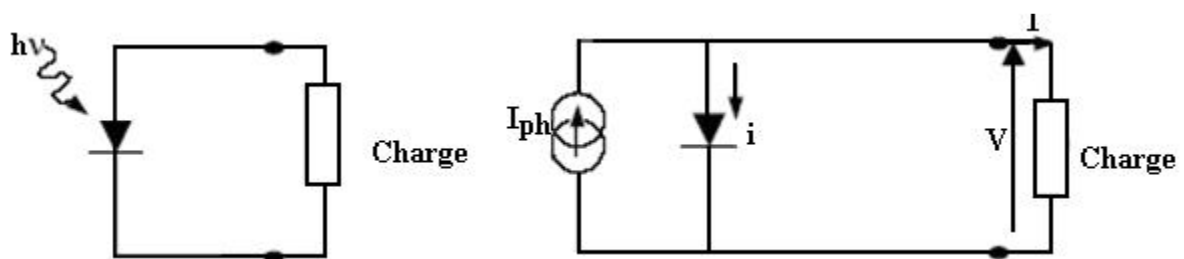
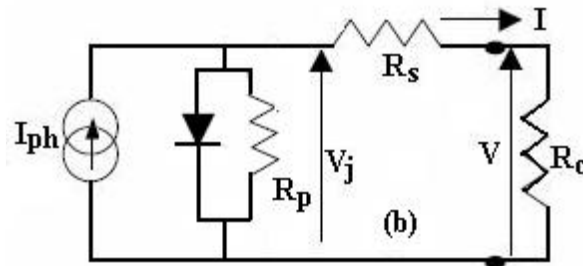


Fig. 2.4 – Circuit équivalent d’une cellule photovoltaïque idéale.

Lorsque les résistances de contacts et les pertes ohmiques ainsi que le courant de fuite qui apparaît à travers la cellule sont prises en compte comme dans le cas réel, nous devons associer au schéma équivalent une résistance série ( $R_S$ ) et une résistance parallèle ou shunt ( $R_P$ ), comme présenté en figure 2.5. Si on note  $V_j$  la tension à travers la jonction, la tension  $V$  à travers la cellule (tension de sortie) est réduite à:  $V = V_j - I \times R_S$



**Fig. 2.5** – Circuit équivalent d’une cellule photovoltaïque réelle.

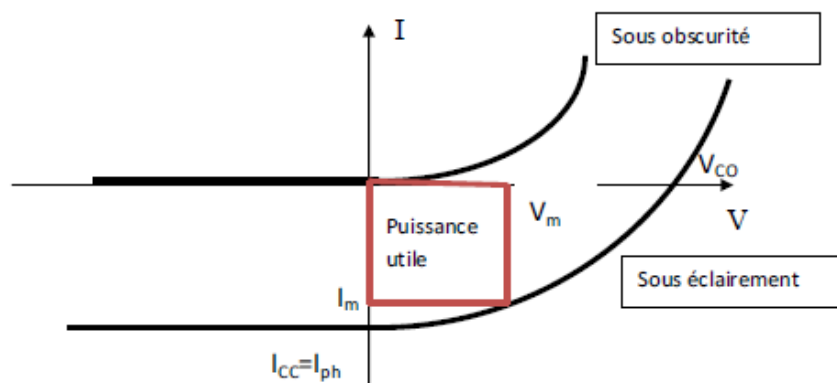
Nous avons finalement:

$$I = I_{ph} - I_S \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_S I)}{n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_S I}{R_p} \quad (2.3)$$

Dans le cas idéal, on a  $R_S = 0$  et  $R_P \rightarrow \infty$  [27].

La performance d’une cellule solaire éclairée est évaluée par des paramètres photovoltaïques, tels que la puissance produite par surface de cellule éclairée ( $P_{out}$ , en  $W.cm^{-2}$ ), la tension à vide ( $V_{CO}$ , en V), la densité de courant de court-circuit ( $I_{CC}$ , en  $mA.cm^{-2}$ ), le facteur de remplissage ( $FF$ ) et le rendement de conversion global ( $\eta$ ). Tous ces paramètres dépendent initialement de la puissance de la lumière incidente sur la cellule ( $P_i$ ) [29].

La technique la plus importante pour caractériser une cellule solaire photovoltaïque est sa caractéristique courant-tension sous éclairement représentée schématiquement sur la figure 2.6. Cette caractéristique sous obscurité est identique à celle d’une diode, sous éclairement, la caractéristique a l’allure présentée sur la figure 2.6.



**Fig. 2.6** – Caractéristiques courant-tension  $I(V)$  d’une cellule solaire.

A partir de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment [30] :

$I_{CC}$ : Densité de courant de court-circuit ( $mA.cm^{-2}$ )

$V_{CO}$ : Tension de circuit ouvert (V)

$I_m$ : Courant au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque.

$V_m$ : Tension au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque.

$FF$ : Facteur de forme (%)

$\eta$ : Rendement de conversion (%)

Sachant que :

Le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) est le courant maximum que la cellule PV peut fournir à un certain éclairage sans la présence d'une charge ( $V = 0$ ) [9].

La tension de circuit ouvert est définie à  $I = 0$ , ce qui signifie que les courants s'annulent et qu'aucun courant ne circule dans la cellule. L'expression résultante est donnée par [29] :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{CC}}{I_S} + 1 \right) \quad (2.4)$$

On appelle rendement de conversion  $\eta$  le rapport de la puissance fournie par la cellule ( $P_m = V_m \times I_m$ ) sur la puissance incidente. Il s'exprime par [23] :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i} = \frac{FF V_{CO} I_{CC}}{P_i} \quad (2.5)$$

Le facteur de remplissage (FF) d'un dispositif PV est un paramètre important qui caractérise la performance de la cellule par rapport à celle d'une diode idéale. Son expression est donnée par la relation (2.6) [31].

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{CO} I_{CC}} \quad (2.6)$$

#### 2.3.4 Rendement quantique

On définit le rendement quantique d'une cellule solaire comme le rapport du nombre d'électrons dans le circuit externe produit par un photon incident d'une longueur d'onde donnée. On peut donc définir des rendements quantiques externe et interne (désignés respectivement par  $EQE(\lambda)$  et  $IQE(\lambda)$ ). Elles diffèrent dans le traitement des photons réfléchis par la cellule : tous les photons qui frappent la surface de la cellule sont pris en compte dans la valeur de l' $EQE$ , mais seuls les photons qui ne sont pas réfléchis sont pris en compte dans la valeur de l' $IQE$ .

$$EQE = \frac{nb \text{ de porteurs collectés}}{nb \text{ de photons incidents}} ; IQE = \frac{EQE}{1 - R} \quad (2.7)$$

Si l'efficacité quantique interne est connue ; le courant photo généré total est donné par

$$I_{ph} = q \int (\lambda)\{1 - R(\lambda)\}IQE(\lambda)d\lambda \quad (2.8)$$

Où  $\Phi(\lambda)$  est le flux de photons incident sur la cellule à la longueur d'onde  $\lambda$ ,  $R(\lambda)$  est le coefficient de réflexion à partir de la surface supérieure, et l'intégration est effectuée sur toute la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière absorbée par la cellule solaire. Les valeurs de l'IQE et de l'EQE sont régulièrement mesurées pour évaluer la performance d'une cellule solaire en utilisant des filtres d'interférence ou des monochromateurs.

Expérimentalement, pour calculer le rendement quantique d'une cellule, on mesure la réponse spectrale de la cellule.

