

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA -
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUES



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Physique des Matériaux

Thème

Optimisation du rendement d'une cellule solaire
homojonction à base d'InGaN

Réalisé par :

ALOUACHE Ali

BOUBOU Nassim

Devant le jury composé de :

Mlle. BOUDAUD Chahrazad	MCB	UAMOB	Rapporteur
M. HAMMA Issam	MCA	UAMOB	Examineur
M. ZITOUNE Hachemi	MAA	UAMOB	Examineur

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous remercions d'abord Le Bon Dieu qui nous a aidé et qui nous a donné le courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

Nous continuerons à remercier nos enseignants de l'Université Akli Mohand Oulhadj Bouira. En particulier, nous remercions notre cher encadreur Mme **BOUDAOU** **Chahrazad** qui était toujours à notre disposition, sans réservation, pendant la préparation de ce mémoire de fin d'études.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury, M.**HAMMA Issam** et M.**ZITOUNE Hachemi** pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail. On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragés au cours de la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à toutes.

Dédicace

Ce modeste mémoire est dédié à :

Tous les membres de nos précieuses familles.

Tous nos professeurs pour leur soutien continu et leurs conseils tout au long de nos études.

Nos amis du groupe physique des matériaux.

À tous ceux qui nous ont aidés, nous sommes extrêmement reconnaissants.

Nassim, Ali

Table des matières

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE.....	1
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1 Introduction.....	6
I.2 Propriétés magnétiques	6
I.2.1 Structure cristalline	6
I.2.2 Polarisation.....	7
I.2.2.1 Polarisation spontanée	7
I.2.2.2 Polarisation piézoélectrique	8
I.2.2.3 Polarisation totale.....	8
I.3 Propriétés électriques	8
I.3.1 Gap d'énergie interdite dans les nitrures	8
I.3.2 Expression du gap des matériaux $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	10
I.3.3 Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température	10
I.3.4 Longueur de diffusion.....	11
I.3.5 Mobilité des porteurs dans InGaN	12
I.3.6 Phénomènes de recombinaisons.....	13
I.4 Propriétés optiques	14
I.4.1 Indice de réfraction	14
I.4.2 Coefficient de réflexion et de transmission.....	16
I.4.3 Permittivité relative.....	16
I.4.4 Coefficient d'absorption	17
I.5 Croissance d'InGaN.....	18
I.5.1 Substrat de croissance	18
I.5.2 Epaisseur critique.....	18
I.5.3 Défauts structuraux	19
I.5.4 Dopage	21
I.6 Conclusion	22

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	23
II.1 Introduction.....	26
II.2 Le soleil	26
II.2.1 Le rayonnement solaire.....	26
II.3 La cellule solaire.....	27
II.3.1 Historique	27
II.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	28
II.3.3 Constitution d'une cellule solaire	29
II.4 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	30
II.4.1 Circuit électrique équivalent.....	30
II.4.2 Caractéristique I(V) et paramètres électriques.....	31
II.5 Différentes technologies de cellules solaires	33
II.6 Cellules solaires à base d'InGaN	34
II.7 Conclusion	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	38
III.1 Introduction	43
III.2 Le logiciel de simulation SCAPS-1D.....	43
III.3 Optimisation d'une cellule solaire homo-jonction de type p-n	46
III.3.1 Paramètres des matériaux utilisés.....	46
III.3.2 Description de la Structure simulée.....	47
III. 4 Effet de la variation de la fraction molaire d'indium	47
III-5 Effet de la variation du dopage de l'émetteur (N_A).....	49
III-6 Effet de la variation du dopage de la base (N_D)	51
III.7 Effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur	52
III.8 Effet de la variation de l'épaisseur de la base	54
III.9 Conclusion.....	55
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	57
CONCLUSION GENERALE	58
Résumé.	

Liste des figures:

Figure 1. Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire entre 1994 et 2018 ...	1
Figure I.1 Les structures cristallines du GaN. (a) Structure wurtzite , (b) structure blende	6
Figure I.2 polarisation Ga et N pour GaN	8
Figure I.3 Diagramme de bande GaN	9
Figure I.4 Diagramme de bande InN	9
Figure I.5 Longueur de diffusion des trous dans GaN en fonction de la concentration d'électrons	6
Figure I.6 Mobilité des porteurs libres dans $In_{1-x}Ga_xN$ en fonction de la température.....	12
Figure I.7 (a) Mécanisme de recombinaison radiative (b) Mécanisme de recombinaison Auger (c)Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall	14
Figure I.8 Indice de réfraction du GaN entre 0.35 et 10 μm	15
Figure I.9 Estimation de la variation de l'indice de réfraction dans l'InGaN, le GaAlN et l'InAlN	15
Figure I.10. (a) Courbe de transmission (noire) et de réflexion (rouge) du GaN. (b) Courbe d'absorption du GaN	17
Figure I.11 Types de défauts ponctuels dans un cristal: (A) lacune; (B) atome étranger interstitiel; (B') atome auto-interstitiel; (C, C') atomes étrangers en substitution	20
Figure I.12 les types de dislocations (a) une dislocation coin , (b) une dislocation vis.....	20
Figure I.13 Types de joints: (a) joint de flexion, (b) joint de torsion	21
Figure II-1: Spectre du rayonnement solaire : a) hors atmosphère (AM0), b) au sol (AM1.5).....	27
Figure II-2 : Historique de la cellule solaire	28
Figure II.3 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	29
Figure II.4 structure d'une cellule solaire typique	30
Figure II.5 Schéma électrique équivalent d'une cellule	31
Figure II.6 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire	32
Figure II.7 Situation et perspectives de la technologie des cellules solaires	34
Figure II.8 cellule solaire p-i-n proposée par Cai et al.....	35
Figure II.9 cellule solaire p-i-n homojonction proposée par Islam et al.....	36
Figure II.10 cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Neufeld et al	36
Figure II.11 cellule solaire pin à hétérojonction n- $In_{0.4}Ga_{0.6}N$ /p-Si proposée par Tran et al....	37

Figure II.12 cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al.....	37
Figure II.13 cellule solaire multijonction proposée par Young et al.....	38
Figure III.1 : panneau de l'action du logiciel SCAPS	44
Figure III.2 panneau de définition de la cellule solaire sous SCAPS-1D.....	45
Figure III.3 Panneau de la définition des propriétés de chaque couche.....	46
Figure III.4 structure de la cellule solaire.....	47
Figure III.5 caractéristique I-V de la cellule solaire en fonction de la fraction d'indium (x)...	48
Figure III.6 Variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de la fraction d'indium.....	49
Figure III.7 Caractéristique I-V en fonction de N_A	50
Figure III.8 Variations de FF, V_{CO} , J_{SC} et η en fonction de N_A	50
Figure III.9 Caractéristique I-V en fonction de N_D	51
Figure III.10 Variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de N_D	52
Figure III.11 Caractéristique I-V en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.....	53
Figure III.12 Variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.....	53
Figure III.13 Caractéristique I-V en fonction de l'épaisseur de la base.....	54
Figure III.14 Variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de l'épaisseur de la base.....	55
Figure III.15 Efficacité quantique externe et caractéristique I-V de la cellule solaire optimisée.....	56

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Paramètres structuraux pour le GaN et l'InN	7
Tableau I.2 Évolution du gap de GaN et InN en fonction de la température.....	11
Tableau I.3 Caractéristiques physiques des substrats utilisés pour la croissance du GaN.....	18
Tableau II.1 : Etat de l'art des cellules solaires à base d'InGaN.....	38
Tableau III.1 Paramètres utilisés à la simulation.....	46
Tableau III.2 : Paramètres de cellule solaire simulée.....	47
Tableau III. 3 Paramètres de simulation à 300 K en fonction de x (composition d'indium)....	47
Tableau III.4 les valeurs optimisées des paramètres de la cellule.....	55

INTRODUCTION GENERALE

La croissance rapide de la population mondiale et de l'économie, en particulière dans les pays en développement, a entraîné une augmentation de la consommation totale d'énergie, qui devrait atteindre 71 % en 2030. Les combustibles fossiles sont toujours à l'origine d'une grande partie de l'énergie utilisée dans le monde, et le pétrole reste la première source d'énergie (figure 1). Ils sont par conséquent les principaux responsables du réchauffement de la planète. La recherche de sources d'énergie indépendantes des combustibles fossiles et contribuant moins au réchauffement de la planète devient une nécessité. Parmi les sources d'énergie alternatives aux combustibles fossiles, on trouve les sources d'énergie renouvelables telles que l'hydraulique, la biomasse, la géothermie, l'éolienne et l'énergie solaire. Ces sources sont naturelles, disponibles, inépuisables et propres [1].

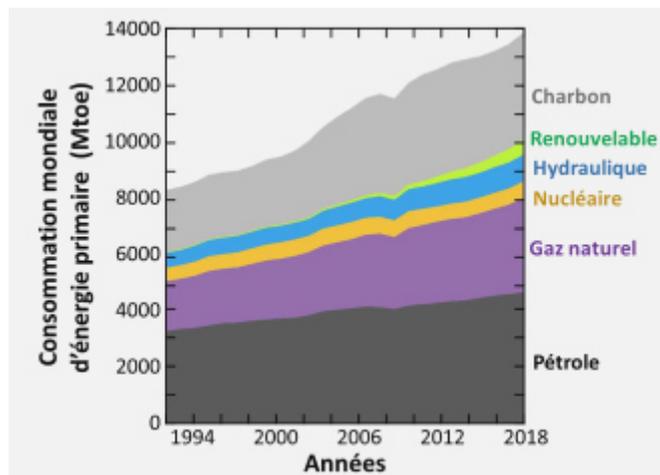


Figure 1. Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire entre 1994 et 2018 [2]. La consommation d'énergie primaire est exprimée en million de tonnes équivalent pétrole (Mtoe). L'origine de la production (charbon, renouvelable...) est représentée par les différentes couleurs. La production hydraulique bien que renouvelable, est ici dissociée des énergies renouvelables de par sa plus grande présence sur le marché mondial.

La conversion de l'énergie solaire, en particulier le photovoltaïque (PV), occupe une place importante parmi les énergies renouvelables cités auparavant. Les cellules solaires convertissent la lumière en électricité. Le rendement d'une cellule solaire est le rapport entre la quantité d'énergie électrique obtenue en sortie de la cellule et la quantité d'énergie apportée par les photons incidents qui arrivent à la surface de la cellule [3]. Plusieurs efforts ont été

fournis pour réduire le coût et augmenter la performance des cellules photovoltaïques. Aujourd'hui la technologie qui domine le marché est la technologie de silicium. Cependant, l'efficacité des cellules commerciales à base de silicium reste de l'ordre de 24%, bien loin de la limite de Shockley Queisser. Pour cette raison d'autres approches devraient être explorées afin de réduire le rapport énergie/coût et remplacer le silicium. Parmi ces matériaux, on trouve par exemple le CuInGaSe_2 (alliage de Cuivre indium gallium sélénium), les matériaux organiques et pérovskites. Les matériaux qui ont le plus d'efficacité sont les matériaux inorganiques à base de semi-conducteurs III-V. En effet, les semi-conducteurs III-V ont émergé également comme une solution efficace pour dépasser l'efficacité des cellules au silicium [4].

Parmi les nouveaux matériaux en couche mince considérés pour le photovoltaïque on trouve le nitrure d'indium gallium (InGaN), il fut étudié dans un premier temps pour des applications de diodes électroluminescentes (LED) et de capteurs UV. Depuis le début des années 2000, il est étudié pour le photovoltaïque grâce à son large et modulable gap d'énergie interdite allant de 0.7 eV pour le nitrure d'indium (InN) jusqu'à 3.42 eV pour le nitrure de gallium (GaN), qui peut couvrir une grande partie du spectre solaire. On peut donc, par exemple, facilement concevoir des cellules solaires à base d' InGaN simplement en changeant la concentration d'indium dans le InGaN . De telles structures simplifieraient ainsi les procédés de fabrication des cellules et en diminueraient ainsi les coûts. [5]

L'objectif de notre travail est la modélisation d'une cellule solaire à base de nitrure d'indium gallium (InGaN) et l'optimisation de ces paramètres électrique par simulation en utilisant le logiciel SCAPS.

Notre mémoire est organisé comme suit:

- Le premier chapitre détaille les différentes propriétés structurales, électriques et optiques des matériaux III-V en particulier, le nitrure de gallium (GaN), le nitrure d'indium (InN) et leur alliage ternaire (InGaN).
- Le deuxième chapitre décrit l'énergie solaire et le spectre solaire, explique le principe de fonctionnement ainsi que les constituants d'une cellule photovoltaïque, et finit par présenter l'état de l'art des différentes technologies de cellules solaires à base d' InGaN .
- Le troisième chapitre contient des explications sur le fonctionnement du logiciel de simulation SCAPS utilisé dans ce travail et présente les résultats de simulation de la

cellule solaire étudiée, à savoir l'effet de la fraction d'indium, l'effet des épaisseurs et des dopages des deux régions sur les performances de la cellule solaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Sarbu, I., & Adam, M. Applications of solar energy for domestic hot-water and buildings heating/cooling. international journal of energy, 2(5), 34-42 (2011).
- [2] Bruhat, E. Développement de cellules photovoltaïques silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés(Doctoral dissertation, Université de Lyon) (2019).
- [3] Defresne, A. Amélioration de la passivation de cellules solaires de silicium à hétérojonction grâce à l'implantation ionique et aux recuits thermiques (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay) (2016). .
- [4] Saket, O. Caractérisation électrique de nanofils de semi-conducteurs III-V pour des applications photovoltaïques(Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay) (2020).
- [5] Gorge, V. Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V (Doctoral dissertation, Paris 11) (2012).

Chapitre I : Propriétés de Nitrure de Galium Indium (InGaN)

I.1 Introduction

Le nitruure de gallium (GaN), le nitruure d'indium (InN), le nitruure d'aluminium (AlN) et leurs alliages constituent une famille de matériaux connus sous le nom de "nitruures III". Les nitruures d'éléments III sont des matériaux semi-conducteurs formés par l'association des liaisons covalentes d'un élément de la colonne III (Gallium (Ga), Aluminium(Al), Indium(In),...) et de l'élément Azote (N) de la colonne V du tableau de Mendeleïev. Cette classe de matériaux basée sur les nitruures III présente un très grand intérêt pour les applications optoélectroniques, notamment le photovoltaïque [1-3]. Dans ce chapitre nous allons présenter l'alliage InGaN (Nitruure d'indium gallium) en passant par une étude de ces caractéristiques et ces propriétés structurales électroniques, optiques et thermiques.

I.2 Propriétés magnétiques

I.2.1 Structure cristalline

Les nitruures III cristallisent principalement selon deux phases : zinc-blende ou wurtzite (hexagonale). La structure hexagonale est constitué de deux sous-réseaux hexagonaux, dont chacun est composé d'atomes de Ga et de N, respectivement, et qui sont décalés de $u = 3/8c$ le long de la direction $[0001]$, u étant la longueur de la liaison anion-cation le long de l'axe $\langle 0001 \rangle$ et c étant la hauteur du prisme hexagonal. Pour une structure wurtzite idéale, $u = 3/8 = 0.375$ [4]. La deuxième structure zinc-blende est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, décalés de $(1/4 ; 1/4 ; 1/4)$ [5]. Le tableau I.1 présente les paramètres de maille des nitruures, de gallium (GaN) et d'indium (InN). Dans ce travail, nous nous intéressant à la structure wurtzite qui est thermodynamiquement la plus stable.

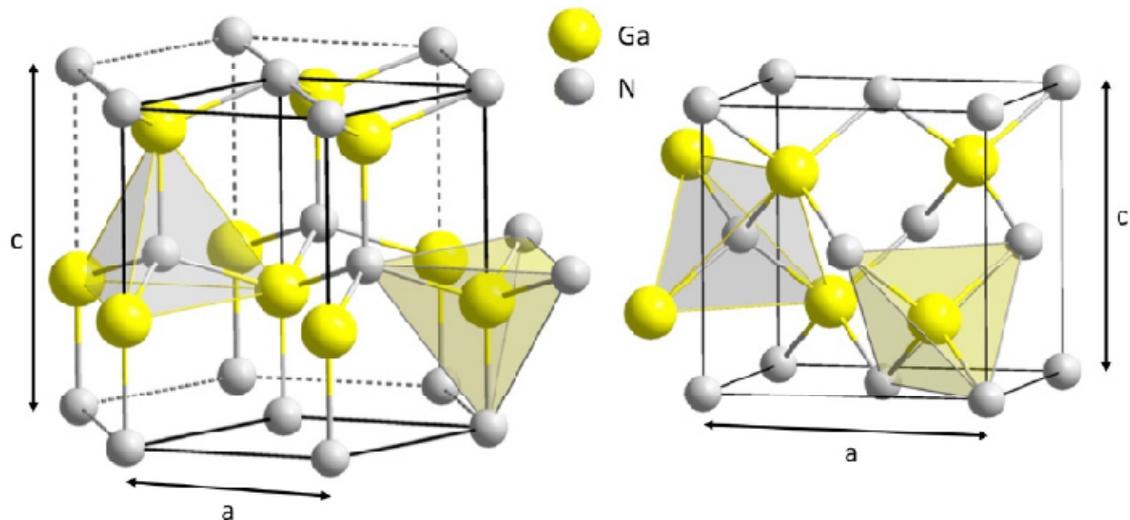


Figure I.1 Les structures cristallines du GaN. (a) Structure wurtzite , (b) structure blende [6]

Tableau I.1 : Paramètres structuraux pour le GaN et l'InN [7,8].

	Wurtzite			cubique
	a (Å)	C (Å)	u	a (Å)
GaN	3.189	5.185	0.377	4.5
InN	3.54	5.70	0.378	4.98

I.2.2 Polarisation

La structure de la maille wurtzite n'est pas centrosymétrique puisque les liaisons pendantes à la surface du matériau dans les directions $[0001]$ et $[000\bar{1}]$ ne sont pas équivalentes. On parle alors de polarité gallium $[0001]$ ou azote $[000\bar{1}]$, cette polarité étant définie par l'orientation des liaisons de l'atome de gallium. Dans le cas où ce dernier possède trois liaisons dans le sens opposé à celui de la croissance, le matériau est dit de polarité Ga. À l'inverse, le matériau est dit de polarité N (Figure I.2).

I.2.2.1 Polarisation spontanée

La polarisation spontanée va séparer spatialement les électrons et les trous et créer ainsi une accumulation de charges aux extrémités de la couche perpendiculairement à l'axe c (interface substrat/couche épitaxie ou surface de la couche épitaxie) qui peut modifier les propriétés électriques du matériau. Il est donc important de connaître le sens de cette polarisation afin de pouvoir la contrôler. Le traitement de surface post-croissance ainsi que le procédé de croissance permettent d'orienter la polarisation dans la direction désirée. En effet, si la première couche atomique déposée est composée d'azote, la dernière sera alors composée d'atomes de gallium. On aura ainsi un excès de trous à la surface et une polarisation de type Ga $[0001]$. Inversement, si la première couche est composée de gallium, la dernière sera formée d'azote et présentera donc un excès d'électrons. On aura alors une polarisation N et l'axe de croissance sera appelé $[000\bar{1}]$ [9].

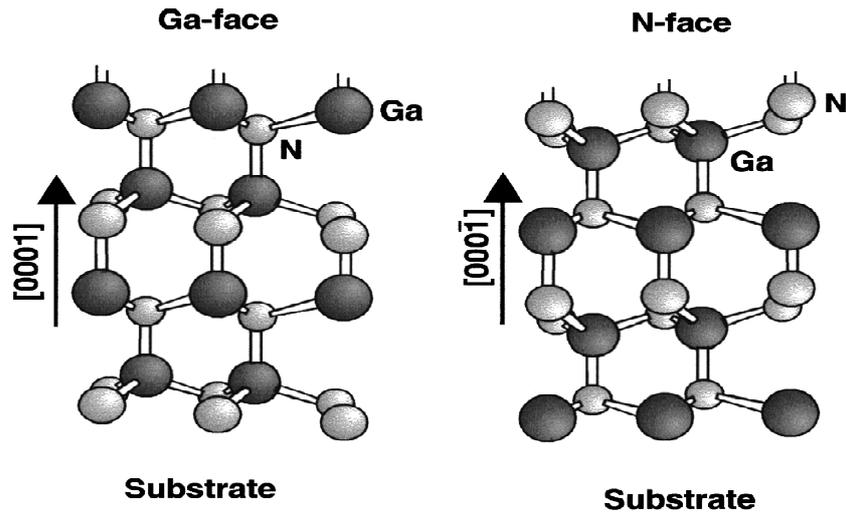


Figure I.2 polarisation Ga et N pour GaN [10].

I.2.2.2 Polarisation piézoélectrique

Dans les nitrures d'éléments III, l'existence d'un champ de polarisation implique la présence d'un champ électrique interne afin que toute modification du paramètre de maille génère une polarisation supplémentaire nommée polarisation piézoélectrique (p_{pz}). La variation des paramètres de maille peut également se produire sans modifier la composition de l'alliage, mais en appliquant des contraintes mécaniques extérieures qui entraînent une déformation des liaisons covalentes entre les atomes III (métal) et les atomes N [3].

I.2.2.3 Polarisation totale

En l'absence de polarisation externe, la polarisation totale dans un matériau à structure wurtzite est égale à la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique :

$$\vec{p} = \vec{p}_{sp} + \vec{p}_{pz} \quad (I.1)$$

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 [9].

I.3 Propriétés électriques

I.3.1 Gap d'énergie interdite dans les nitrures

La caractéristique principale pour laquelle les nitrures sont tant étudiés est leur gap d'énergie interdite direct. Ceci permet d'avoir de meilleurs rendements de conversion ou

d'émission de lumière, pour le photovoltaïque ou pour les LED, par exemple. D'autre part, leurs alliages permettent de couvrir quasiment tout le spectre solaire, de l'infrarouge (IR) à l'ultraviolet (UV). Le gap d'énergie interdite est de 3.39 eV 366 nm pour le GaN et de 0.7 eV 1771 nm pour l'InN à température ambiante 300K [2, 11].

Le diagramme de bande du GaN est montré dans la figure I.3 et celui de l'InN est représenté dans la figure I.4. Le GaN et l'InN sont des matériaux à gap direct, le minimum de leur bande de conduction est donc aligné au maximum de leur bande de valence dans l'espace des vecteurs d'onde.

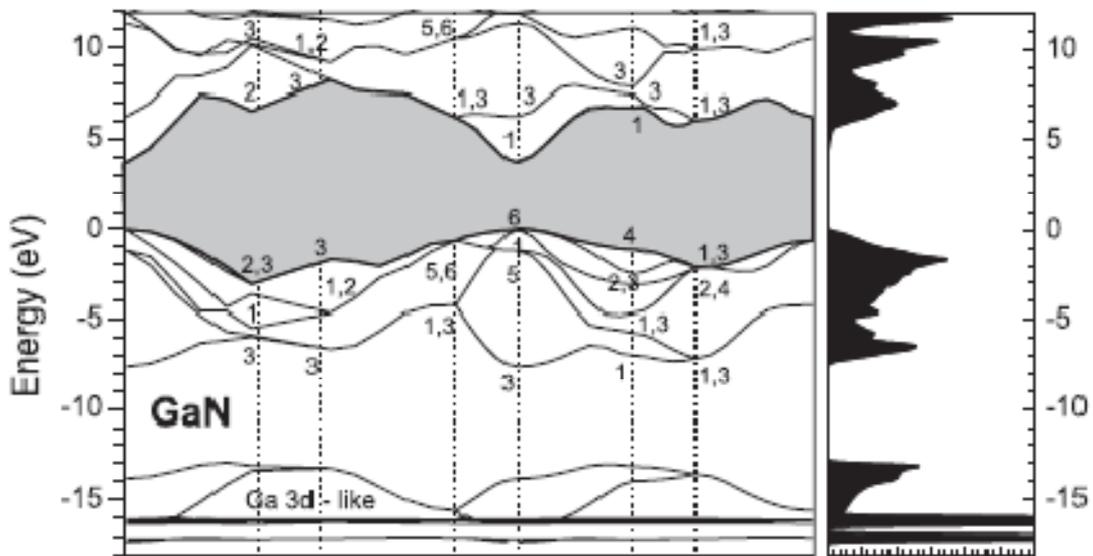


Figure I.3 Diagramme de bande GaN [12].

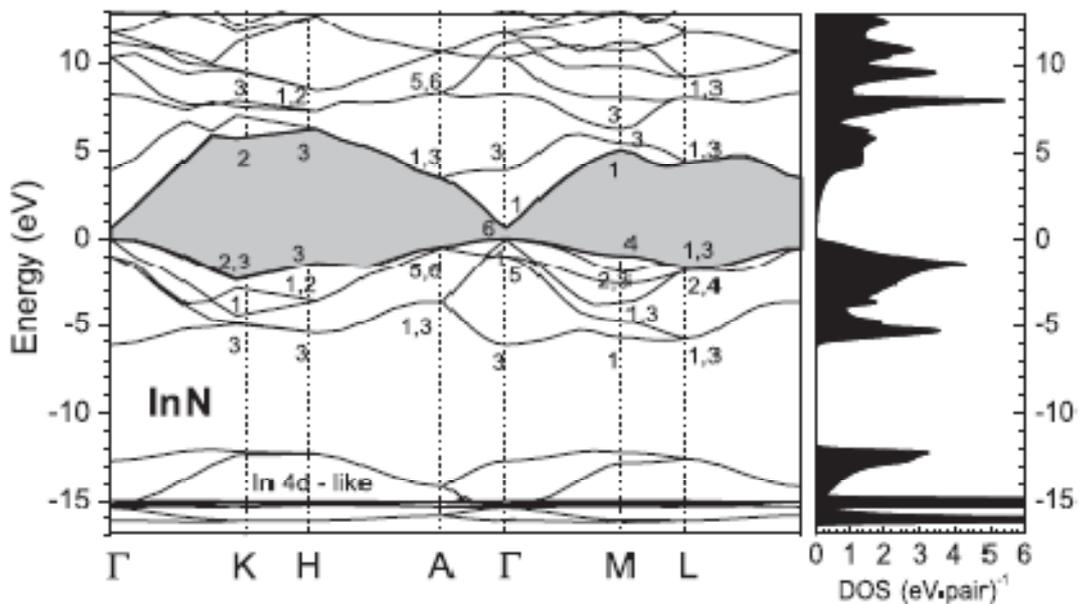


Figure I.4 Diagramme de bande InN [12].

Où les densités d'états du GaN et InN sont représentées par les parties droites et les bandes d'énergies interdites par les parties grises. Les nombres représentent les points de haute symétrie en utilisant la notation de Rashba avec les maximums des bandes de valences prisent comme la référence des énergies [12].

I.3.2 Expression du gap des matériaux $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Les paramètres de maille des alliages ternaires de nitrures d'éléments III peuvent être calculés selon la loi de Végard qui relie la composition et les valeurs des paramètres de maille de l'alliage avec celles des composés binaires correspondants dans le cas où aucune contrainte ne déforme le réseau (le matériau est dit totalement relaxé). Dans le cas du ternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, ces paramètres peuvent être calculés selon les expressions suivantes :

$$E_{g_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}} = x \cdot E_{g_{\text{InN}}} + (1 - x) \cdot E_{g_{\text{GaN}}} + b \cdot X \cdot (1 - x) \quad (\text{I.2})$$

D'où

b est une constante introduite dans l'équation afin d'apporter une adéquation avec l'expérimentation appelée paramètre de courbure (en eV) [9].

x : Concentration d'indium dans l'alliage (s.d).

$E_{g_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}}$: Gap d'énergie de l'alliage (eV).

$E_{g_{\text{GaN}}}$: Gap d'énergie du nitrure de gallium (eV).

$E_{g_{\text{InN}}}$: Gap d'énergie du nitrure d'indium (eV).

I.3.3 Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température

L'énergie de la bande interdite varie avec la température et sa dépendance est généralement décrite par la loi de Varshni [13].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{I.3})$$

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

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

β : Constante associée à la température (K).

Ces paramètres de GaN et InN sont rassemblés dans le tableau I.2.

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

	GaN			InN	
	Monemar [14]	Bougrov et al. [15]	Vurgaftman et Mayer [8]	Wu et al. [16]	Vurgaftman et Mayer [8]
$\alpha(\text{meV.K}^{-1})$	0.508	0.77	0.909	0.41	0.245
$\beta(\text{K})$	996	600	830	454	624
$E_g(0)(\text{eV})$	3.50	3.47	3.51	0.69	0.78
$E_g(300\text{K})(\text{eV})$	3.44	3.39	3.44	0.64	0.75

I.3.4 Longueur de diffusion

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

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (\text{I.4})$$

τ : Temps de vie des porteurs (s)

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

$$D = \frac{KT}{\mu} \quad (\text{I.5})$$

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

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire. En effet, si les électrodes collectant le courant produit par la cellule sont éloignées d'une distance supérieure à la longueur de diffusion, alors les charges se recombineront avant d'être collectées. La figure I.5 présente l'évolution de la longueur de diffusion des trous dans le GaN en fonction de la concentration d'électrons. On observe que la longueur de diffusion des trous chute de manière quasiment exponentielle avec l'augmentation de la concentration des électrons à cause de l'augmentation de la probabilité de recombinaison.

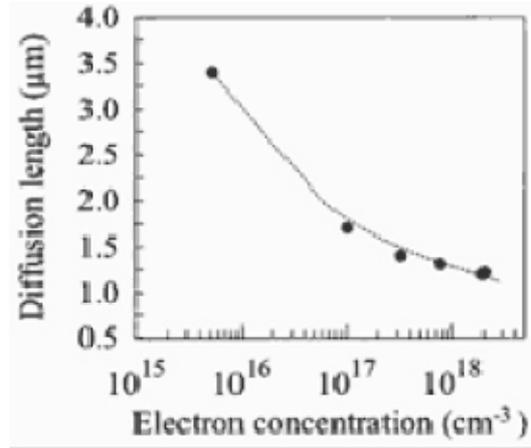


Figure I.5 Longueur de diffusion des trous dans GaN en fonction de la concentration d'électrons [11,17]

I.3.5 Mobilité des porteurs dans InGaN

La mobilité des porteurs libres dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ est présentée dans la (figure I.6) avec x la concentration de Ga. On peut voir que la mobilité diminue avec l'augmentation de la concentration de Ga. Cela est dû à l'augmentation de la masse effective des électrons avec l'augmentation de la concentration de Ga dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($m_e\text{GaN} = 0.2m_0$ et $m_e\text{InN} = 0.2m_0$) 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 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$. On observe également que la mobilité est quasiment indépendante de la température.

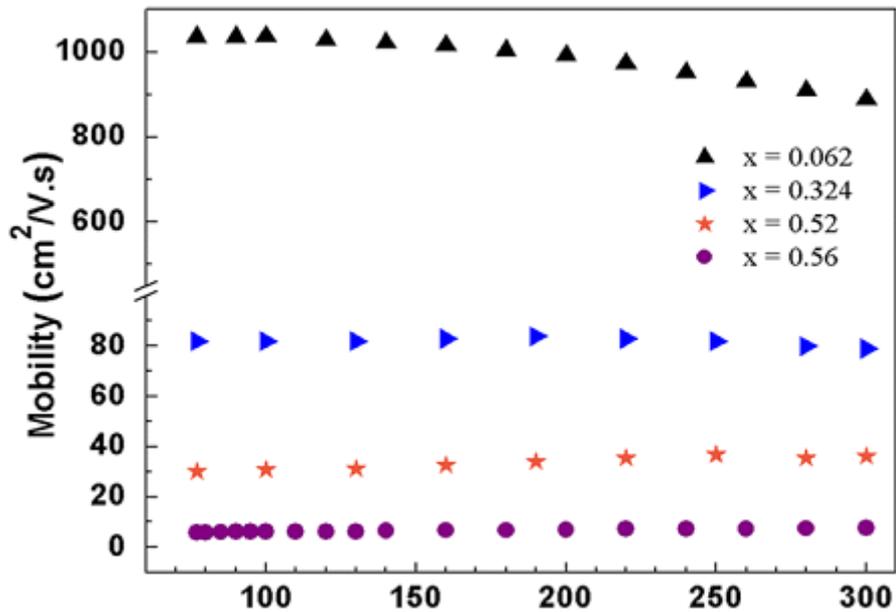


Figure I.6 Mobilité des porteurs libres dans $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ en fonction de la température [11].

I.3.6 Phénomènes de recombinaisons

Le fonctionnement d'une cellule solaire est basé sur la création et la séparation des paires électron-trou par absorption de la lumière et sous l'action d'un champ électrique.