La réponse spectrale (désignée par  $SR(\lambda)$ , avec les unités A/W) est définie comme le rapport entre le photocourant généré par une cellule solaire sous éclairage monochromatique d'une longueur d'onde donnée et la valeur de l'irradiance spectrale à la même longueur d'onde. Comme le nombre de photons et l'irradiance sont liés, la réponse spectrale peut s'écrire en termes d'efficacité quantique comme :

$$SR = \frac{I(\lambda)}{P_{incidente}} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda)S_{surface}} \quad (2.9)$$

Où  $\lambda$  est en micromètres. La réponse spectrale dans l'équation  $SR(\lambda)$  peut être interne ou externe, selon la valeur utilisée pour l'efficacité quantique. Le rendement quantique et réponse spectrale sont liés par la relation [32] :

$$SR = \frac{q\lambda}{hc}EQE \quad (2.10)$$

## 2.4 Les différentes technologies photovoltaïques existantes

Aujourd'hui, 94% du marché PV est basé sur le silicium (Si), qui a un rendement maximal en laboratoire de 26,7%. Ce rendement est très proche de la limite théorique maximale de rendement pour une jonction simple. C'est-à-dire qu'afin de dépasser ce rendement, une jonction tandem est nécessaire. De nos jours, les rendements record au niveau laboratoire sont obtenus avec des multi-jonctions à base de matériaux III-V, comme montre dans la Figure 2.7. Malgré leurs bonnes performances, ces matériaux ont un coût de production élevé par rapport au Si [33].

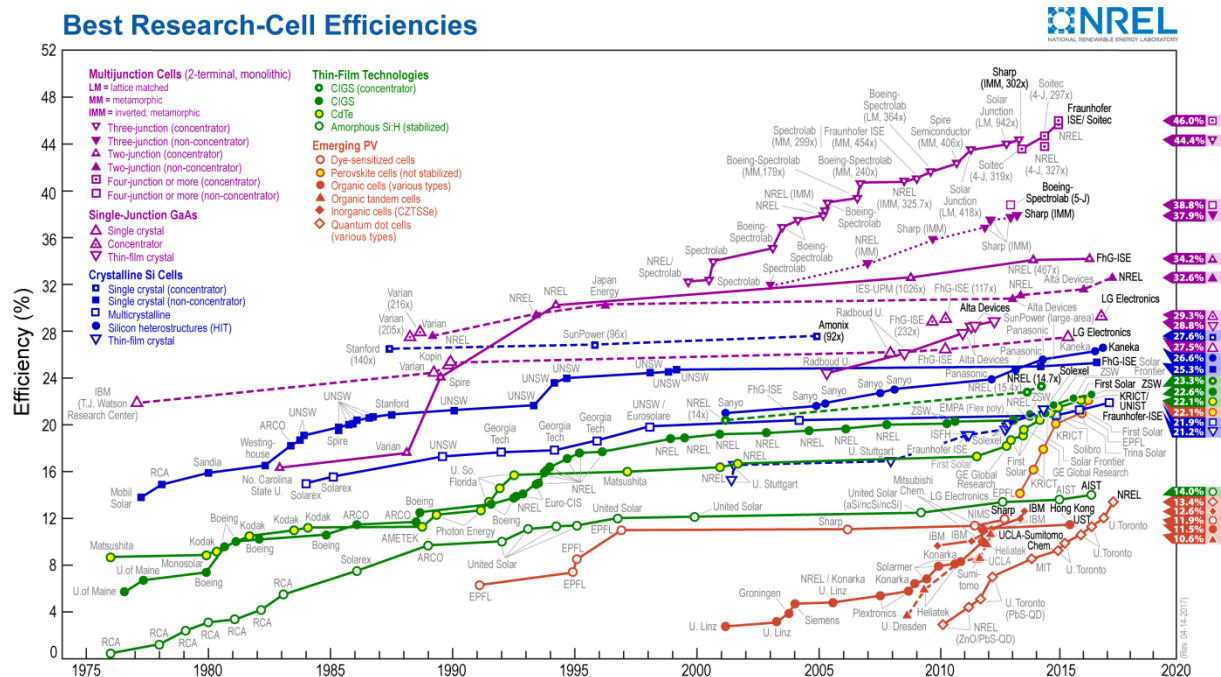


Fig. 2.7 – Rendement historique des cellules photovoltaïques lors des essais en laboratoire [34].

## 2.4.1 Les cellules solaires de la première génération

Ce genre de cellule se caractérise par une seule jonction p-n à base de silicium sous forme cristalline constituée généralement d'un substrat en silicium massif réalisé par la technique du tirage et découpage basée sur les wafers de silicium, une technique simple, mais trop coûteuse en plus elle exige un silicium de grande pureté. La première cellule solaire a été réalisée en 1954 par les laboratoires Bell a donné un rendement de 6% qui a été amélioré à 10% par la suite [35].

### 2.4.1.1 La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Le silicium monocristallin (mono-Si), est un matériau composé d'un seul cristal parfaitement homogène. Les cellules solaires issues de ce silicium ont une couleur caractéristique qui est généralement gris-noir métallique.

Les avantages de cette technologie sont : une production des panneaux solaires presque optimale. Les cellules monocristallines offrent les meilleurs rendements (16 à 25 %). Les panneaux solaires à base de silicium monocristallin présentent une bonne durée de vie (30 ans).

Les inconvénients sont : un coût de production élevé, les panneaux sont donc chers à la vente, un rendement plus faible sous un faible éclaircissement et une baisse du rendement quand la température augmente; par conséquent une production faible dans les régions chaudes [2].



### **2.4.1.2 La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin**

Ce matériau est constitué de plusieurs cristaux de petites tailles (grains) ayant des orientations cristallographiques différentes. Les joints de grains introduisent des limites entravant le flux d'électrons et les incitent à se recombinaison avec les trous plutôt que de contribuer au courant électrique réduisant ainsi la puissance de sortie de la cellule. Ainsi, le rendement des cellules PV à base de silicium polycristallin disponibles sur le marché varie de 10% à 14%. Au niveau de la recherche, un rendement de 20.4% a été rapporté par (FhG-ISE) [19].

### **2.4.2 Les cellules solaires de la deuxième génération**

Les cellules solaires de la deuxième génération représentent les cellules solaires à base de couche mince ou thin film en anglais ayant une épaisseur inférieure à 5  $\mu\text{m}$ , ce type de cellule succédait les cellules à base de silicium cristallin ayant comme principal objectif la réduction des coûts de fabrication, l'apparition de cette génération de cellule revient à la fin des années quatre-vingts à cause du besoin crucial de l'énergie. La réalisation de ces cellules se fait par des procédés de dépôt sous vide peu coûteux et qui offrent l'avantage d'utiliser d'autre support que le silicium tel que le verre ou le polymère et qui nécessitent seulement quelques micromètres de silicium. Effectivement, cette technologie de couche mince a permis d'obtenir des meilleurs rendements [35].

#### **2.4.2.1 Cellules solaires à base de Silicium amorphe**

Les cellules solaires au silicium amorphe (a-Si) sont obtenues à partir d'un dépôt de silicium. Ce dernier peut être déposé sur différents substrats comme du plastique, du verre ou encore sur du métal. Les cellules solaires présentent une couleur grise.

Elles ont comme avantage un procédé de fabrication moins coûteux car il est réalisé à basse température et utilise moins de matériau que le silicium cristallin. En effet a-Si possède un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé que le silicium cristallin. C'est ce qui permet d'avoir des cellules avec des couches de l'ordre du micron d'épaisseur et qui permet de réduire significativement les coûts de production. C'est une technologie très utilisée pour alimenter des petits objets du quotidien comme des calculatrices ou des montres solaires. Elles ont aussi l'avantage de fonctionner à faible luminosité et peuvent donc produire du courant même à l'intérieur d'une habitation

Elles présentent comme inconvénient un rendement de conversion faible (environ 13%) par rapport aux autres technologies et une faible durée de vie des panneaux solaires. [2].

#### **2.4.2.2 Cellules solaires à base de l'arséniure de gallium (GaAs)**

Le GaAs est un matériau particulièrement adapté pour les applications PV puisqu'il possède un gap de 1,43 eV, une grande mobilité des porteurs de charge (quatre fois supérieure au c-Si) ainsi que la possibilité de réaliser des alliages ternaires à base d'aluminium, de phosphore, d'antimoine, ou d'indium permettant plus grande souplesse dans la conception des cellules.

Les cellules à base de GaAs possèdent un rendement record de 29,1% obtenu sous concentrateur (x117 soleils) par l'Institut pour les systèmes à énergie solaire de Fraunhofer (FhGISE). Ces cellules solaires trouvent des applications dans des domaines très spécifiques comme le spatial. Au niveau terrestre, dû à leur coût de fabrication élevé, les cellules GaAs sont principalement utilisées dans les systèmes à concentrateurs où le coût élevé des cellules est en partie compensé par le faible coût des concentrateurs.