Néanmoins, il existe toujours des recombinaisons de ces paires électron-trou limitant les performances de la cellule. Dans un matériau semi-conducteur, un mécanisme de recombinaison donné est caractérisé par un taux de recombinaison, représentant le nombre de recombinaisons par unité de temps et par unité de volume. Il existe trois principaux mécanismes : les recombinaisons radiatives, les recombinaisons Shockley-Read-Hall et les recombinaisons Auger (figure I.7).

- **Recombinaisons radiatives**

La recombinaison radiative ou bande à bande, correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence. Elle s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photo-génération)

- **Recombination Shockley-Read-Hall (SRH)**

Le mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) est schématisé sur la figure I.7 (c). Ce mécanisme fait intervenir un défaut localisé dans la bande interdite du matériau qui peut être un centre recombinant pour les porteurs libres

- **Recombinaisons Auger**

Le mécanisme de recombinaison Auger est représenté sur la figure I.7 (d). Il s'agit aussi d'une recombinaison bande à bande, mais contrairement à la recombinaison radiative. L'énergie libérée est transmise à un troisième porteur qui se retrouve excité dans un niveau supérieur de la bande de conduction. Le troisième porteur peut ensuite se thermaliser en émettant un ou plusieurs phonons. A noter que ce phénomène existe aussi avec les trous dans la bande de valence. Ce type de recombinaison est peu probable dans les matériaux à grand gap tel que le GaN et donc peu probable dans InGaN riche en gallium [18].

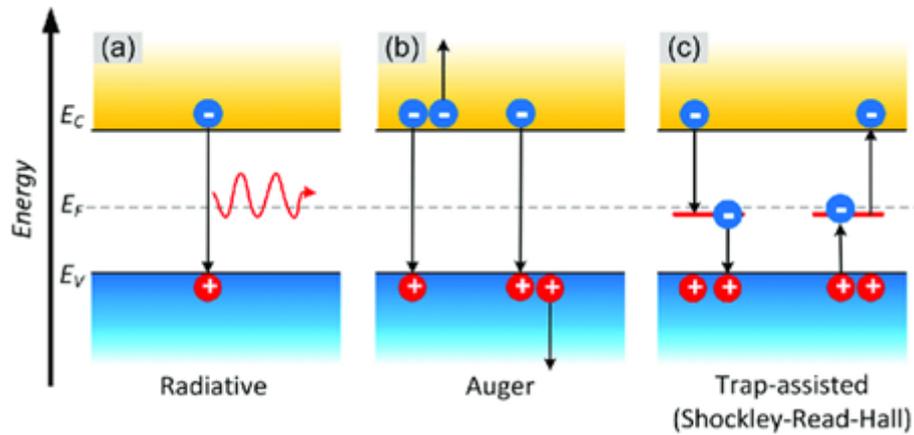


Figure I.7 (a) Mécanisme de recombinaison radiative (b) Mécanisme de recombinaison Auger (c) Mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall [19].

I.4 Propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un composant composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. On peut alors confiner la lumière dans une couche particulière, comme dans les lasers. Cette propriété est aussi très intéressante pour les applications de cellules solaires afin d'augmenter les efficacités d'absorption de la lumière [9].

I.4.1 Indice de réfraction

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

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{I.6})$$

c : la vitesse de la lumière dans le vide.

v : la vitesse de la lumière dans le matériau.

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change avec la longueur d'onde.

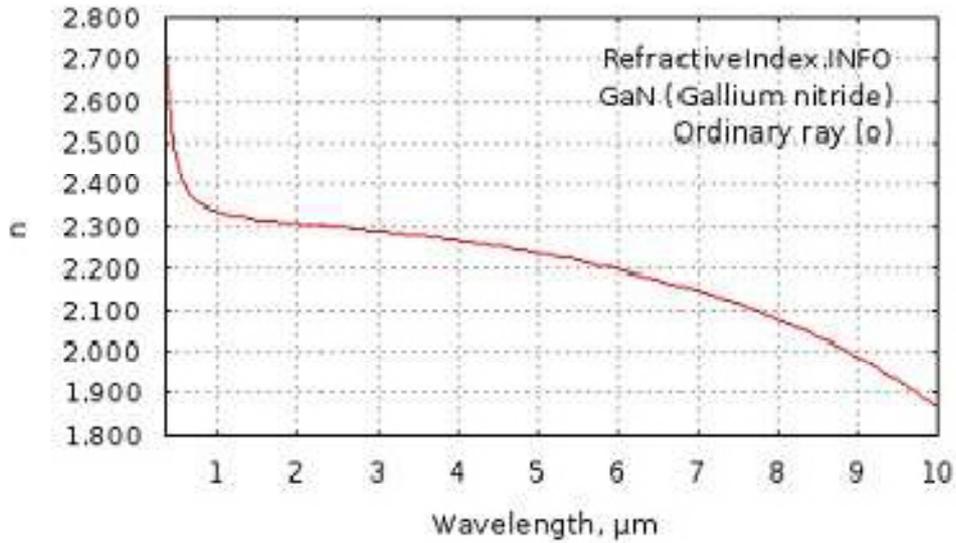


Figure I.8 Indice de réfraction du GaN entre 0.35 et 10 μm.

La figure I.8 ci-dessus présente l'indice de réfraction du GaN en fonction de la longueur d'onde entre 0.35 et 10 μm. Dans le cas du GaN, elle est égale à environ 2,3. Pour l'InN, elle vaut environ 2,9 dans l'infrarouge.

Anani et al. ont estimé la variation de l'indice de réfraction d'alliages de nitrures-III, voir la figure I.9 qui présente le tracé de l'indice de réfraction en fonction de la composition de l'Indium. Ils relient la formule de l'indice de réfraction n à l'énergie d'un photon absorbé par un matériau E_g définie par [20] :

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.7)$$

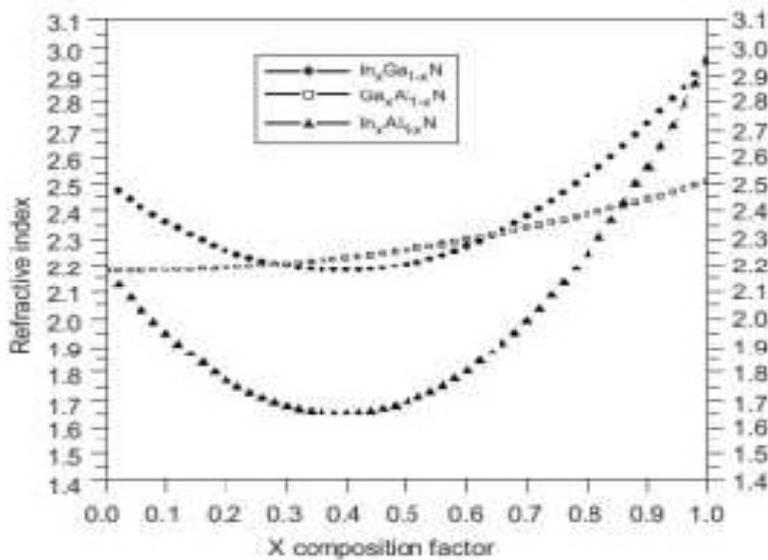


Figure I.9 Estimation de la variation de l'indice de réfraction dans l'InGaN, le GaAlN et l'InAlN.

L'indice de réfraction est également important pour le calcul des coefficients de réflexion et de transmission selon la loi de Snell-Descartes

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{I.8})$$

n_1 et n_2 sont les indices de réfraction

θ_1 et θ_2 sont les angles des rayons lumineux par rapport à la normale [°].

I.4.2 Coefficient de réflexion et de transmission

Le coefficient de réflexion R , (transmission T) est défini comme le rapport de l'intensité réfléchie, (transmise I_t) sur l'intensité incidente I_i .

$$r = \frac{I_r}{I_i}; T = \frac{I_t}{I_i} \quad (\text{I.9})$$

On a alors :

$$R = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (\text{I.10})$$

$$\text{et } T = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (\text{I.11})$$

I.4.3 Permittivité relative

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

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

Avec

χ : est la susceptibilité du matériau [s. d].

ϵ_0 : est la permittivité du vide [$8.85 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$].

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

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

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

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (\text{I.14})$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (\text{I.15})$$

On considérant le dioptré air/GaN, on obtient un coefficient de réflexion de 39 % et un coefficient de transmission de 61 %.

I.4.4 Coefficient d'absorption

Pour les cellules solaires, le coefficient d'absorption est un paramètre important puisqu'il va déterminer la quantité de photons absorbés par le matériau et donc la quantité de porteurs pouvant être produits. L'absorption à travers une couche de semi-conducteur d'épaisseur d peut être décrite par l'équation suivante :

$$I_t(\lambda) = I_i(\lambda)e^{-\alpha\lambda d} \quad (I.16)$$

I_i : Intensité incidente

I_t : Intensité transmise

λ : Longueur d'onde

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

Un exemple de courbe de transmission, de réflexion et d'absorption du GaN est montré dans la Figure I.10 (a) et la Figure I.10 (b). Le seuil de transmission ou d'absorption que l'on peut voir dans ces figures autour de 360 nm correspond au gap d'énergie du matériau. On peut alors, d'après ces mesures déterminer le gap du matériau, ici, 3,41 eV, ce qui correspond bien au gap du GaN.

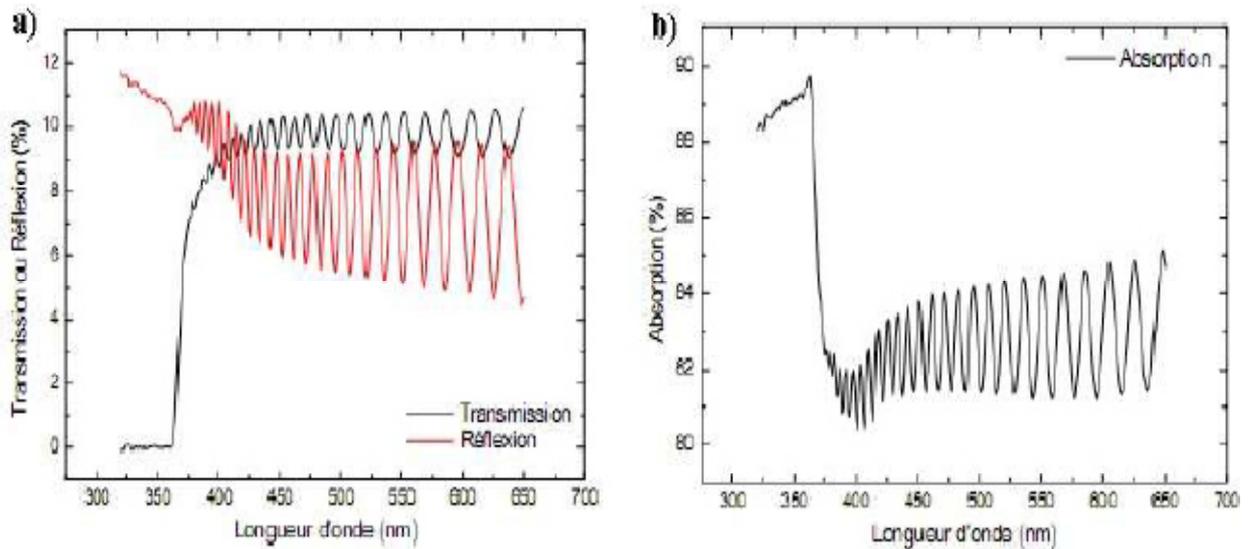


Figure I.10. (a) Courbe de transmission (noire) et de réflexion (rouge) du GaN. (b) Courbe d'absorption du GaN [11].

I.5 Croissance d'InGaN

I.5.1 Substrat de croissance

L'élaboration d'InGaN est un point critique pour le développement des cellules solaires à base de ce matériau. Aujourd'hui il est très difficile de fabriquer une couche massive d'InGaN. Elle est donc déposée en film mince sur un substrat. Cependant InGaN souffre d'un manque de substrat en accord de maille pour la croissance épitaxiale. Une couche tampon est alors utilisée pour adapter les paramètres du substrat et de la couche d'InGaN déposée. Les substrats traditionnellement utilisés sont le saphir (Al_2O_3) et le carbure de silicium (SiC), avec une couche tampon de GaN ou d'AlN, Le tableau I.3 résume les principales caractéristiques de ces substrats. Le nitrure l'aluminium (AlN) a été aussi étudié pour la croissance d'InGaN. Cependant, il est également très difficile à fabriquer en couches épaisses. Enfin, d'autres substrats comme le silicium ou le verre pourraient être utilisés comme substrat pour des composants InGaN malgré leur structure très différente, grâce à leur faible coût et leurs diverses applications.

Tous ces substrats possèdent des paramètres de maille et des coefficients d'expansion thermique éloignés de ceux de la couche tampon de GaN, induisant ainsi une densité élevée de défauts structuraux qui sont principalement des dislocations qui impactent très fortement les performances d'une cellule solaire [18].

Tableau 1.3 Caractéristiques physiques des substrats utilisés pour la croissance du GaN [18, 21].

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

I.5.2 Epaisseur critique

Lors de la croissance épitaxiale d'un matériau sur un substrat et ce, pour un faible désaccord des paramètres de maille entre le matériau et le substrat, il existe une épaisseur dite "épaisseur critique" à partir de laquelle la contrainte contenue dans la couche devient trop importante et la couche se relaxe pour réduire l'énergie emmagasinée. Pour une couche épitaxiée d'épaisseur inférieure à l'épaisseur critique, la couche se déforme élastiquement

pour adapter son paramètre de maille à celui du substrat (épitaxie pseudomorphe). Inversement, pour une couche épitaxiée supérieure à l'épaisseur critique, la couche se relaxe. En effet, l'énergie élastique emmagasinée étant trop grande, la couche se relaxe pour reprendre ses paramètres de maille initiaux, en générant des dislocations dans le matériau. L'épaisseur critique dépend donc fortement du désaccord de maille entre la couche épitaxiée et son substrat.

Différentes études ont été réalisées pour mesurer l'épaisseur critique de relaxation **d'InGaN** sur GaN en fonction de la composition d'indium. Il existe cependant, une grande disparité des mesures due aux différents procédés et conditions de croissance et aux différents modèles théoriques utilisés [18, 22].

I.5.3 Défauts structuraux

Les défauts de structure couramment rencontrés dans les cristaux sont de trois types:

- Les défauts ponctuels sont de l'ordre de grandeur du volume d'un atome.
- Les défauts linéaires ou dislocations sont des perturbations de la structure du cristal situées le long d'une ligne d'atomes ou d'une rangée réticulaire.
- Les défauts bidimensionnels ou défauts plans mettent principalement en jeu des imperfections comme celles situées à l'interface séparant deux cristaux.

a) Défauts ponctuels

Lorsqu'un défaut existe à l'échelle d'un atome, on parle alors d'un défaut ponctuel (figure I.11), en dépit du fait que ce défaut occupe un certain volume. Comme tous les défauts, les défauts ponctuels déforment le réseau et génèrent un champ de contrainte dans le cristal qui englobe un volume largement plus grand que celui du défaut même. Celui-ci est représenté schématiquement par des flèches à la figure I.11. On distingue trois types principaux de défauts ponctuels:

- La lacune : caractérise l'absence d'un atome d'un site normal du réseau cristallin (A).
- L'interstitiel : apparaît lorsqu'un atome étranger de petite taille (B) s'insère dans les espaces vides du réseau cristallin. Lorsqu'un atome constitutif du cristal est placé en insertion, on a affaire à un auto-interstitiel (B').
- L'atome en substitution : résulte du remplacement d'un atome constitutif du cristal placé en position régulière par un atome étranger (C, C').

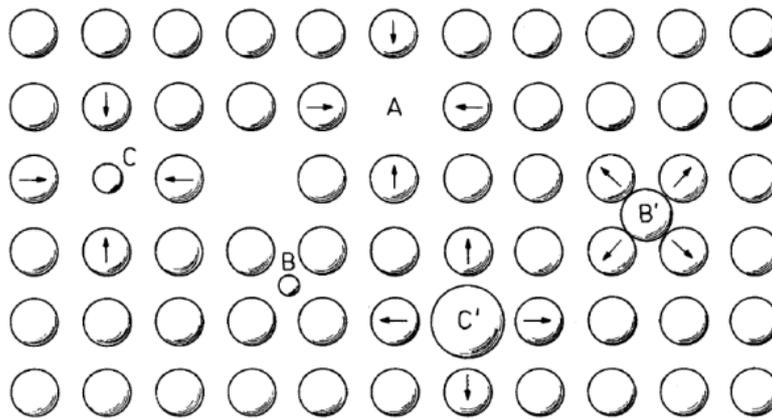


Figure I.11 Types de défauts ponctuels dans un cristal: (A) lacune; (B) atome étranger interstitiel; (B') atome auto-interstitiel; (C, C') atomes étrangers en substitution [23].

b) Défauts linéaires

Les défauts linéaires observés dans les cristaux sont appelés dislocations. Les dislocations sont obtenues par le glissement \vec{b} d'une partie du cristal le long d'un plan. La ligne de dislocation proprement dite correspond à la ligne du plan de glissement séparant la partie du cristal qui a glissé de celle qui est restée immobile. Le vecteur de glissement \vec{b} est appelé vecteur de Burgers de la dislocation. Ilya deux types de dislocations (figure I.12) :

- une dislocation coin, dont la ligne de dislocation L est perpendiculaire au vecteur de Burgers ;
- une dislocation vis, dont la ligne de dislocation L est parallèle au vecteur de Burgers.

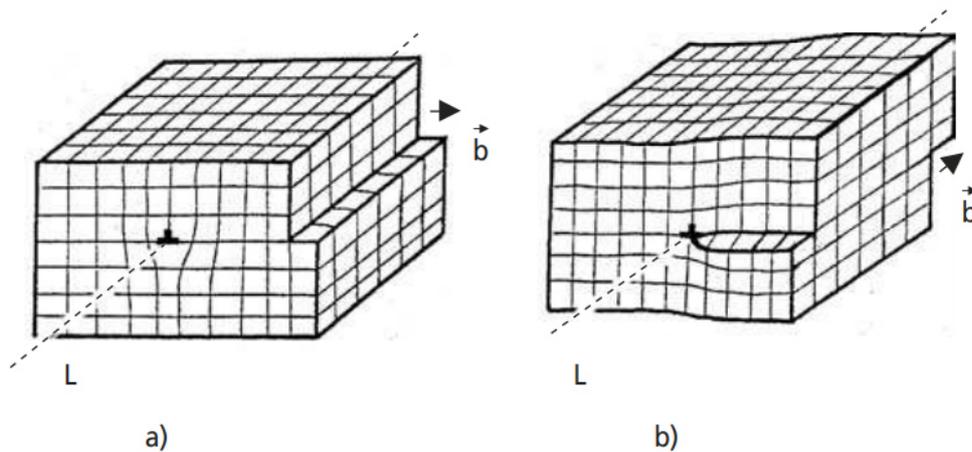


Figure I.12 les types de dislocations (a) une dislocation coin , (b) une dislocation vis [24].

c) Défauts bidimensionnels

➤ Joints de grains

Un joint de grain est formé par la jonction entre deux monocristaux orientés différemment le long d'une surface plane commune. Il existe deux types de joints:

- Les joints de flexion qui contiennent l'axe de rotation des grains (figure I.13 (a)).
- Les joints de torsion qui sont perpendiculaires à cet axe (figure I.13 (b)).

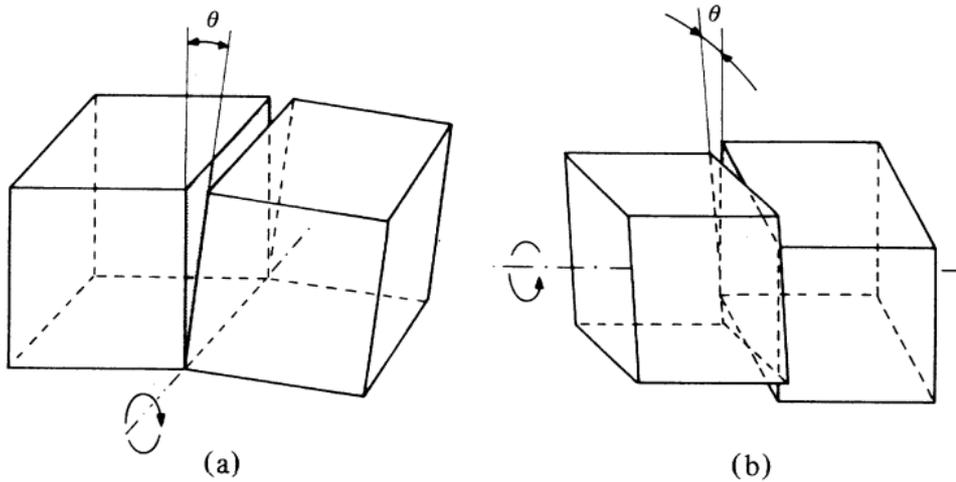


Figure I.13 Types de joints: (a) joint de flexion, (b) joint de torsion [23].

I.5.4 Dopage

Le dopage est une technique qui permet d'augmenter la quantité de trous ou d'électrons d'un matériau en substituant une très faible quantité de ses atomes par des atomes d'une autre nature. Si on ajoute des atomes possédant un ou plusieurs électrons de moins (un ou plusieurs trous de plus), on parle de dopage de type P. Dans ce cas, on favorise la conduction du courant par les trous. Inversement, si on ajoute des atomes ayant un ou plusieurs électrons de plus, on parle de dopage de type N. Dans ce cas, la conduction électrique se fera principalement par les électrons.

I.5.4.1 Dopage type N

Les nitrures sont intrinsèquement de type N, avec un excès d'électrons. L'augmentation du caractère N des nitrures est donc relativement facile. On utilise le plus couramment le silicium, Si, comme dopant de type N. Le silicium occupe le site d'un cation (Ga ou In) et est un donneur simple. Sa concentration dans les couches de nitrure est typiquement de l'ordre de 10^{18} cm^{-3} [11].

I.5.4.2 Dopage type P

Le dopage de type P reste toujours un défi majeur pour le développement des nitrides. En effet, du fait du caractère intrinsèque de type N des nitrides (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 obtenu en incorporant du magnésium(Mg) comme accepteur avec un procédé complexe d'activation à haute température. Les résultats expérimentaux donnent une valeur limite à l'incorporation du Mg de quelques 10^{19}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 [18, 25, 26].

I.6 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les propriétés structurales, électriques et optiques des matériaux binaires GaN et InN ainsi que leur alliage ternaire InGaN qui est au cœur de ce travail de mémoire. InGaN se caractérise par sa large bande d'énergie interdite couvrant presque tous le spectre solaire, la propriété qui lui donne un grand intérêt dans le domaine photovoltaïque.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Ren, C. X. Polarisation fields in III-nitrides: effects and control. *Materials Science and Technology*, 32(5), 418-433 (2016).
- [2] Yam, F. K., & Hassan, Z. InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms. *Superlattices and Microstructures*, 43(1), 1-23 (2008).
- [3] Latrach, S. Optimisation et analyse des propriétés de transport électroniques dans les structures à base des matériaux AlInN/GaN (Doctoral dissertation, Université Côte d'Azur (ComUE) (2018).
- [4] Lim, C. B. Hétérostructures GaN/Al (Ga) N pour l'optoélectronique infrarouge: orientations polaires et non-polaires (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes (ComUE)) (2017).
- [5] Amstatt, B. Croissance d'hétérostructures non-polaires de GaN/AlN plan m sur 6h-SiC plan m (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I) (2008).
- [6] Nicolas, P. Développement de procédés de gravure plasma sans dommage pour l'électronique de puissance à base de GaN (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes) (2020).
- [7] Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*, 106(1), 5 (2009).
- [8] Vurgaftman, I., & Meyer, J. N.Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 94(6), 3675-3696 (2003).
- [9] El Gmili, Y. Étude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université de Lorraine) (2013).
- [10] Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J. R., Weimann, N. G., Chu, K., Murphy, M., ... & Hilsenbeck, J. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N-and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures. *Journal of applied physics*, 85(6), 3222-3233 (1999).
- [11] Gorge, V. Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V (Doctoral dissertation, Paris 11) (2012).
- [12] De Carvalho, L. C., Schleife, A., & Bechstedt, F. Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes. *Physical Review B*, 84(19), 195105 (2011).
- [13] Varshni, Y. P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *physica*, 34(1), 149-154 (1967).

- [14] Monemar, B. Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra. *Physical Review B*, 10(2), 676 (1974).
- [15] Levinshtein, M. E., Rumyantsev, S. L., & Shur, M. S. (Eds.) *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. John Wiley & Sons (2001).
- [16] Wu, J., Walukiewicz, W., Shan, W., Yu, K. M., Ager III, J. W., Li, S. X., ... & Schaff, W. J. Temperature dependence of the fundamental band gap of InN. *Journal of Applied Physics*, 94(7), 4457-4460 (2003).
- [17] Chernyak, L., Osinsky, A., Temkin, H., Yang, J. W., Chen, Q., & Asif Khan, M. Electron beam induced current measurements of minority carrier diffusion length in gallium nitride. *Applied physics letters*, 69(17), 2531-2533 (1996).
- [18] Adaine, A. *Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine) (2018).
- [19] Plakhotnyuk, M. *Nanostructured Heterojunction Crystalline Silicon Solar Cells with Transition Metal Oxide Carrier Selective Contacts* (2018).
- [20] MAROUF, Y. *Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra) (2019).
- [21] Feltin, E. *Hétéro-épitaxie de Nitrure de Gallium sur substrat de silicium (111) et applications* (Doctoral dissertation, Nice) (2003).
- [22] Kim, K., Lambrecht, W. R., & Segall, B. Elastic constants and related properties of tetrahedrally bonded BN, AlN, GaN, and InN. *Physical Review B*, 53(24), 16310. cations. *Journal of Crystal Growth* (1996)
- [23] Mercier, J. P., Zambelli, G., & Kurz, W. *Introduction à la science des matériaux* (Vol. 1). PPUR presses polytechniques (1999).
- [24] Dupeux, M. *Science des matériaux*. Paris, France: Dunod (2004)
- [25] Hautakangas, S., Oila, J., Alatalo, M., Saarinen, K., Liskay, L., Seghier, D., & Gislason, H. P. Vacancy defects as compensating centers in Mg-doped GaN. *Physical review letters*, 90(13), 137402 (2003).
- [26] Philippe, A. *Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus* (Doctoral dissertation, Lyon, INSA) (1999).

Chapitre II : le rayonnement solaire et le photovoltaïque

II.1 Introduction

Une cellule solaire est un dispositif électronique qui transforme l'énergie solaire en énergie électrique. La base principale de cette transformation est l'effet photovoltaïque, un processus de conversion d'énergie lumineuse en courant électrique. La première partie de ce chapitre donne des notions générales sur l'énergie solaire et le spectre solaire. Ensuite, la deuxième partie décrit l'effet photovoltaïque, le principe de fonctionnement et les constituants de base d'une cellule solaire. La dernière partie de ce chapitre présente l'état de l'art des technologies photovoltaïques existantes.

II.2 Le soleil

Le Soleil est l'étoile la plus proche de notre planète. Elle apparaît sous la forme d'une sphère gazeuse de 696 000 km de rayon, soit 109 fois celui de la Terre, et qui est placée à $150 \cdot 10^6$ km de la Terre. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. Sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre ($1,99 \cdot 10^{30}$ kg). Notre Soleil est une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, et en moindre quantité de carbone, d'azote et d'autres éléments. Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre Terre, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère [1].

II.2.1 Le rayonnement solaire

La distribution des radiations lumineuses émises par le soleil est déterminée par la température de la surface de ce dernier, à savoir 5900 K environ. On considère que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir. Les satellites ont permis de mesurer avec précision le spectre réel solaire hors de l'atmosphère terrestre, qui diffère légèrement du spectre théorique du corps noir.

La Figure II.1 donne le spectre du corps noir à 5900 K et le spectre solaire réel hors atmosphère. Ces spectres montrent les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont comprise entre 0.2 μm (ultraviolet) et 4 μm (infrarouge); 97.5% de l'énergie est comprise dans la zone des longueurs d'onde inférieures à 2.5 μm , notamment dans la zone du rayonnement visible comprise entre 0.4 et 0.78 μm [1].

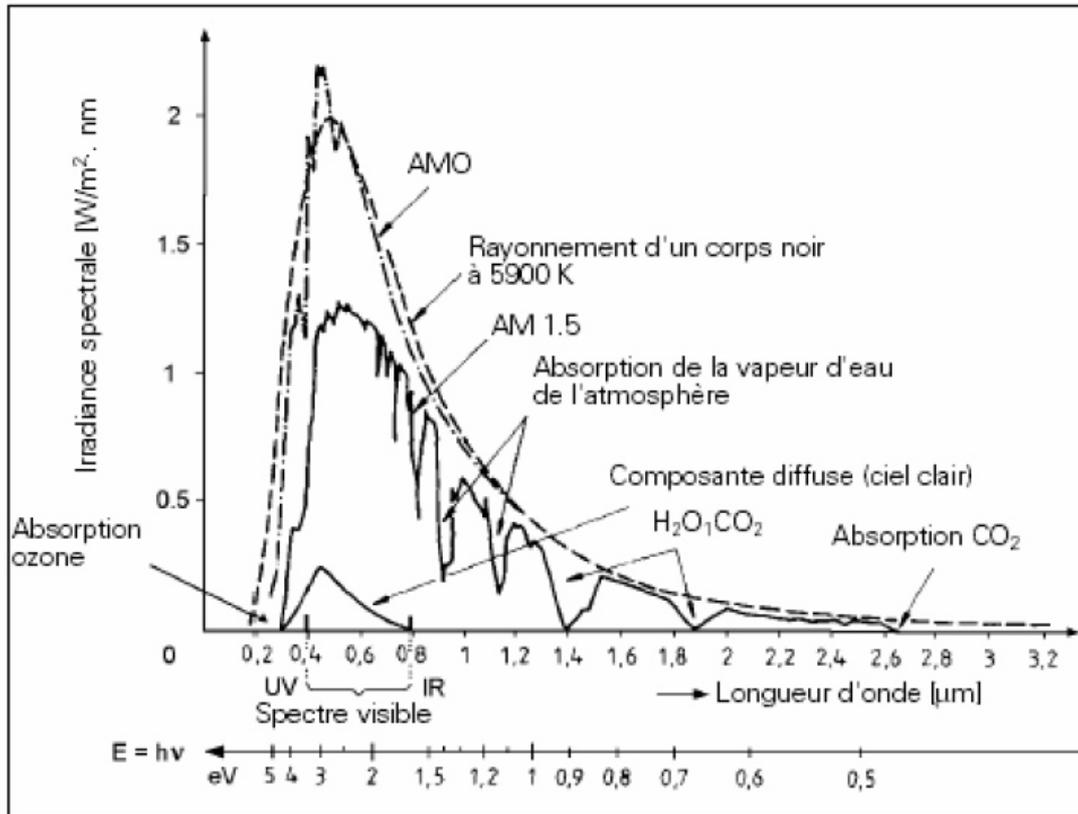


Figure II-1: Spectre du rayonnement solaire : a) hors atmosphère (AM0), b) au sol (AM1.5).

II.3 La cellule solaire

II.3.1 Historique

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

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

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

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

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

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [2].