#### **2.4.2.3 cellules solaires à base de tellure de cadmium (CdTe)**

Le CdTe possède une bande interdite presque idéale (1,44 eV) ainsi qu'un coefficient d'absorption très élevée. Actuellement, la part du marché du tellure de cadmium est d'environ 1%. Le seul frein à l'utilisation de ce matériau réside dans la toxicité du CdTe. Les cellules solaires à base de CdTe ont une efficacité de 10% à 12% pour une production à faible coût [19].

#### **2.4.3 Les cellules solaires de la troisième génération**

Cette troisième génération de cellule solaire est encore au stade de la recherche. Cependant, leur développement est très actif et motivé par les applications spatiales vu qu'elles visent principalement à obtenir le plus haut rendement jamais obtenu auparavant, mais en plus à minimiser les inconvénients et les obstacles rencontrés dans les générations précédentes telles que coût de fabrication très élevé, la disponibilité des matériaux ou bien leurs toxicités. Ce genre de cellule aux perspectives très prometteuses offre bel et bien la possibilité de répondre à ces problématiques dans un avenir proche.

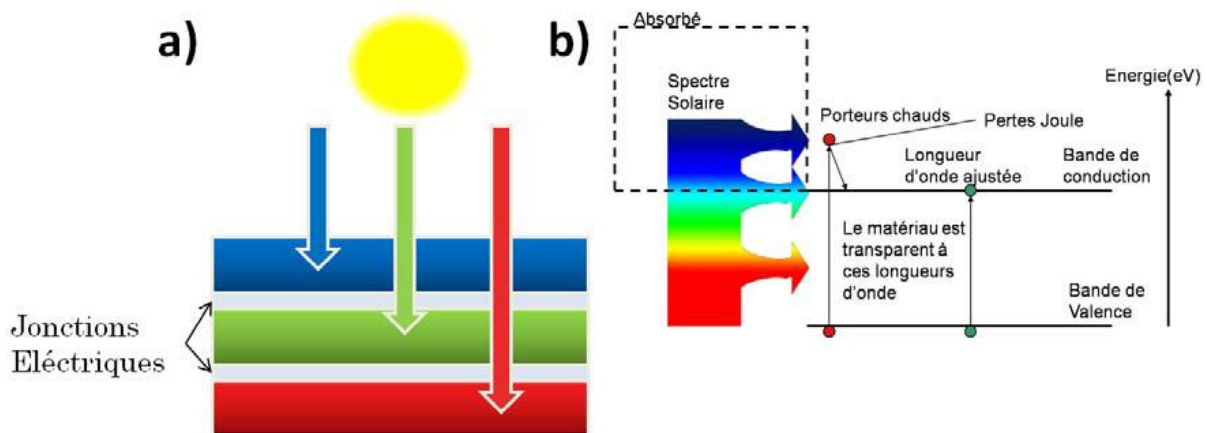
Afin d'atteindre ce but, les chercheurs ont proposé plusieurs concepts pour la réalisation de la cellule du futur dont on trouve les cellules multi-jonctions, les cellules à concentration, les cellules nanocristallines à colorant et les cellules organiques [35].

##### **2.4.3.1 Filière multi-jonctions à base des matériaux III-V**

La technologie des cellules multi-jonctions qui consiste à empiler des matériaux de gap différents permet d'élargir la gamme absorbée du spectre solaire et ainsi d'améliorer le rendement.

La figure 2.8 présente le cas d'une cellule triple jonction connectées en série grâce à des jonctions tunnel :

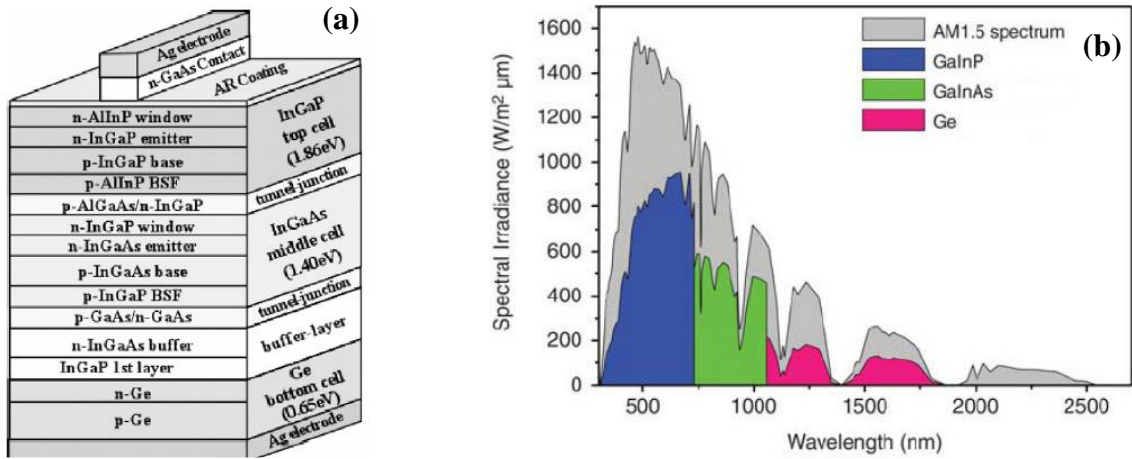
- cellule supérieure optimisée pour absorbée les faibles longueurs d'onde,
- cellule intermédiaire possédant un gap dans le visible ou le proche infrarouge,
- cellule inférieure optimisée pour les grandes longueurs d'ondes (petites énergies).



**Fig.2.8** – a) Fonctionnement des cellules multi-jonctions et b) absorption dans la cellule en fonction de la longueur d'onde.

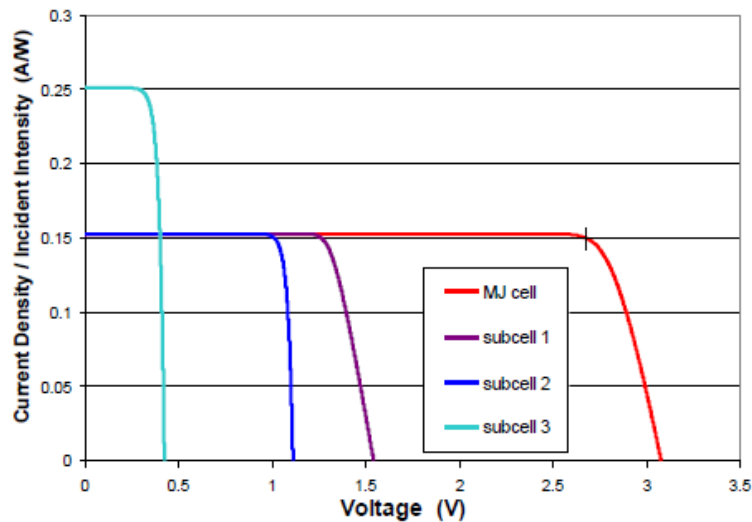
#### 2.4.3.1.1 Structure multi-jonction à base d' InGaP/InGaAs/Ge

La figure 2.9 (a) présente la structure d'une cellule triple jonction InGaP/InGaAs/Ge qui présente l'intérêt de pouvoir couvrir la quasi-totalité du spectre solaire (Figure 2.9 (b)). Cette structure présente un rendement record de 43,5% sous concentrateur. Les caractéristiques courant-tension d'une telle cellule et de chaque sous-cellule sont reportées sur la figure 2.10. La cellule qui a le plus petit gap, ici Ge (cellule 3), possède la plus grande densité de courant. En effet, du fait de son faible gap, la plupart des photons arrivant sur la cellule 3 ont une énergie égale ou supérieure à son gap produisant une forte densité de courant. Lorsque le gap augmente, la tension augmente également, mais de moins en moins de photons ont une énergie suffisante pour être absorbés, réduisant la densité de courant de la cellule [19].



**Fig. 2.9** – (a) Schéma d’une cellule triple-jonctions. Les cellules sont connectées entre elles par les jonctions tunnel. La couche tampon entre Ge et InGaAs sert à adapter leur paramètre de maille. (b) Le spectre solaire AM1.5 et les parties du spectre qui peuvent être utilisée en théorie par les cellules solaires  $Ga_{0,35} In_{0,65}P/Ga_{0,83} In_{0,17}As/Ge$  [19].