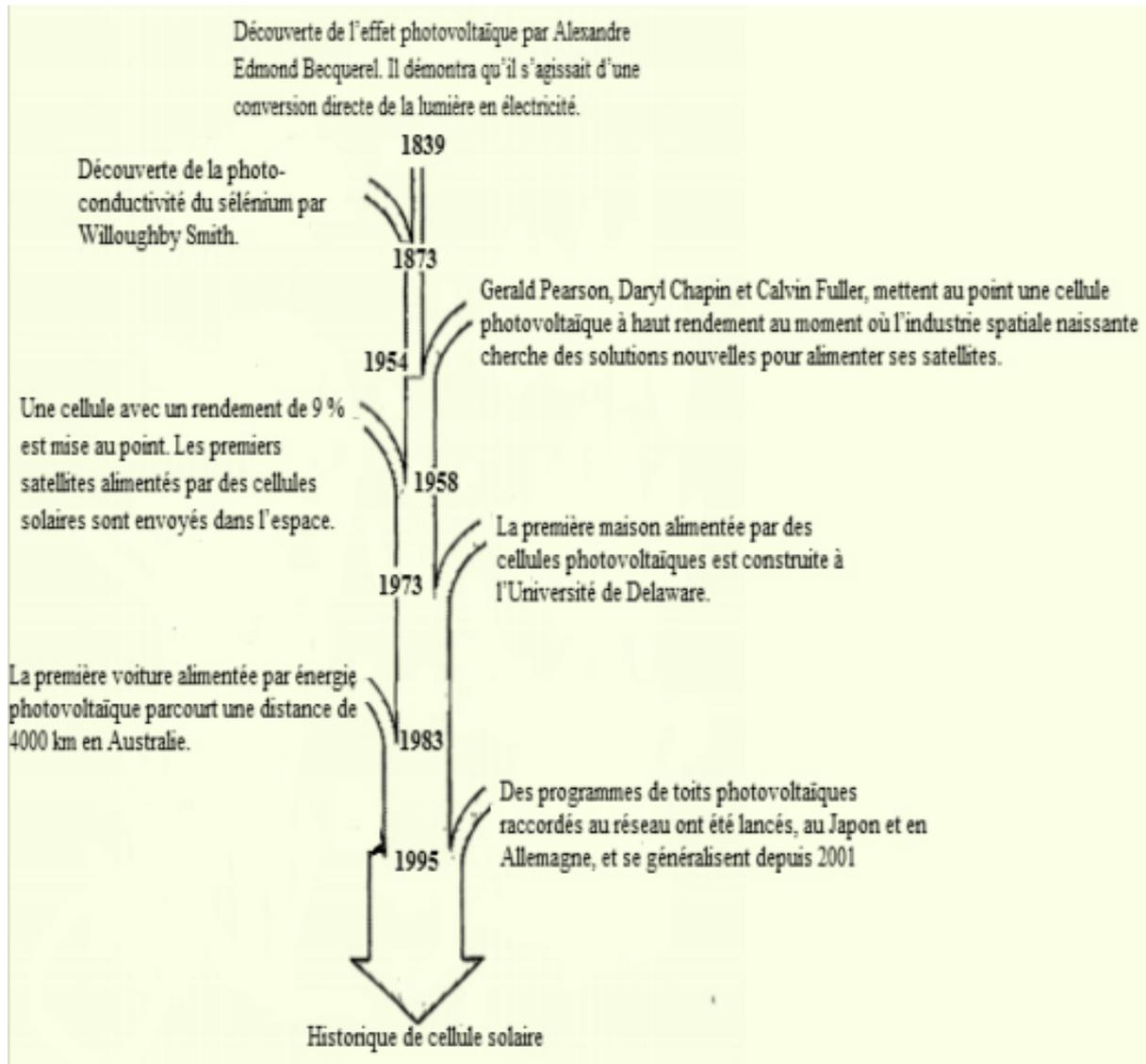


Figure II-2 : Historique de la cellule solaire

II.3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif permettant de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation d'énergie repose sur les trois mécanismes suivants [3]:

- L'absorption des photons dont l'énergie est supérieure au gap par le matériau constituant le dispositif ;
- La conversion de l'énergie absorbée du photon en charge électrique libre. Ceci correspond à la création d'une paire électron-trou dans le matériau semi-conducteur ;
- La collecte des particules générées dans un circuit électrique (le dispositif).

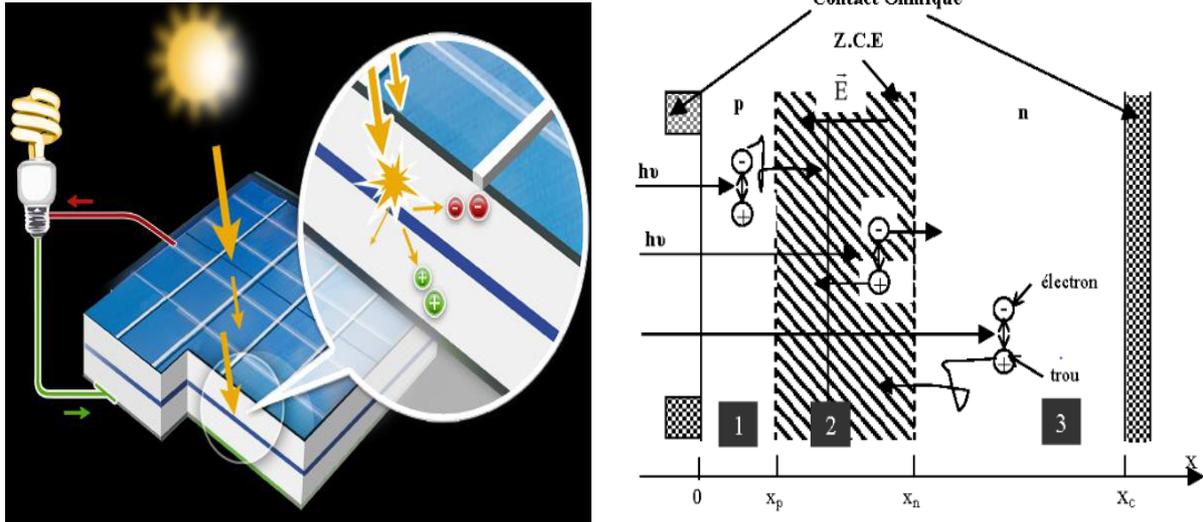


Figure II.3 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].

Le composant électronique le mieux adapté pour collecter les porteurs est la jonction PN. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure II.3. Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions 1, 2 et 3. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les régions électriquement neutres p et n, les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photocourant résultant. C'est un courant de porteurs minoritaires, il est proportionnel à l'intensité lumineuse [6].

II.3.3 Constitution d'une cellule solaire

La structure de base de la cellule solaire est présentée sur la figure II.4 et est composée d'une jonction PN. Cette jonction est réalisée en mettant en contact un semi-conducteur de type N et un autre de type P [3]. De chaque côté de la jonction PN, on dépose des électrodes métalliques afin de collecter les charges photogénérées. Sur la face avant, celle qui reçoit la lumière, l'électrode a une forme de grille afin d'optimiser la collecte des porteurs tout en laissant passer la lumière. Sur la face arrière, un contact métallique « plein » est déposé. Cette

couche sert également de couche réfléchissante pour les photons qui n'ont pas été absorbés à leur premier passage [6]. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-reflet (CAR). Le rôle de la couche anti-reflet est d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et la cellule pour minimiser la réflexion du flux de photons incident [1].

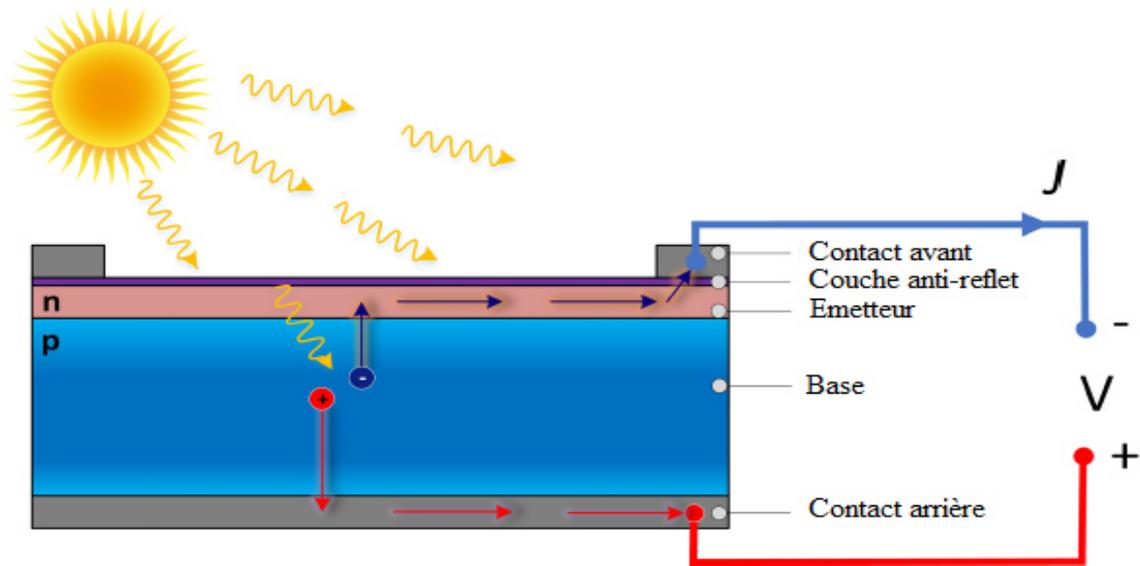


Figure II.4 structure d'une cellule solaire typique [7].

II.4 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension $I(V)$. Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire, comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Aussi on peut utiliser cette caractéristique pour contrôler et commander les paramètres physiques de la cellule tels que le dopage et l'épaisseur des couches. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe $I-V$ vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie [8].

II.4.1 Circuit électrique équivalent

Le modèle d'une cellule solaire idéale consiste en une diode en parallèle avec un générateur de courant. Néanmoins ce modèle ne décrit pas bien le cas réel. Pour pouvoir se rapprocher du cas réel, deux résistances sont ajoutées : une résistance série (R_s) et une résistance parallèle (R_{sh}) comme présenté dans la figure II.5.

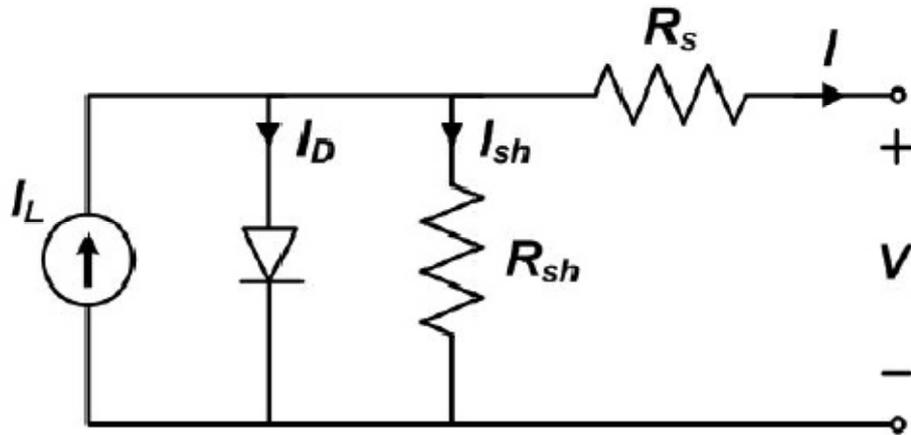


Figure II.5 Schéma électrique équivalent d'une cellule.

L'expression de la caractéristique courant-tension d'une jonction sous illumination est donnée par l'expression II.1. Dans le cas idéal la résistance de série $R_s=0$ et la résistance parallèle R_{shunt} est infinie.

$$I(V) = I_L - I_0 \exp\left(\frac{q(V+I \times R_s)}{K_B T}\right) - \frac{V+I \times R_s}{R_{sh}} = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{K_B T}\right) - 1\right) \quad (II.1)$$

Où I_L est le courant photo-généré, I_0 est le courant de saturation et K_B est la constante de Boltzmann [9].

II.4.2 Caractéristique I(V) et paramètres électriques

Une cellule solaire est caractérisée par sa caractéristique I(V) sous illumination et dans l'obscurité. Afin d'évaluer les performances d'une cellule photovoltaïque, plusieurs paramètres ont été définis qui peuvent être extraits à partir d'une courbe I(V) sous illumination (figure II.6) [9].

- La densité de courant de court-circuit I_{cc} exprimée en A/cm^2 représente la densité de courant qui circule à travers le dispositif sous illumination sans application de tension. Elle dépend ainsi de l'efficacité de collecte du courant généré et est ainsi liée aux mécanismes de recombinaisons volumique et surfacique. Par ailleurs I_{CC} est aussi lié aux pertes optiques de la cellule (réflexion et absorption).
- La tension de circuit ouvert (V_{CO}), exprimée en V, correspond à la tension obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul. Elle est dépendante des différentes recombinaisons de charges au sein du dispositif photovoltaïque. Ainsi, le V_{CO} est fortement dépendant des défauts initialement présents dans le substrat, du taux d'impureté

dans les zones surdopées ainsi que du taux de recombinaisons surfaciques lié à l'état de passivation de surface [10].

$$V_{CO} = \frac{K_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) \quad (\text{II.2})$$

c. La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation [10]:

$$P_m = V_m \times I_m \quad (\text{II.3})$$

d. Le facteur de forme FF exprimé en %, est le rapport de la puissance maximale débitée sur la puissance maximale théorique. Son expression est donnée par la Relation (II.4) avec I_m et V_m la densité de courant et la tension au point de puissance maximale. Il est limité par les pertes résistives et les courants parasites modélisés par les résistances R_s et R_{shunt} [11].

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (\text{II.4})$$

e. Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [12].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{P_{in}} \quad (\text{II.5})$$

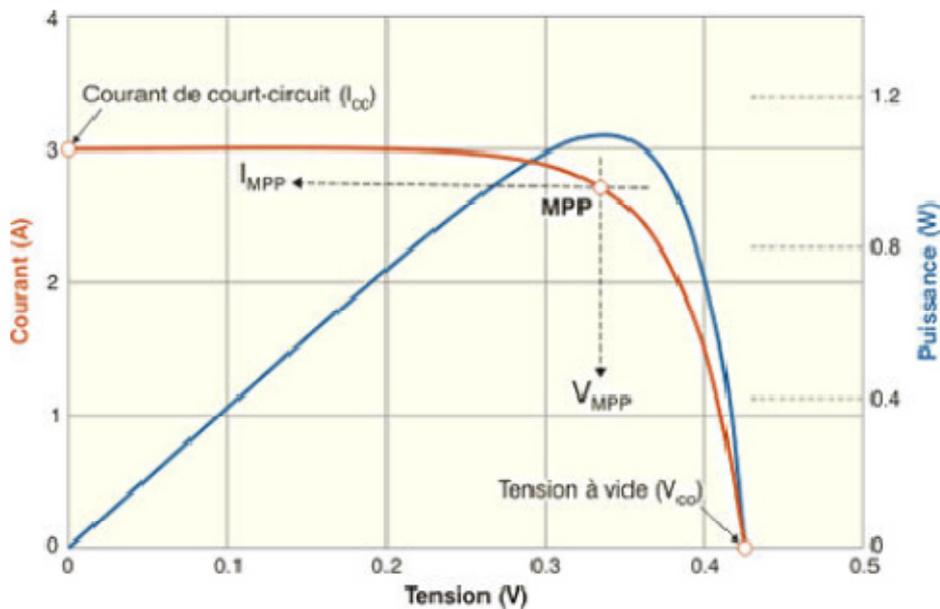


Figure II.6 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire [9].

f. Réponse spectrale d'une cellule solaire

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

$$RS = \frac{I_{CC}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (\text{II.6})$$

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

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda) \times \frac{hc}{\lambda e} \quad (\text{II.7})$$

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

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (\text{II.8})$$

Où **R** (λ) représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde [8].

II.5 Différentes technologies de cellules solaires

Le développement du solaire photovoltaïque s'est engagé sur la voie de l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires, avec la résolution simultanée de problèmes tels que la réduction de leur coût, l'extension de leur durée de vie et l'amélioration de la stabilité de fonctionnement dans un environnement variable (humidité, chutes de température ... etc.) [13]. Les technologies des cellules solaires ont été classées en trois générations.

- La première génération comprend principalement les cellules solaires en silicium cristallin (c-Si) (mono- et multi cristallines) [14]. Aujourd'hui, la technologie de silicium cristallin est largement utilisée dans la production PV, avec près de 95% de la production mondiale [15]. Le rendement de conversion pour une cellule solaire à simple jonction de silicium atteint 27% [16].
- La deuxième génération de cellules solaires comprend les couches minces de silicium amorphe (a-Si) ou une combinaison de silicium amorphe et microcristallin (a-Si/c-Si), les semi-conducteurs composés de tellure de cadmium (CdTe), les semi-conducteurs

composés de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium (CIS ou CIGS) ainsi que les matériaux III-V. Le marché PV pour la technologie à couche mince est dominé par les cellules solaires CdTe et CIGS. La part des cellules solaires de cette catégorie dans le marché PV pour l'ensemble des technologies à couches minces n'était que de 10 % en 2015.

- Les cellules solaires de troisième génération comprennent les cellules solaires organiques, à colorant, à puits quantique et à pérovskite [14]. Actuellement, l'accent est mis sur cette catégorie qui peut fournir des cellules économiques et de hautement efficacité qui peuvent émerger comme une nouvelle technologie dans un avenir proche, comme le montre la figure II.7 [16].

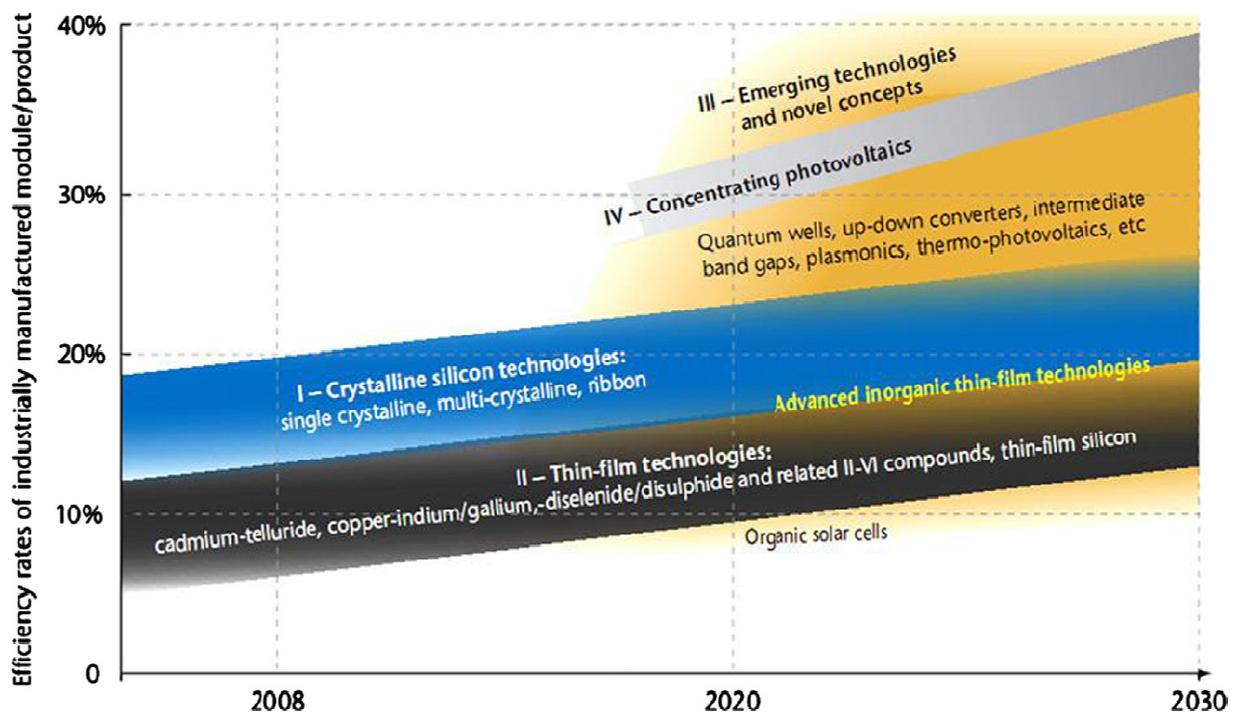


Figure II.7 Situation et perspectives de la technologie des cellules solaires [16]

II.6 Cellules solaires à base d'InGaN

L'idée d'utiliser des alliages InGaN pour la fabrication de cellules solaires, proposée par J. Wu dans une étude de 2003 intitulée "Superior Radiation Resistance of InGaN Alloys: Full Solar Spectrum Photovoltaic Materials", a révélé sa particularité. InGaN a un gap réglable et une résistance aux radiations. Depuis, plusieurs études se sont intéressées à ce type de matériau. L'application des alliages InGaN dans la fabrication de cellules photovoltaïques montre un grand potentiel. De plus, les études théoriques menées dans ce cadre ont donné des résultats très probants aussi bien pour les cellules multi-jonctions, les cellules à

hétérojonction, les cellules à homojonction[17]. Le tableau II.1 récapitule les données de la littérature des cellules solaires à base d'InGaN.

- **Cellules homojonction**

Dans la technologie homojonction à base d'InGaN, des études ont également été réalisées plusieurs différentes structures des cellules solaires. En 2009, Cai et al. Ont étudié les caractéristiques courant-tension de cellules à homojonction p-InGaN/i-InGaN/n-InGaN en fonction du pourcentage d'indium ($0,02 < x < 0,15$). Les meilleures performances sont atteintes pour les cellules possédant le moins d'indium, soit $\eta = 5,14\%$ pour une incorporation de 4% d'indium [18].

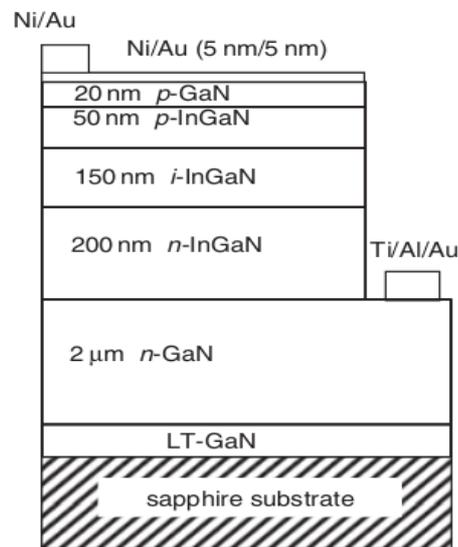


Figure II.8 Cellule solaire p-i-n proposée par Cai et al [18]

En 2013, Islam et al. Ont élaboré une structure homo-jonction $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ de type n^+p sur 0,65 µm de GaN. Sous (AM 1.5), ces auteurs obtiennent une tension en circuit ouvert de 1.4V et une densité de courant de court-circuit de $0,25\text{mA}/\text{cm}^2$. Pour améliorer les performances et augmenter les photons solaires capturés, le dispositif est ensuite fabriqué sur un substrat de GaN épais avec une incorporation en indium de 25%. Les caractéristiques de cette cellule solaire élaborée par MOVPE présentent une tension en circuit ouvert de 1,5V et une densité de courant à court-circuit de $0,5\text{mA}/\text{cm}^2$, un rendement de conversion très faible $\eta < 1\%$ [19].

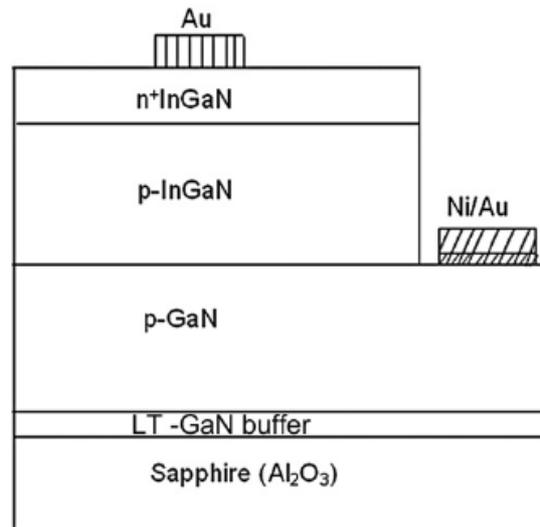


Figure II.9 Cellule solaire p-i-n homojonction proposée par Islam et al. [19].

- **Cellules solaires hétérojonction**

La technologie hétérojonction à base d'InGaN a été largement étudiée. En 2008, Neufeld et al. ont rapporté des résultats intéressants pour V_{co} de 1,81V, I_{cc} de 4,2mA/cm² et FF de 0,753, avec une puissance maximale de 5,7 mW/cm² (rendement de 4,4%) [20].

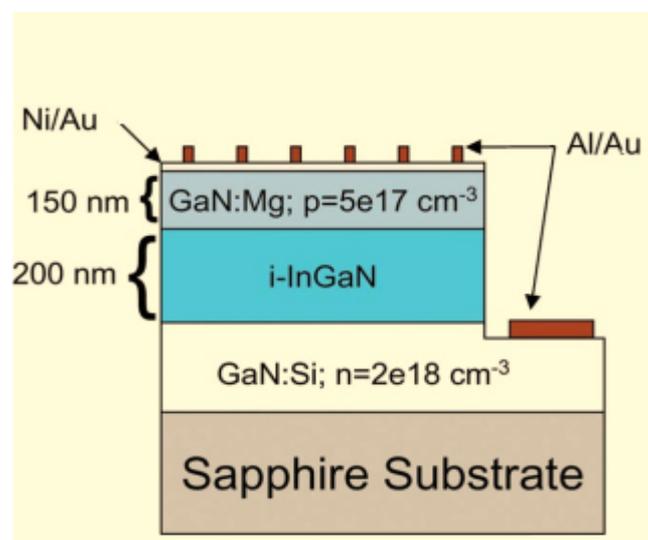


Figure II.10 Cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Neufeld et al [20].

En 2012, Tran et al. ont étudié une cellule photovoltaïque composée d'une couche active de 300nm d' $In_{0,4} Ga_{0,6}N$ (Figure II.11) dont le rendement de conversion atteint 7% [21].

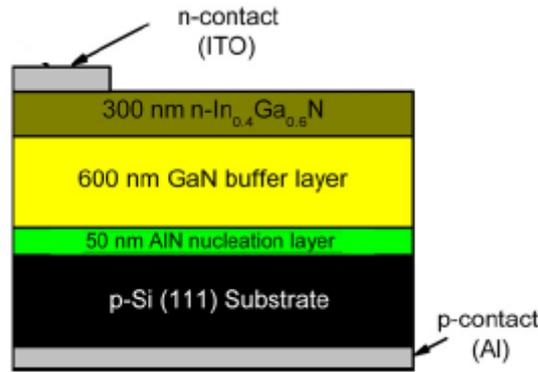


Figure II.11 Cellule solaire à hétérojonction n-In_{0.4}Ga_{0.6}N/p-Si proposée par Tran et al [21].

- **Cellules solaires à multijonction**

Plusieurs études ont également été réalisées sur la technologie multijonction à base d'InGaN avec différentes structures de cellules solaires. En 2008, Zhang et al. ont simulé une cellule solaire multijonction à base d'InGaN. C'est une structure composée de deux jonctions : la première avec une composition d'indium de 0,48 et la seconde avec une composition d'indium de 0,73. Ils obtiennent un rendement de conversion de 35,1% [22].

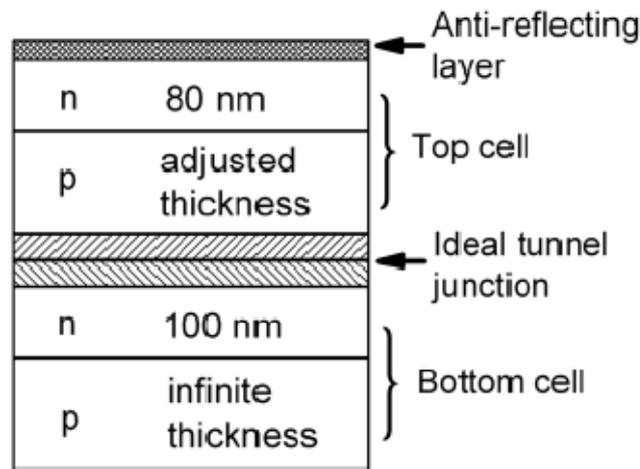


Figure II.12 Cellule solaire à double-jonction simulée par Zhang et al [22].

En 2014, Young et al. ont élaboré une structure multijonction avec une couche de puits quantiques InGaN/GaN. Ils ont utilisé un revêtement optique à large bande pour améliorer l'absorption de la lumière. Ils obtiennent un rendement de conversion de 3,33% avec un V_{CO} de 2,26 V et un I_{CC} de 2,97 mA/cm² [23].

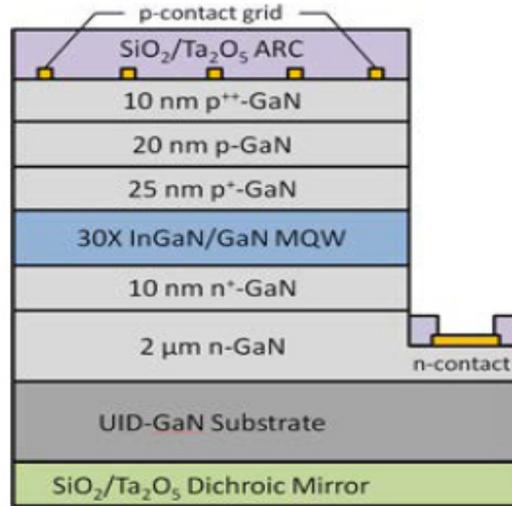


Figure II.13 Cellule solaire multijonction proposée par Young et al [23]

Tableau II.1 : Etat de l'art des cellules solaires à base d'InGaN.

Cellules solaires à homojonction à base d'InGaN		
2009	InGaN homojonction (AM1.5)	$V_{CO} = 2.24V, I_{CC} = 1.40mA/cm^2$ MOVPE [24]
2009	InGaN homojonction (AM1.5)	$V_{CO} = 2.36V, I_{CC} = 1.71mA/cm^2$ MOVPE [25]
2013	InGaN homojonction (AM1.5)	$V_{CO} = 1.5V, I_{CC} = 0.5mA/cm^2$ MOVPE [26]
2014	InGaN homojonction (AM1.5)	$\eta = 17\%$ simulation [27]
Cellules solaires à hétérojonction à base d'InGaN		
2007	InGaN/GaN (1soleil)	$V_{CO} = 2.4V, I_{CC} = 3.8mA/cm^2$ MOVPE [28]
2008	InGaN/GaN (AM0)	$V_{CO} = 1.81V, I_{CC} = 4.2mA/cm^2$ MOVPE [29]
2014	InGaN/GaN (AM1.5G)	$V_{CO} = 0.25V, I_{CC} = 6mA/cm^2$ MOVPE [30]
Cellules solaires multijonction à base d'InGaN		
2008	InGaN/GaN (AM1.5)	$\eta = 31\%$ simulation [31]
2008	InGaN homojonction (AM1.5)	$\eta = 35.1\%$ simulation [32]
2014	InGaN/GaN MQW (AM0)	$\eta = 3.33\%$ MOVPE [33]

II.7 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté l'énergie solaire et le spectre solaire, puis nous avons décrit le principe de fonctionnement et la structure de la cellule photovoltaïque. Les paramètres électriques de la cellule photovoltaïque sont aussi présentés. Dans la deuxième partie, nous avons présenté les différentes technologies photovoltaïques existantes et nous avons fini par présenter quelques résultats des études faites sur les cellules multi-jonctions, hétérojonction, et homojonction à base d'InGaN.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Bouzidi, K. Etude Comparative des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires (Doctoral dissertation) (2018).
- [2] Sayad, A., & Hmaizia, T. Technique d'optimisation déterministe pour La résolution de problèmes multidimensionnelles (2018)
- [3] Giudicelli, E. Evaluation d'une filière technologique de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-V)-Sb pour applications aux très fortes concentrations solaires (Doctoral dissertation, Université Montpellier) (2016).
- [4] Laiadi, W. Simulation numérique d'effet de la couche fenêtre $Al_xGa_{1-x}As$ sur la résistance aux irradiations spatiales d'une cellule solaire en arsenic de gallium (GaAs) (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra) (2015).
- [5] Mathieu, H., & Fanet, H. Physique des semiconducteurs et des composants électroniques-6ème édition: Cours et exercices corrigés. Dunod (2009).
- [6] Gorge, V. Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V (Doctoral dissertation, Paris 11) (2012).
- [7] Plakhotnyuk, M. Nanostructured Heterojunction Crystalline Silicon Solar Cells with Transition Metal Oxide Carrier Selective Contacts (2018).
- [8] MAROUF, Y. Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra) (2019).
- [9] Saket, O. Caractérisation électrique de nanofils de semi-conducteurs III-V pour des applications photovoltaïques (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay) (2020).
- [10] Bruhat, E. Développement de cellules photovoltaïques silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés (Doctoral dissertation, Université de Lyon) (2019).
- [11] Lanterne, A. Étude, réalisation et caractérisation de dopages par implantation ionique pour une application aux cellules solaires en silicium (Doctoral dissertation, Université de Grenoble) (2014).
- [12] Marouf, Y. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco (2013).
- [13] Milichko, V. A., Shalin, A. S., Mukhin, I. S., Kovrov, A. E., Krasilin, A. A., Vinogradov, A. V., ... & Simovski, C. R. Solar photovoltaics: current state and trends. *Physics-Uspekhi*, 59(8), 727 (2016).
- [14] Płaczek-Popko, E. Top PV market solar cells 2016. *Opto-Electronics Review*, 25(2), 55-64 (2017).