Pour la cellule  $GaInP/GaInAs/Ge$ , les alliages des cellules ; 1 et 2 ont des caractéristiques très proches et donc une densité de courant quasi-identique. Par ailleurs, les cellules étant connectées en série, la densité de courant de court-circuit, ( $J_{CC}$ ), correspond à la plus faible densité de courants sortant des sous-cellules et, la tension de circuit ouvert, ( $V_{CO}$ ), est la somme des  $V_{CO}$  des sous-cellules.



**Fig.2.10** – Caractéristiques courant-tension sous illumination de chaque sous-cellule et de la cellule triple jonctions  $GaInP(\text{cellule1})/GaInAs(\text{cellule2})/Ge(\text{cellule3})$  complète [19].

## 2.5 Cellule photovoltaïque à base d’InGaN

Les cellules photovoltaïques en simple et multi-jonctions à base des composés de matériaux III-V présentent les plus hauts rendements. L’alliage InGaN, faisant également partie de cette

catégorie de matériaux, possède aussi un fort potentiel pour des cellules solaires à haut rendement. L'avantage principal de cet alliage est son gap modulable sur quasiment tout le spectre solaire. Il reste cependant encore de nombreux problèmes technologiques à résoudre. Dans la suite, nous faisons un état de l'art des cellules solaires basées sur InGaN [9].

### 2.5.1 Cellules solaires homojonction à base d'InGaN

Les cellules solaires à haute efficacité basées sur InGaN ne peuvent être réalisées qu'en exploitant des couches InGaN incorporant des contenus en indium supérieurs à 0,15. En raison de l'écart important entre l'InGaN avec  $x > 0,15$  et le GaN, les études primaires étaient principalement basées sur l'homojonction p-InGaN/n-InGaN et p-InGaN/i-InGaN/n-InGaN des cellules solaires, qui sont résumées dans le tableau 2.1 [36].

Tableau 2.1 – Etat de l'art de cellules solaires homo-jonctions à base d'InGaN [36].

Structure /Méthode de croissance	Composition d'indium/ Substrat	Performance / Excitation
<b>p-n InGaN / (MOCVD)</b>	0,18 / saphir (0001)	$V_{CO} = 0,43V$ , $J_{CC} = 0,04 \text{ mA/cm}^2$ (éclairage de 360 nm)
<b>p-n InGaN / (MOCVD)</b>	0,28 / saphir (0001)	$V_{OC} = 2,13V$ (UV)
<b>p-i-n InGaN / (MBE)</b>	0.03 / saphir (0001)	$V_{CO} = 2,5V$ , $J_{CC} = 0,04 \text{ mA/cm}^2$ (laser 325 nm, 200 mW/cm <sup>2</sup> )
<b>p-i-n InGa / (MBE)</b>	0,13 / saphir (0001)	$V_{CO} = 0.78V$ , $J_{CC} = 1.99 \text{ mA/cm}^2$ (3 soleils AM0)
<b>p-n InGaN / (MOCVD)</b>	0,12 / saphir (0001)	$V_{CO} = 1.5-2V$ , $J_{CC} = 0.04 \text{ mA/cm}^2$ (1 soleil AM15G)
<b>p-n InGaN / (MOCVD)</b>	0,02-0,1 / saphir (0001)	$V_{CO} = 2.24-0.96 \text{ V}$ , $J_{CC} = 1.4-1,87 \text{ mA/cm}^2$ (éclairage de la lampe Xe)
<b>p-n InGaN / (MOCVD)</b>	0,148-0,168 / saphir (0001)	$V_{CO} = 1.73V$ , $J_{CC} = 0.91 \text{ mA/cm}^2$ (AM0)
<b>p-i-n InGaN / (MBE)</b>	0,14-0,54 / saphir (0001)	$V_{CO} = 1.8-0.02V$ , $J_{CC} = 1-2.2 \text{ mA/cm}^2$ (AM0)
<b>p-n InGaN / (MOCVD)</b>	0,12 -0,15 / saphir (0001)	$\eta = 0.32-0.26\%$ (AM1.5, 100mW/cm <sup>2</sup> )

### 2.5.2 Cellules solaires hétérojonction à base d'InGaN

Les cellules solaires à hétérojonction basées sur les nitrures III, p-GaN/InGaN/n-GaN, ont fait l'objet d'études approfondies et la plupart des progrès notables et des résultats prometteurs ont

été réalisés dans ce type de cellules solaires. Le développement de cellules solaires à base d'InGaN dont la couche active est pris en sandwich entre des couches de p-GaN et de n-GaN, a principalement bénéficié de la croissance et de la fabrication de la technologie LED basée sur InGaN. Le tableau 2.2 résume l'état de l'art des cellules solaires hétérojonction à base d'InGaN [36].

Tableau 2.2 – Etat de l'art de cellules solaires hétérojonctions à base d'InGaN [36].

<b>Structure /méthode de croissance</b>	<b>Composition d'indium/ Epaisseur</b>	<b>Performance / Excitation</b>
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.12 / (200nm)	$V_{CO}=1,81V$ , $J_{CC}=4,2 \text{ mA/cm}^2$ (UV)
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.3 / (24 nm)	$V_{CO}=2V$ , $J_{CC}=1,5 \text{ mA/cm}^2$ (éclairage en lumière blanche)
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.35 / (36 nm)	$\eta=2.95\%$ (AM1.5G, 100 mW/cm <sup>2</sup> )
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.1 / (250 nm)	$\eta=1.41 \%$ (1.5 soleil AM1.5G)
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.15 / (90 nm)	$\eta=1.6\%$ (AM1.5G, 155 mW/cm <sup>2</sup> )
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.12 / (0001) saphir	$EQE = 72\%$ (1 soleil AM1.5)
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.11 / (200nm)	$\eta=0.51\%$ (AM1.5G)
<b>p-i-n InGaN / (MBE)</b>	0.11 / (90nm)	$V_{CO}=1.75V$ , $J_{CC}=1.11\text{mA/cm}^2$ (1 soleil AM0)
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.108 / (200 nm)	$\eta=1.2\%$ (1 soleil AM1.5G)
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.2 / (69 nm)	$\eta=2.4\%$ (1 soleil AM1.5)
<b>p-i-n InGaN / (MOCVD)</b>	0.19 / (30nm)	$\eta=2.0\%$ (1 soleil AM1.5G)

## 2.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons fait une étude détaillée sur les cellules photovoltaïques et ses paramètres, puis nous avons cité les différentes filières photovoltaïque existantes et en fin, nous avons donné un récapitulatif des structures de cellules solaires à base d'InGaN étudiées.

***Chapitre 3 : Simulation d'une  
cellule solaire à  
hétérojonction GaN/InGaN.***

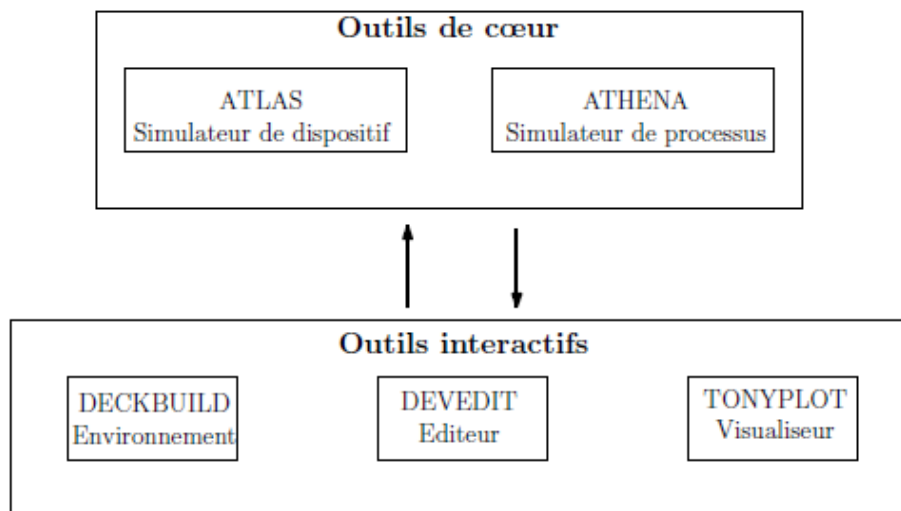
### 3.1 Introduction

La simulation numérique est largement utilisée dans le domaine photovoltaïque pour déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule dans le but d'obtenir un rendement maximum. Dans ce travail nous avons utilisé le simulateur de dispositif ATLAS qui permet de prévoir les comportements électriques et optiques des cellules solaires.