- [15] E. R. Weber, « Photovoltaics moving into the terawatt age », in Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion VIII, San Diego, United States, p. 202, doi: 10.1117/12.2277978 août 2017.
- [16] Abdin, Z., Alim, M. A., Saidur, R., Islam, M. R., Rashmi, W., Mekhilef, S., & Wadi, A. Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 26, 837-852 (2013).
- [17] O. Jani. Effect of phase separation on performance of III-V nitridesolarcells. Papier présenté à la22ème conférence européenne de l'énergie solaire photovoltaïque, 2007
- [18] Cai, X. M., Zeng, S. W., & Zhang, B. P. Fabrication and characterization of InGaN pin homojunction solar cell. *Applied Physics Letters*, 95(17), 173504 (2009).
- [19] Islam, M. R., Kaysir, M. R., Islam, M. J., Hashimoto, A., & Yamamoto, A. (2013). MOVPE growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \sim 0.4$) and fabrication of homo-junction solar cells. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(2), 128-136 (2013).
- [20] C. J. Neufeld, N. G. Toledo, S. C. Cruz, M. Iza, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra. High quantumefficiencyInGaN/GaN solarcellswith 2.95 eV band gap. *Applied PhysicsLetters*, 93(14) :143502, 2008.
- [21] TRAN, Binh-Tinh, CHANG, Edward-Yi, TRINH, Hai-Dang, et al. Fabrication and characterization of n-In_{0.4}Ga_{0.6}N/p-Si solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 102, p. 208-211 (2012).
- [22]ZHANG, Xiaobin, WANG, Xiaoliang, XIAO, Hongling, et al. Theoretical design and performance of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ two-junction solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no 24, p. 245104 (2008).
- [23] Young, N. G., et al. "High-performance broadband optical coatings on InGaN/GaN solar cells for multijunction device integration." *Applied Physics Letters* 104.16: 163902 (2014).
- [24] Cai, X. M., S. W. Zeng, and B. P. Zhang. "Favourable photovoltaic effects in InGaN pin homojunction solar cell." *Electronics letters* 45.24: 1 (2009).
- [25] Zeng, S. W., et al. "Substantial photo-response of InGaN p-i-n homojunction solar cells." *Semiconductor Science and Technology* 24.5 : 055009 (2009).
- [26] Islam, Md Rafiqul, et al. "MOVPE growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \sim 0.4$) and fabrication of homo-junction solar cells." *Journal of Materials Science & Technology* 29.2: 128-136(2013).
- [27] Fabien, Chloe AM, and W. Alan Doolittle. "Guidelines and limitations for the design of high-efficiency InGaN single-junction solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 130 : 354-363 (2014).

- [28] Neufeld, Carl J., et al. "High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap." *Applied Physics Letters* 93.14 : 143502 (2008).
- [29] Neufeld, Carl J., et al. "High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap." *Applied Physics Letters* 93.14 : 143502 (2008).
- [30] Çakmak, H., et al. "Indium rich InGaN solar cells grown by MOCVD." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 25.8 : 3652-3658 (2014).
- [31] Hsu, L., and W. Walukiewicz. "Modeling of InGaN/Si tandem solar cells." *Journal of Applied Physics* 104.2 : 024507 (2008).
- [32] Zhang, Xiaobin, et al. "Theoretical design and performance of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ two-junction solar cells." *Journal of Physics D: Applied Physics* 41.24 : 245104 (2008).
- [33] Young, N. G., et al. "High-performance broadband optical coatings on InGaN/GaN solar cells for multijunction device integration." *Applied Physics Letters* 104.16: 163902 (2014).

Chapitre III : Structure simulée et résultats de simulation

III.1 Introduction

La simulation numérique est aujourd'hui une technique cruciale et rentable pour étudier le mécanisme physique qui explique les propriétés fondamentales des dispositifs solaires, surtout sans fabriquer de dispositifs réels. Elle permet d'économiser du temps et de l'argent dans le développement des dispositifs. Plusieurs logiciels de simulation sont disponibles, tels que Quokka2, PC1D, ADEPT, OPV LAB, WXAMPS-1D, GPVDM-1D, AFORSHET et SCAPS-1D, afin de construire les structures des dispositifs solaires et d'explorer les propriétés fondamentales comme la densité de courant et les caractéristiques de tension, y compris le rendement de conversion de puissance du dispositif, le facteur de remplissage, la tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit.

Dans ce chapitre, nous allons simuler une cellule solaire homo jonction de type p-n à base d'InGaN par le logiciel SCAPS-1D. À fin de déterminer les valeurs optimales des paramètres photovoltaïques caractérisant la cellule solaire étudiée, tels que le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement ; nous allons étudier l'effet du dopage de l'émetteur et de la base sur les performances de la cellule solaire. L'influence de la fraction d'indium et de la variation des épaisseurs des couches, émetteur et base sont aussi simulés.

III.2 Le logiciel de simulation SCAPS-1D

SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator) est un programme de simulation unidimensionnel librement accessible aux groupes de recherche sur les cellules solaires, développé au département Électronique et Systèmes d'Information (ELIS) de l'Université de Gand, en Belgique [1]. SCAPS-1D a été initialement testé avec des cellules solaires à base des matériaux *CuInSe2* et *CdTe*, et maintenant ses capacités sont étendues à de nombreux dispositifs tels que les cellules cristallines et amorphes, c'est-à-dire *Si*, *GaAs*, *CIGS*, *CZTS*, *Perovskite*, etc. [1,2].

Plusieurs sections sont disponibles dans le panneau de démarrage de SCAPS-1D (voir Figure III.1) qui sont numérotées de 1 à 6.

- La section 1 montre la case "set problem" qui permet de définir une structure complète de cellule solaire contenant plusieurs couches et propriétés physiques.

- Dans la section 2, la case "action" permet de définir les paramètres de mesure des caractéristiques I-V, de l'efficacité quantique (QE ou IPCE), de la capacité-tension (C-V) et de la capacité-fréquence (C - f).
- Dans la section 3, la case "illumination" permet de sélectionner les conditions de luminosité et d'obscurité pour la simulation et le fichier de spectre requis.
- Dans la section 4, la case "working point" nous permet de définir la température de fonctionnement ainsi que de décrire les résistances parasites, telles que les résistances série et shunt.
- La section 5 permet d'effectuer des calculs de type "single shot", "batch" et "curve fitting". De plus, les options de configuration de l'enregistrement et du script sont disponibles.
- Enfin, dans la section 6, la case "résultats of calculations" donne les options pour vérifier les résultats du dispositif simulé, comme la bande d'énergie (EB), les caractéristiques I-V, QE, etc.

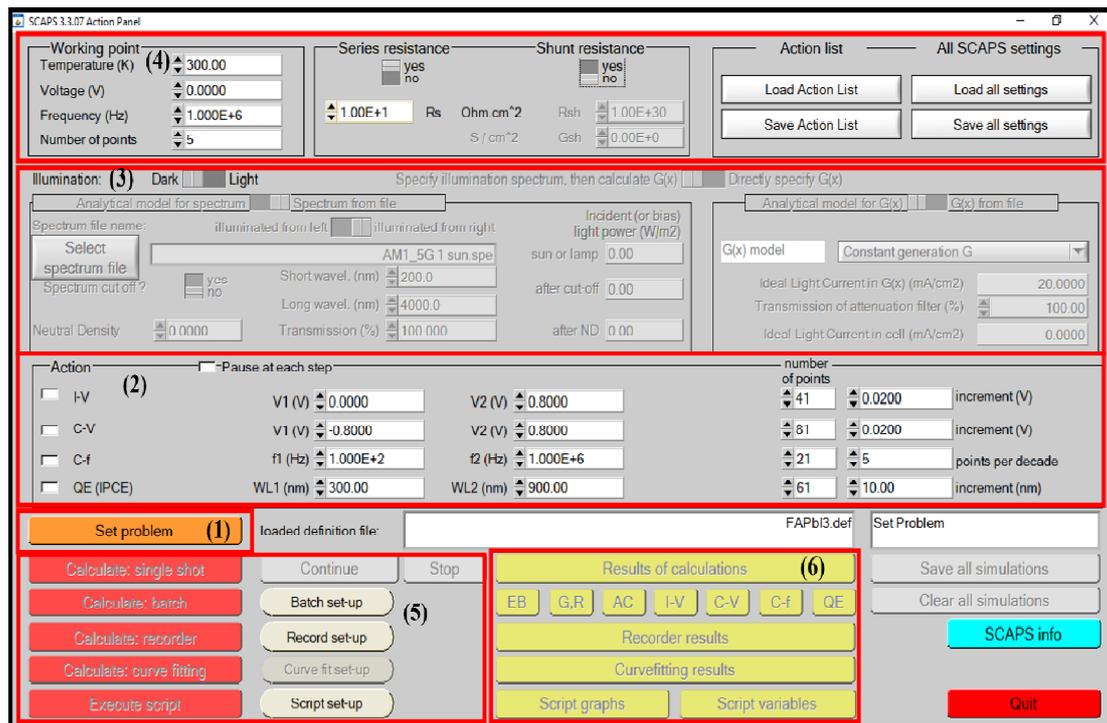


Figure III.1 Fenêtre principale du logiciel SCAPS-1D.

Dans la Figure III.2 trois sections différentes sont disponibles, et elles présentent les options permettant de construire la structure de cellule solaire désirée avec/sans la couche d'interface. La section 1 nous aide à définir les différentes couches pour compléter la structure du dispositif, y compris le contact avant et arrière. La section 2 affiche le dispositif construit, et il

contient d'autres options pour sélectionner la luminosité et la tension appliquée en utilisant soit le côté du contact avant, soit le côté du contact arrière. La section 3 est utile pour créer un nouveau fichier de structure ou charger un fichier disponible et enregistrer un fichier de structure de dispositif désiré.

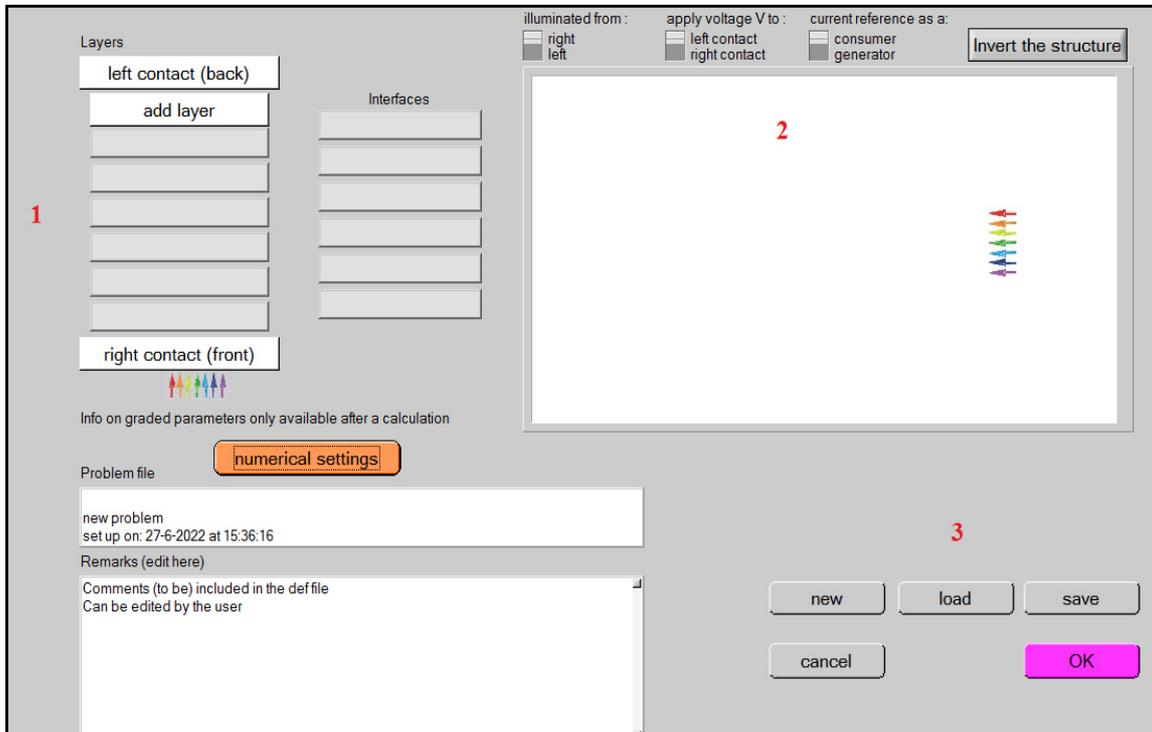


Figure III.2 panneau de définition de la cellule solaire sous SCAPS-1D.

La Fig III.3 présente le panneau de définition des matériaux et des défauts, qui permettent de définir les paramètres physiques de chaque couche, tels que E_g , χ , ϵ , N_C , μ_n , μ_p , N_A , N_D , T , le modèle d'absorption et N_t , etc.

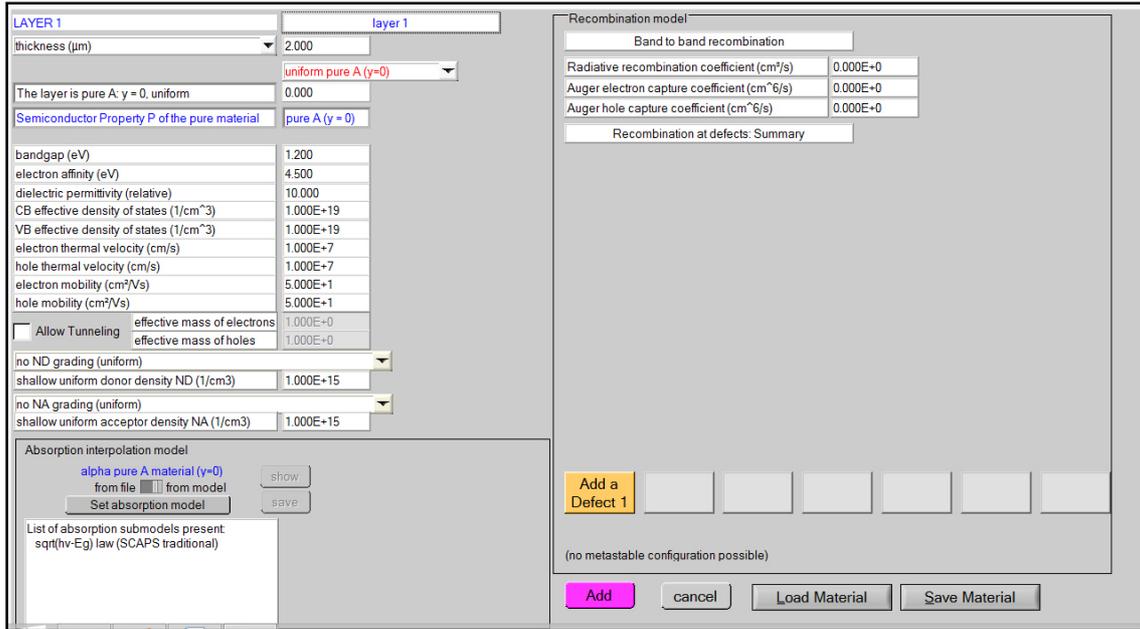


Figure III.3 Panneau de la définition des propriétés de chaque couche.

III.3 Optimisation d'une cellule solaire homo-jonction de type p-n

III.3.1 Paramètres des matériaux utilisés

Les différents paramètres utilisés pour la modélisation de la cellule solaire à simple jonction à base d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sont déterminés à partir des équations présentés au tableau III.1 [3].

Tableau III.1 Paramètres utilisés à la simulation.

Paramètre	GaN	InN	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$
$E_g (300K) (eV)$	3.42	0.7	$0.7X + 3.42(1 - X) - 1.43X(1 - X)$
$\chi (eV)$	8.9	15.3	$\chi(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 4.1 + 0.7(3.4 - E_g)$
E	4.1	5.6	$\varepsilon(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 15.3x + 8.9(1 - x)$
$N_C (\times 10^{17} \text{cm}^{-3})$	23	9.1	$9.1x + 23(1 - x)$
$N_V (\times 10^{19} \text{cm}^{-3})$	4.6	5.3	$5.3x + 4.6(1 - x)$
m_e	0.2	0.12	$0.12x + 0.2(1 - x)$
m_h	1.0	0.17	$0.17x + 1.0(1 - x)$

Les mobilités des porteurs dans les nitrures sont calculées en utilisant la relation de Caughey Thomas [3.4]:

$$\mu_m = \mu_{1m} \left(\frac{T}{300}\right)^{\alpha_m} + \frac{\mu_{2m} \left(\frac{T}{300}\right)^{\beta_m} - \mu_{1m} \left(\frac{T}{300}\right)^{\alpha_m}}{1 + \left(\frac{N}{N_m^{crit} \left(\frac{T}{300}\right)^{\gamma_m}}\right)^{\delta_m}} \quad (\text{III.1})$$

Où m représentant soit les électrons (e), soit les trous (h) T est la température, N la concentration des porteurs, α , β et γ des paramètres propres à chaque semi-conducteur(3).