### 3.2 Logiciel de simulation SILVACO

SILVACO-TCAD (en anglais : Technology Computer Aided Design) est un logiciel de simulation 2D/3D basé sur la méthode des éléments finis. SILVACO TCAD peut modéliser les comportements électriques, optiques et thermiques des dispositifs, aussi des processus comme le dépôt, la gravure, et le dopage par implantation ou diffusion. En conséquence, ces simulations permettent d'optimiser les différents paramètres de fabrication et de prévoir le comportement des dispositifs semi-conducteurs, notamment les cellules solaires.

SILVACO TCAD possède en effet des outils qui lui permettent de réaliser toutes ses tâches. Ces outils peuvent être divisés en deux catégories : outils de cœur et outils interactifs.



**Fig. 3.1** – Outils de SILVACO TCAD.

#### 3.2.1 Outils de cœur

Ce sont les simulateurs qui réalisent les fonctions pour lesquelles ils sont destinés. Par exemple, ATLAS est un simulateur de dispositif, et ATHENA est un simulateur de processus.



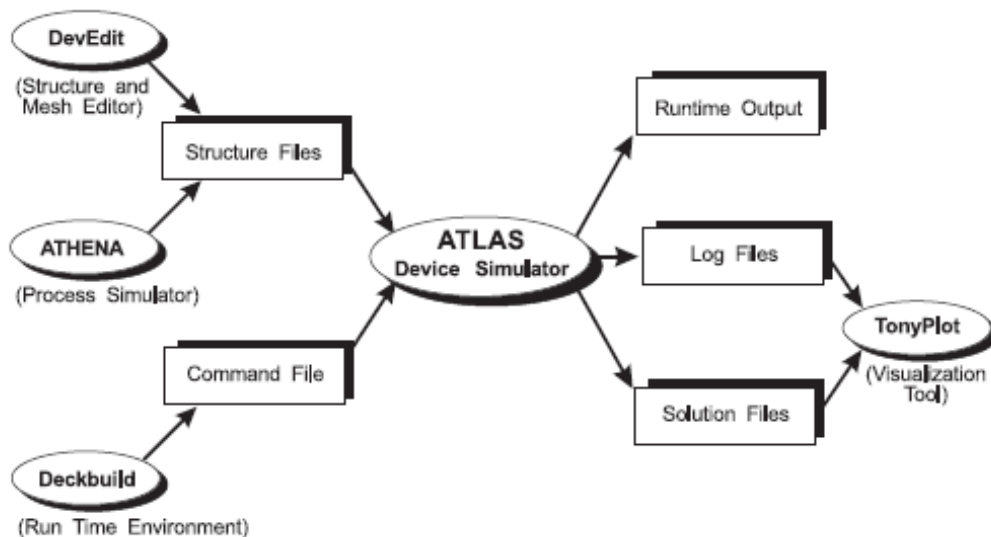
### 3.2.2 Outils interactifs

Ce sont des outils qui nous permettent de communiquer avec les simulateurs et de visualiser les résultats obtenus. Nous citons, entre autre, DECKBUILD, DEVEDIT et TONYPLOT.

DECKBUILD est un environnement interactif qui permet d'écrire les commandes à exécuter et de visualiser l'exécution du code en temps réel. DEVEDIT est un éditeur graphique qui permet de construire ou modifier la structure d'un dispositif. TONYPLOT est un outil qui permet de visualiser en 2D ou 3D les structures réalisées ainsi que leurs comportements électriques, optiques et électroniques. Il permet aussi de tracer différentes courbes des résultats, comme la courbe  $J(V)$  ou EQE, et d'appliquer certaines opérations sur ces courbes.

### 3.2.3 SILVACO-ATLAS

ATLAS est un simulateur qui mène des analyses DC, AC et transitoires pour les dispositifs à base de différents matériaux.



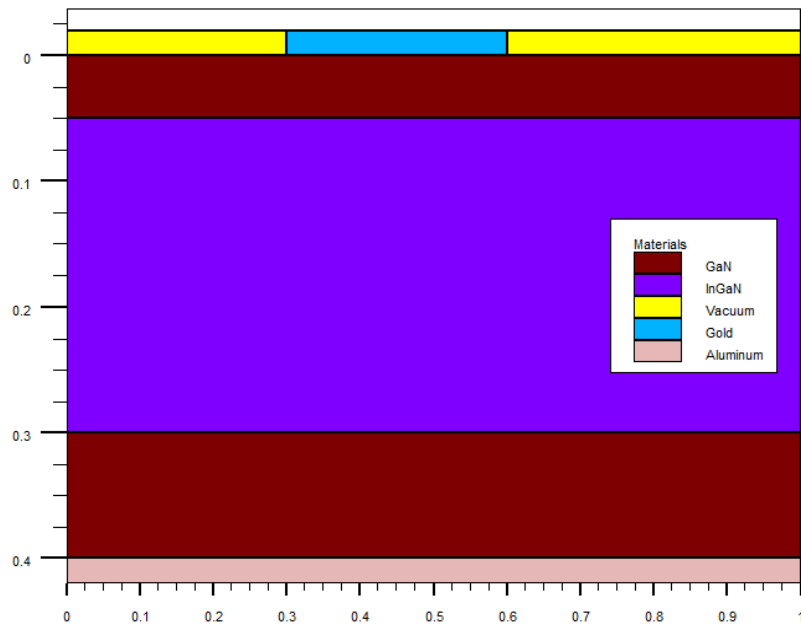
**Fig. 3.2** – Entrées et sorties d'ATLAS.

La construction du modèle avec ATLAS se fait en plusieurs étapes principales tel que la définition de la structure physique, la définition des matériaux, définition des modèles physiques, la définition de la méthode numérique, la définition des conditions électriques et optiques, et la détermination des sorties [33].

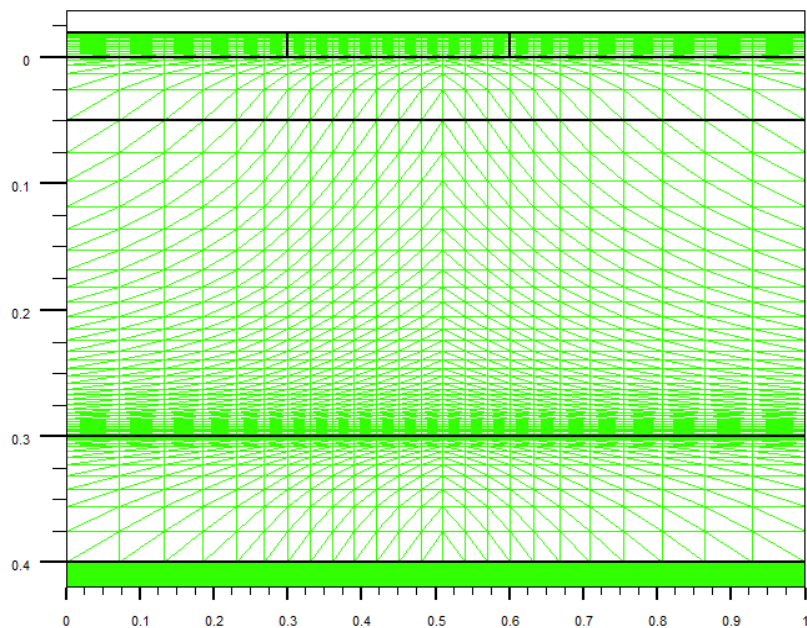
### 3.3 Résultats de simulation

La structure de la cellule solaire simulée dans ce travail est de type p-i-n à base d'InGaN/GaN avec une concentration d'indium égale à 0.53. La figure 3.3 représente la structure de la cellule, l'épaisseur de la couche p-GaN est fixée à 50 nm, l'épaisseur de la couche i-

$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{N}$  est fixée à 250 nm, et l'épaisseur de la couche n-GaN est fixée à 100 nm. Les couches, p-GaN, i- $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{N}$  et n-GaN ont des concentrations de dopage égaux à  $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  respectivement. Un maillage non uniforme est utilisé. Le maillage est plus intense en haut et en bas de la structure pour obtenir une bonne résolution, et il est plus large au milieu de la structure afin de raccourcir le temps de calcul (figure 3.4). Les contacts utilisés sont de type ohmique. Les électrodes sont situées en haut et en bas de la structure.

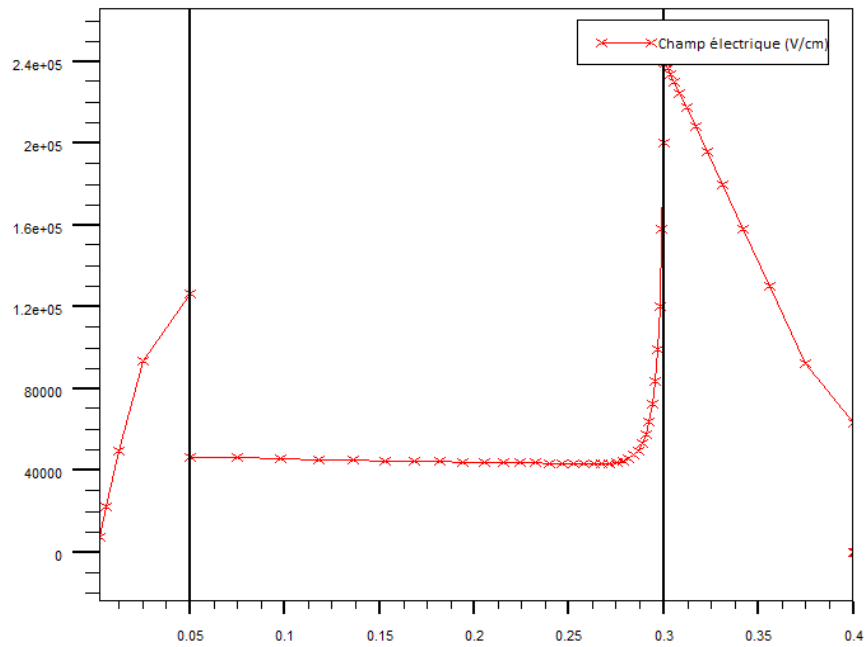


**Fig. 3.3** – Structure de la cellule solaire.

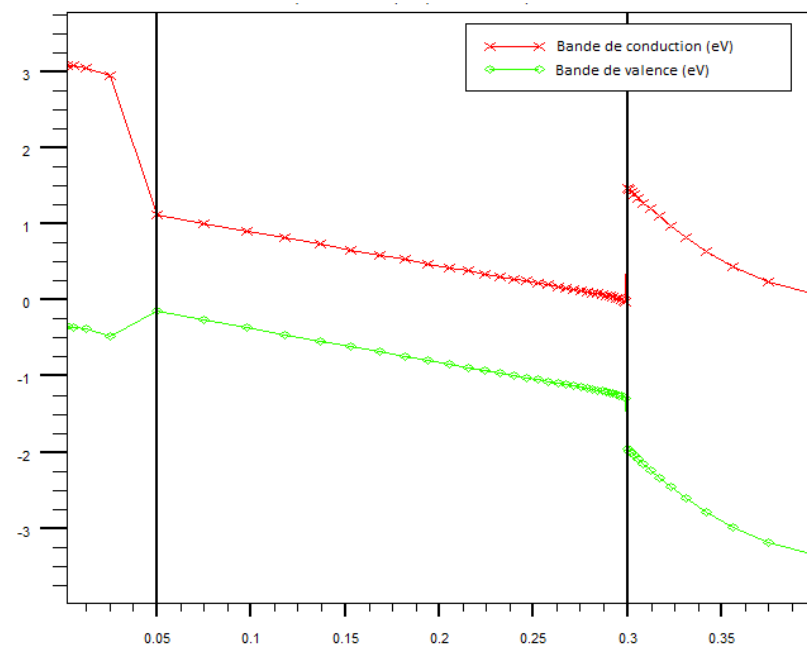


**Fig. 3.4** – Maillage de la structure de la cellule.

Le champ électrique à travers la structure est illustré dans la figure 3.5. Le champ électrique est égal à  $1,3 \cdot 10^5$  V/cm à l'interface p-GaN/i-In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>N, et à 40 000 V/cm dans la couche i-In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>N. Il atteint un maximum d'environ  $2,4 \cdot 10^5$  V/cm à l'interface i-In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>N/n-GaN. La figure 3.6 présente le diagramme de bande de la cellule solaire.

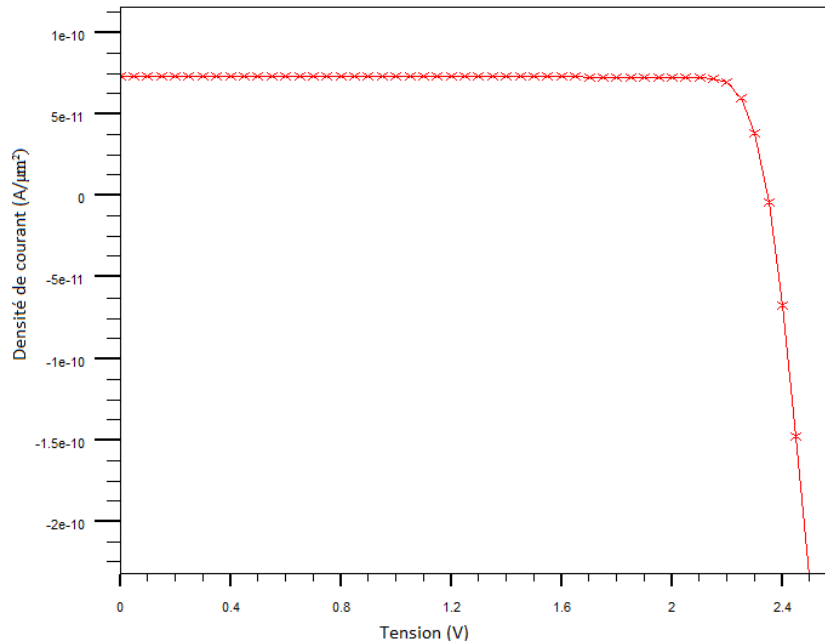


**Fig. 3.5** – Champ électrique à travers la structure.



**Fig. 3.6** – Diagramme de bandes de la cellule solaire.

La figure 3.7 montre la caractéristique J-V de la cellule solaire simulée. On obtient un courant de court-circuit de 7,31 mA/cm<sup>2</sup> et une tension de circuit ouvert de 2,34 V ; tous les résultats sont donnés par le tableau 3. Le rendement atteint est proche de celui obtenu par V.Gorge et al. [37].



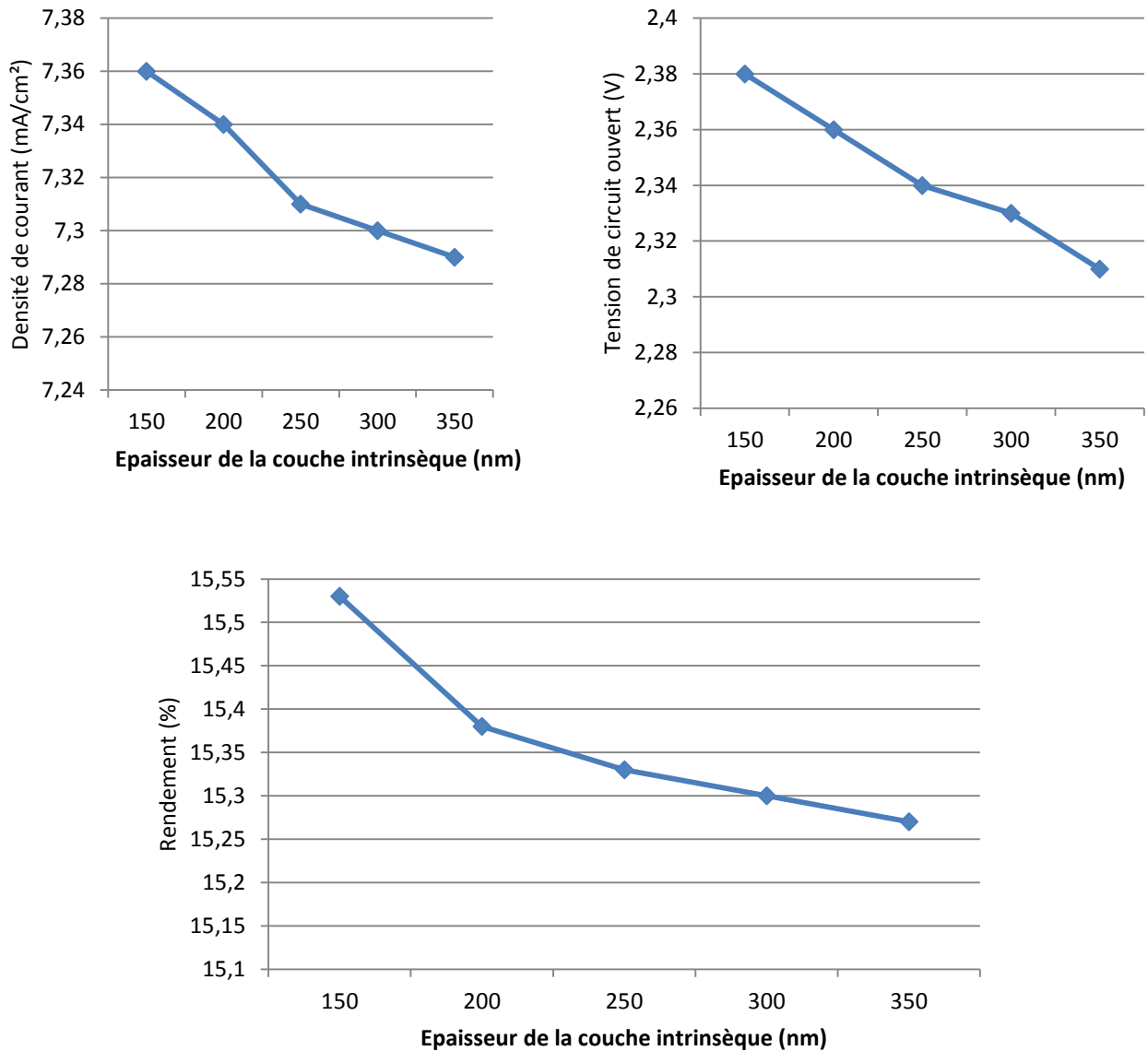
**Fig. 3.7** – Caractéristique J-V de la cellule solaire.

Tableau 3.1 – Résultats de simulation.

<b>X</b>	<b>Jsc (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Voc (V)</b>	<b>η (%)</b>
<b>0.53</b>	7.31	2.34	15.33

### 3.3.1 Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque

Dans la deuxième partie, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la couche active (couche intrinsèque) sur le rendement de conversion, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert de la cellule solaire. Les résultats obtenus montrent qu'en augmentant l'épaisseur de la couche intrinsèque le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le rendement de conversion diminuent. Les meilleures valeurs sont obtenues pour une épaisseur égale à 150 nm. La figure 3.8 présente les résultats de simulation.



**Fig. 3.8** – Variation de la tension de circuit ouvert, le courant de court circuit et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

### 3.3.2 Effet de la couche antireflet

L'utilisation d'une couche antireflet dans le processus de fabrication d'une cellule solaire est un élément important pour optimiser le rendement de la cellule photovoltaïque, la couche antireflet sert à minimiser la réflexion de la lumière. Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de la couche antireflet sur les paramètres de la cellule solaire ; nous avons utilisé une couche antireflet de SiO<sub>2</sub> d'épaisseur égale à 10 nm. Les résultats sont donnés par le tableau 3.2, et la caractéristique J-V de la cellule solaire avec et sans couche antireflet est représentée dans la figure 3.9. Les résultats montrent qu'il y a une amélioration du rendement de

conversion et du courant de court-circuit ; la tension de circuit ouvert reste presque inchangeable.

Tableau 3.2 – Influence de la couche antireflet sur les paramètres de la cellule solaire.

	<b>J<sub>cc</sub> (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>V<sub>co</sub> (V)</b>	<b>η (%)</b>
<b>Sans CAR</b>	7.31	2.34	15.33
<b>Avec CAR</b>	8.04	2.35	16.90

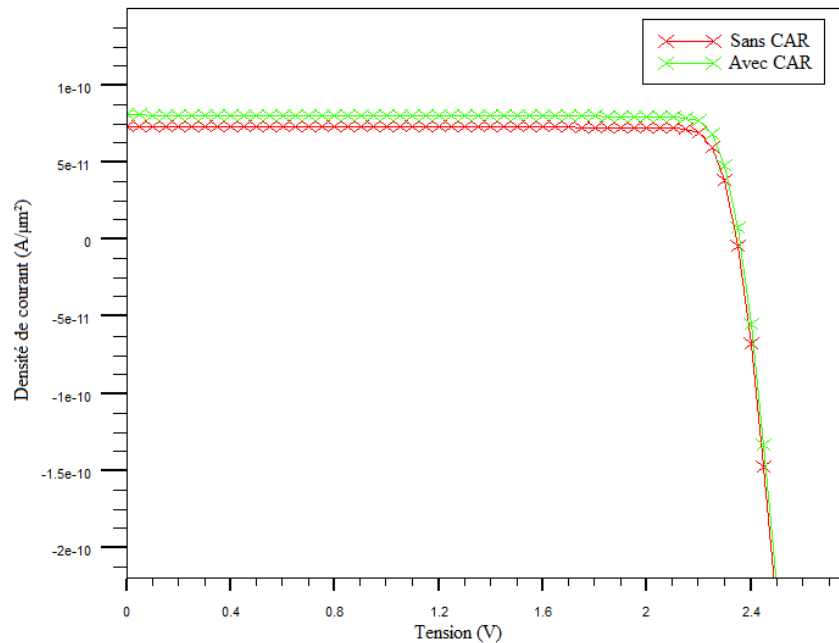


Fig. 3.9 – Influence de la couche antireflet sur la caractéristique J-V de la cellule solaire.

### 3.4 Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié une cellule solaire p-GaN/i-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>N/n-GaN, en utilisant le logiciel SILVACO. Dans la première partie, nous avons présenté les résultats de simulation de cette structure. Nous avons obtenu un courant de court-circuit et une tension de circuit ouvert égale à 7,31 mA/cm<sup>2</sup> et 2,34 V, respectivement. Le rendement de conversion atteint est égal à 15,33 %. Dans la deuxième partie, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la couche active et l'ajout d'une couche antireflet sur les paramètres de la cellule solaire. Le rendement de conversion, le courant de court-circuit, et la tension de circuit ouvert diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque. Par contre la couche antireflet améliore les paramètres de la cellule solaire.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce travail de mémoire, nous avons modélisé et simulé une cellule solaire hétérojonction de type p-i-n à base d'InGaN/GaN. L'objectif de cette étude est d'optimiser le rendement de la cellule photovoltaïque.

Dans la première partie de cette étude, nous avons présenté les matériaux III-V ; GaN, InN et l'alliage ternaire InGaN. Ce dernier est caractérisé, par sa bande d'énergie interdite allant de 0.7 eV (gap d'InN) à 3.42 eV (gap de GaN) qui couvre la totalité du spectre solaire. Il a aussi l'avantage de la bonne absorption et de la grande résistance à de fortes puissances. Le matériau InGaN présente aussi des inconvénients comme le mauvais dopage de type p et le manque de substrat adapté.

Dans la deuxième partie, nous avons décrit le mode de fonctionnement des cellules photovoltaïques, puis nous avons présenté les différents paramètres des cellules solaires. En fin nous avons présenté les différentes technologies de cellules solaires existantes.

Le chapitre 3 présente le logiciel utilisé dans la simulation et les résultats de simulation de la structure modélisée. A fin d'optimiser les performances de la cellule solaire, nous avons étudié l'influence de deux paramètres, l'épaisseur de la couche intrinsèque et l'ajout d'une couche antireflet.

## **REFERENCES**

- [1] A. Haque, « Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, Jamia Millia Islamia University, New Delhi, India », *Sol. Energy*, p. 20.
- [2] A. Adaine, « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN », p. 175.
- [3] J. Martin, « Étude par Epitaxie en Phase Vapeur aux OrganoMétalliques de la croissance sélective de Nano-Hétéro-Structures de matériaux à base de GaN », p. 202.
- [4] C. Stampfl et C. G. Van de Walle, « Density-functional calculations for III-V nitrides using the local-density approximation and the generalized gradient approximation », *Phys. Rev. B*, vol. 59, n° 8, p. 5521- 5535, févr. 1999, doi: 10.1103/PhysRevB.59.5521.
- [5] A. Philippe, « Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus », p. 194.
- [6] K. Sarasamak, A. J. Kulkarni, M. Zhou, et S. Limpijumnong, « Stability of wurtzite, unbuckled wurtzite, and rocksalt phases of SiC, GaN, InN, ZnO, and CdSe under loading of different triaxialities », *Phys. Rev. B*, vol. 77, n° 2, p. 024104, janv. 2008, doi: 10.1103/PhysRevB.77.024104.
- [7] I. Vurgaftman et J. R. Meyer, « Band parameters for nitrogen-containing semiconductors », *J. Appl. Phys.*, vol. 94, n° 6, p. 3675- 3696, sept. 2003, doi: 10.1063/1.1600519.
- [8] T. Hanada, « Basic Properties of ZnO, GaN, and Related Materials », in *Oxide and Nitride Semiconductors*, vol. 12, T. Yao et S.-K. Hong, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, p. 1- 19.
- [9] V. Gorge, « Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V », p. 216.
- [10] O. Ambacher, « Growth and applications of Group III-nitrides », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 31, n° 20, p. 2653- 2710, oct. 1998, doi: 10.1088/0022-3727/31/20/001.
- [11] H. Morkoç, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Materials Properties, Physics and Growth*. John Wiley & Sons, 2009.
- [12] J. Piprek, *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. Elsevier, 2013.
- [13] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, et L. R. Ram-Mohan, « Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys », *J. Appl. Phys.*, vol. 89, n° 11, p. 5815- 5875, juin 2001, doi: 10.1063/1.1368156.



- [14] O. Ambacher *et al.*, « Pyroelectric properties of Al(In)GaN/GaN hetero- and quantum well structures », *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 14, n° 13, p. 3399- 3434, avr. 2002, doi: 10.1088/0953-8984/14/13/302.
- [15] O. Ambacher *et al.*, « Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures », *J. Appl. Phys.*, vol. 85, n° 6, p. 3222- 3233, mars 1999, doi: 10.1063/1.369664.
- [16] G. F. Brown, J. W. Ager, W. Walukiewicz, et J. Wu, « Finite element simulations of compositionally graded InGaIn solar cells », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, n° 3, p. 478- 483, mars 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2009.11.010.
- [17] F. K. Yam et Z. Hassan, « InGaIn: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms », *Superlattices Microstruct.*, vol. 43, n° 1, p. 1- 23, janv. 2008, doi: 10.1016/j.spmi.2007.05.001.
- [18] A. Ahaitouf, « Étude des effets des irradiations neutron sur des structures MOS, technologie N-MOS, par spectroscopie DLTS mesures capacitives », p. 169.
- [19] Y. E. Gmili, « Étude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaIn pour le photovoltaïque », p. 199.
- [20] N. Baron, « Optimisation de l'épitaxie sous jets moléculaires d'hétérostructures à base de GaIn: application aux transistors à haute mobilité d'électrons sur substrat silicium », p. 281.
- [21] J. Tourret, « Etude de l'épitaxie sélective de GaIn/saphir et GaIn/GaIn-MOVPE par HVPE. Application à la croissance de structure périodiques de faible dimensionnalité », p. 229.
- [22] P.-M. Coulon, « Croissance et Caractérisation de Nanofils/Microfils de GaIn », p. 234.
- [23] D. Thibaut, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière », p. 196.
- [24] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », p. 158.
- [25] M. Urien, « ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES CHIMIQUES », p. 234.
- [26] K. Ramalingam et C. Indulkar, « Solar Energy and Photovoltaic Technology », in *Distributed Generation Systems*, Elsevier, 2017, p. 69- 147.
- [27] F. Z. Zerhouni et M. Zegrar, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique », p. 9.
- [28] « Comment ça marche ? » <http://www.ef4.be/fr/archives/energies-renouvelables/solaire-photovoltaïque/fonctionnement.html> (consulté le nov. 18, 2020).

- [29] L. G. Paterno, « 1 - Nanomaterials: Solar Energy Conversion », p. 33.
- [30] Kh. DJERIOUAT, « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonction : GaInP/GaAs ». 2011, [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/275>.
- [31] A. E. Brooks, « Solar Energy », in *Future Energy*, Elsevier, 2014, p. 383- 404.
- [32] S. Kalogirou, Éd., *Mcevoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, Third edition. London ; San Diego: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2018.
- [33] W. EL-HUNI, « Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V ». 2016.
- [34] « Best Research-Cell Efficiency Chart ». <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (consulté le mars 30, 2020).
- [35] M. Mimoune, « Étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies ». 2016, [En ligne]. Disponible sur: <http://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/7854>.
- [36] D. Ezgi, « Characterization and fabrication of InGaN solar cells ». 2015, [En ligne]. Disponible sur: <https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/0c5e602b-2fbe-4f79-924c-83145953aabd>.
- [37] V. Gorge *et al.*, « Theoretical analysis of the influence of defect parameters on photovoltaic performances of composition graded InGaN solar cells », *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 178, n° 2, p. 142- 148, févr. 2013, doi: 10.1016/j.mseb.2012.10.033.

## Résumé

Le matériau InGaN est devenu au cours des dernières années un matériau prometteur pour les applications optoélectroniques, notamment photovoltaïques grâce à son énergie de gap qui varie de 0.7 eV à 3.42 eV qui permet l'absorption d'une grande partie du spectre solaire. Ce travail présente une étude de simulation d'une cellule solaire hétérojonction à base d'InGaN. La structure de la cellule étudiée est de type p-i-n. Cette étude nous a permis d'optimiser les performances de cellule solaire, on optimisant l'épaisseur de la couche intrinsèque de la cellule solaire et on ajoutant une couche antireflet.

**Mots-clés :** matériaux III-V; cellule solaire; hétérojonction; Atlas SILVACO.

## Abstract

In recent years, InGaN has become a promising material for optoelectronic applications, especially photovoltaic applications, thanks to its gap energy which varies from 0.7 eV to 3.42 eV, permitting the absorption of a large part of the solar spectrum. This work presents a simulation study of an InGaN-based heterojunction solar cell. The structure of the studied cell is of p-i-n type. This study allowed us to optimize the solar cell performance, by optimizing the thickness of the intrinsic layer of the solar cell and adding an anti-reflection layer.

**Keywords:** III-V material; solar cell; heterojunction; Atlas/SILVACO.

## ملخص

أصبحت مادة InGaN في السنوات الأخيرة مادة واعدة للتطبيقات الإلكترونية الضوئية ، خاصة الخلايا الكهروضوئية بفضل فجوة الطاقة التي تتراوح من 0.7 فولت إلى 3.42 فولت مما يسمح بامتصاص جزء كبير من الطيف الشمسي. يقدم هذا العمل دراسة محاكاة لخلاية شمسية غير متجانسة تعتمد على InGaN. هيكل الخلية المدروسة من النوع p-i-n. سمحت لنا هذه الدراسة بتحسين أداء الخلايا الشمسية من خلال تحسين سماكة الطبقة الجوهرية للخلاية الشمسية وإضافة طبقة مضادة للانعكاس.

**الكلمات المفتاحية :** المواد III-V ؛ الخلية الشمسية ؛ غير متجانسة ؛ Atlas/SILVACO.