III.3.2 Description de la Structure simulée

La structure modélisée sur ce travail est une structure homojonction de type p-n basé sur le matériau ternaire InGaN prise de la Référence [5]. La figure 1 présente la structure de la cellule étudiée et le tableau III.2 résume les valeurs des propriétés de la cellule de base simulée.

Tableau III.2 : Paramètres de cellule solaire simulée [5].

Paramètres	Valeurs
ϵ	13.38
χ (eV)	5.62
N_c (cm ⁻³)	1.32×10^{18}
N_v (cm ⁻³)	4.25×10^{19}
Dopage (cm ⁻³)	$N_A = 1 \times 10^{18}$
	$N_D = 1 \times 10^{18}$

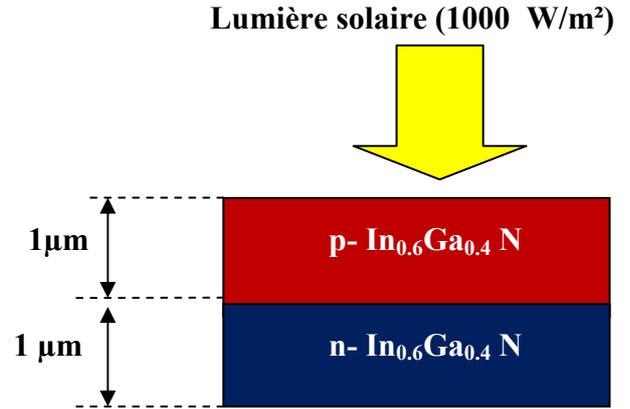


Figure III.4 structure de la cellule solaire [6].

III. 4 Effet de la variation de la fraction molaire d'indium

La dépendance du rendement de conversion, du facteur de forme, de la densité de courant et de la tension en circuit ouvert de la cellule solaire à simple jonction In_xGa_{1-x}N à la composition d'indium a été étudiée dans cette partie. Le tableau III.3 Le tableau 2 présente les différentes valeurs des paramètres utilisés dans la simulation pour différentes compositions d'Indium.

Tableau III. 3 Paramètres de simulation à 300 K en fonction de x (composition d'indium).

X	E_g	N_c	N_v	m_n	m_h	ϵ	X
0.10	3.0193	2.16×10^{18}	2.150×10^{19}	0.192	0.9170	9.54	4.36649
0.20	2.6472	2.02×10^{18}	2.500×10^{19}	0.184	0.8340	10.18	4.62696
0.30	2.3037	1.88×10^{18}	2.850×10^{19}	0.176	0.7510	10.82	4.86741
0.40	1.9888	1.74×10^{18}	3.200×10^{19}	0.168	0.6680	11.46	5.08784
0.50	1.7025	1.60×10^{18}	3.550×10^{19}	0.160	0.5850	12.10	5.28825
0.60	1.4448	1.46×10^{18}	3.900×10^{19}	0.152	0.5020	12.74	5.46864
0.70	1.2157	1.32×10^{18}	4.250×10^{19}	0.144	0.4190	13.38	5.62901
0.80	1.0152	1.18×10^{18}	4.600×10^{19}	0.136	0.3360	14.02	5.76936

La figure III.5 donne la caractéristique I-V de la structure simulée en fonction de la composition d'indium, on remarque bien qu'il y a une augmentation dans la densité de courant et une diminution dans la tension en augmentant x.

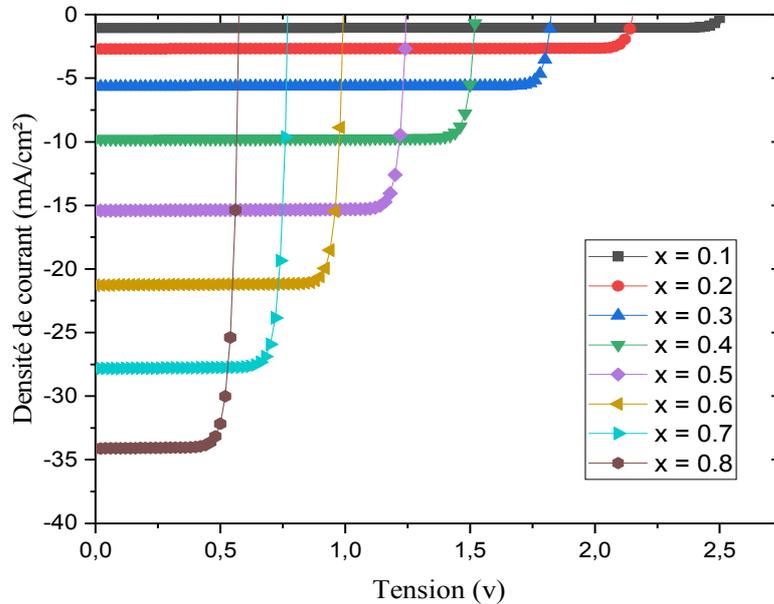


Figure III.5 caractéristique I-V de la cellule solaire en fonction de la fraction d'indium (x).

La figure III.6 présente les caractéristiques de sortie obtenues (V_{co} , I_{cc} , FF, η). Les résultats montrent que le courant de court circuit croît avec la composition d'indium; cette augmentation est due à la bonne absorption des photons lorsque x augmente (le gap est diminué), la tension en circuit ouvert et le facteur de forme diminuent avec la diminution de la largeur de la bande interdite, cette réduction due à des courants de fuite élevés, résulte d'une forte concentration d'indium. Le rendement de conversion croît lorsque x augmente, il atteint une valeur maximale pour un gap égal à 1.44 eV ($x=0.6$), après cette valeur le rendement décroît avec la diminution de E_g (x augmente).

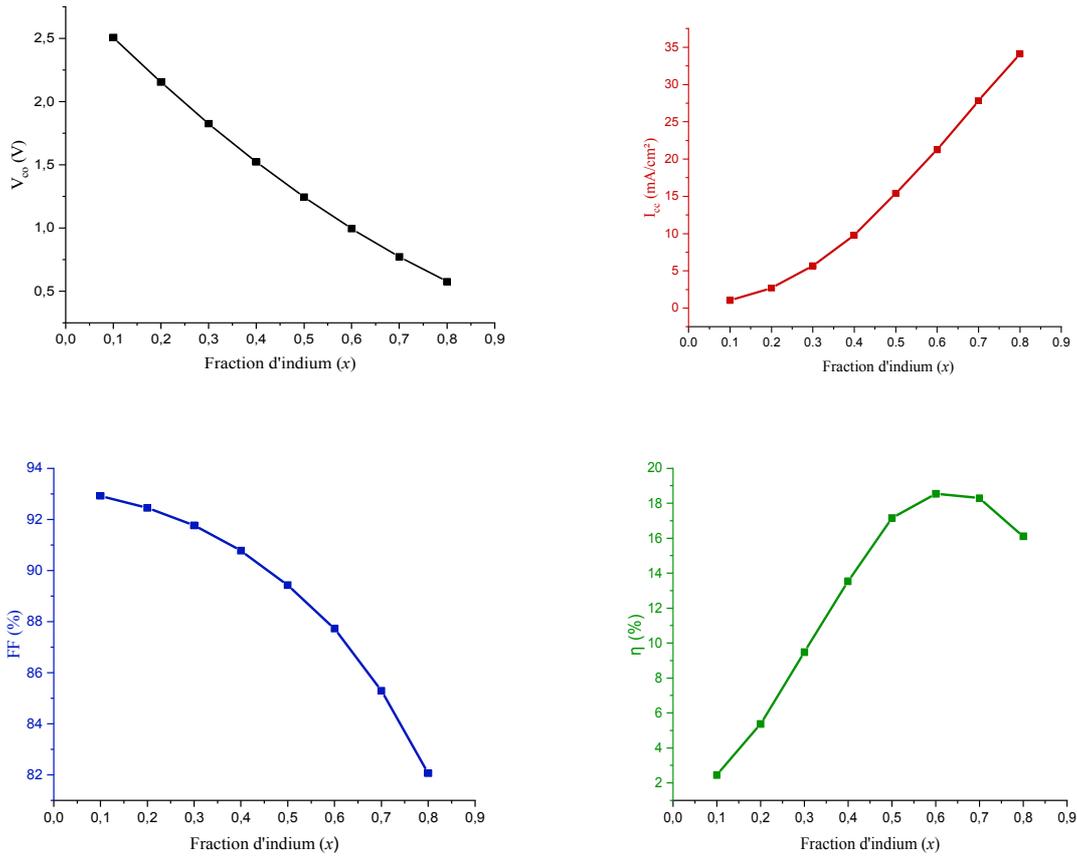


Figure III.6 Variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de la fraction d'indium.

III-5 Effet de la variation du dopage de l'émetteur (N_A)

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence du dopage de la couche émetteur (dopage type p), les autres paramètres sont fixés (pour x, on prend la valeur optimisé $x = 0.6$). Les résultats obtenus pour les différentes paramètres de la cellule (figures III.7 et III.8) montrent qu'il y a une augmentation de V_{CO} et une diminution de I_{CC} avec l'augmentation de la concentration du dopage type p. Le rendement de conversion atteint son maximum avec une valeur égale à 19.18% pour une concentration de dopage $N_A = 5.10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

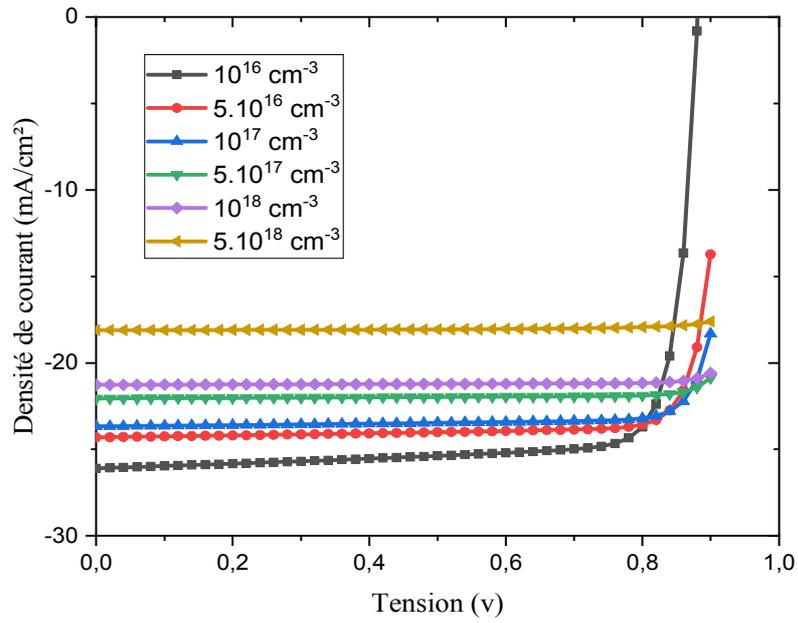


Figure III.7 Caractéristique I-V en fonction de N_A .

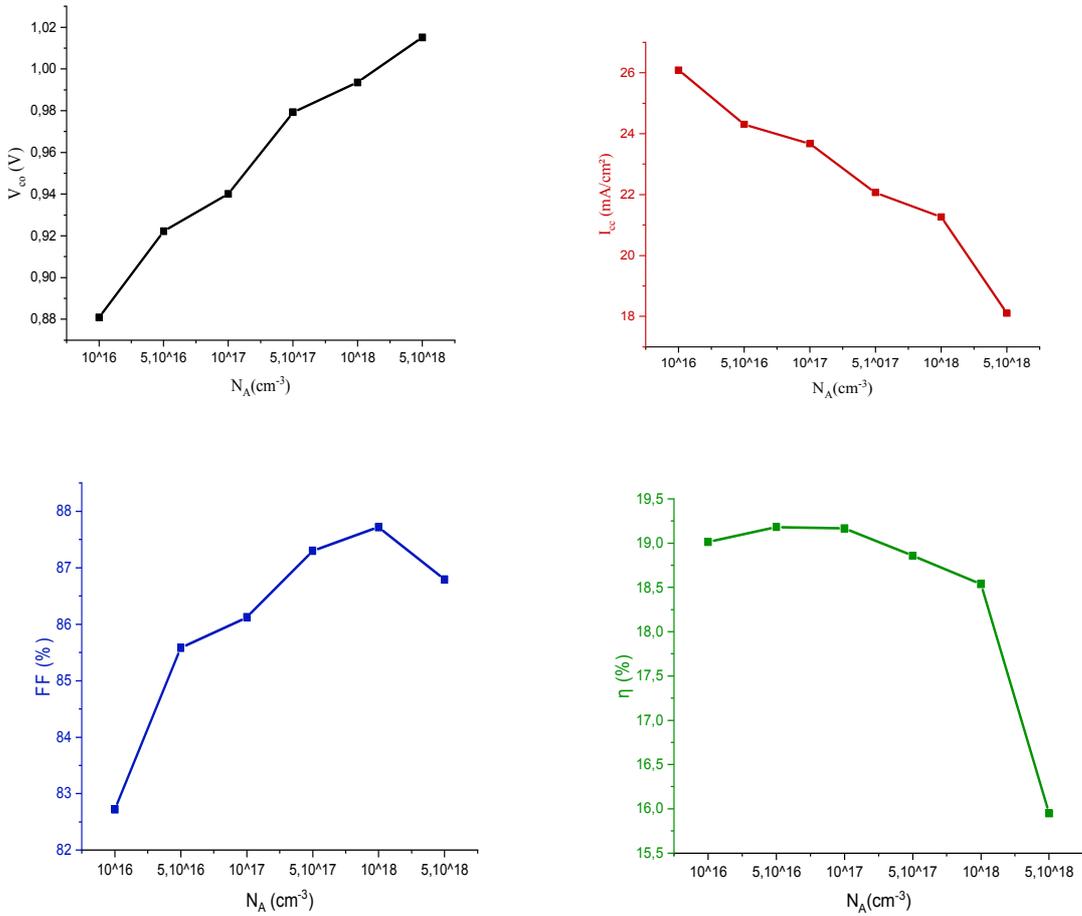


Figure III.8 Variations de FF, V_{CO} , J_{SC} et η en fonction de N_A .

III-6 Effet de la variation du dopage de la base (N_D)

Dans cette étude, nous simulons l'effet du dopage de la base sur les caractéristiques de la cellule solaire. Pour la fraction d'indium et le dopage de l'émetteur, on prend les valeurs optimales montrées précédemment ($N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $x = 0.6$). Les figures III.9 et III.10 présentent la caractéristique I-V et les valeurs des paramètres électriques de la cellule obtenues. Les résultats montrent que L'augmentation du dopage de la base entraine une légère augmentation dans la densité du courant de court-circuit et dans la tension de circuit ouvert et par conséquent une augmentation dans le rendement. Un meilleur rendement de $\eta = 19.18\%$ a été mesurée pour un dopage $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

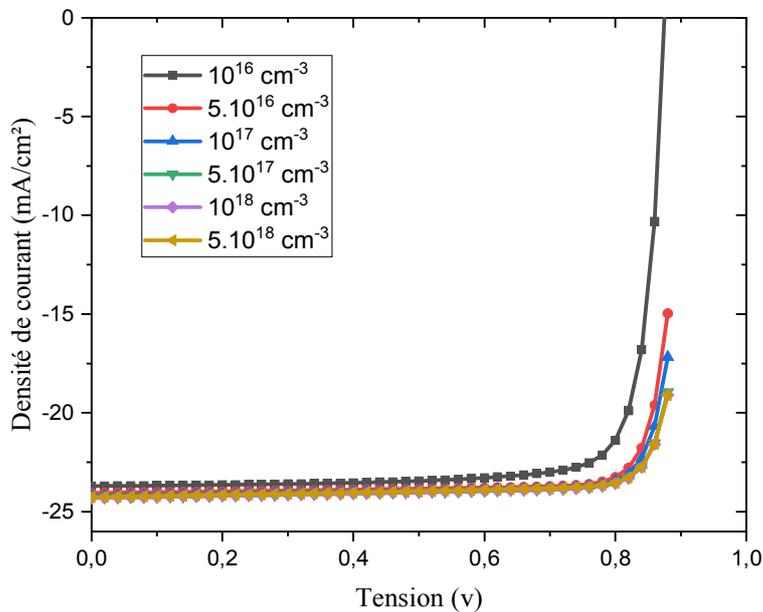


Figure III.9 Caractéristique I-V en fonction de N_D .

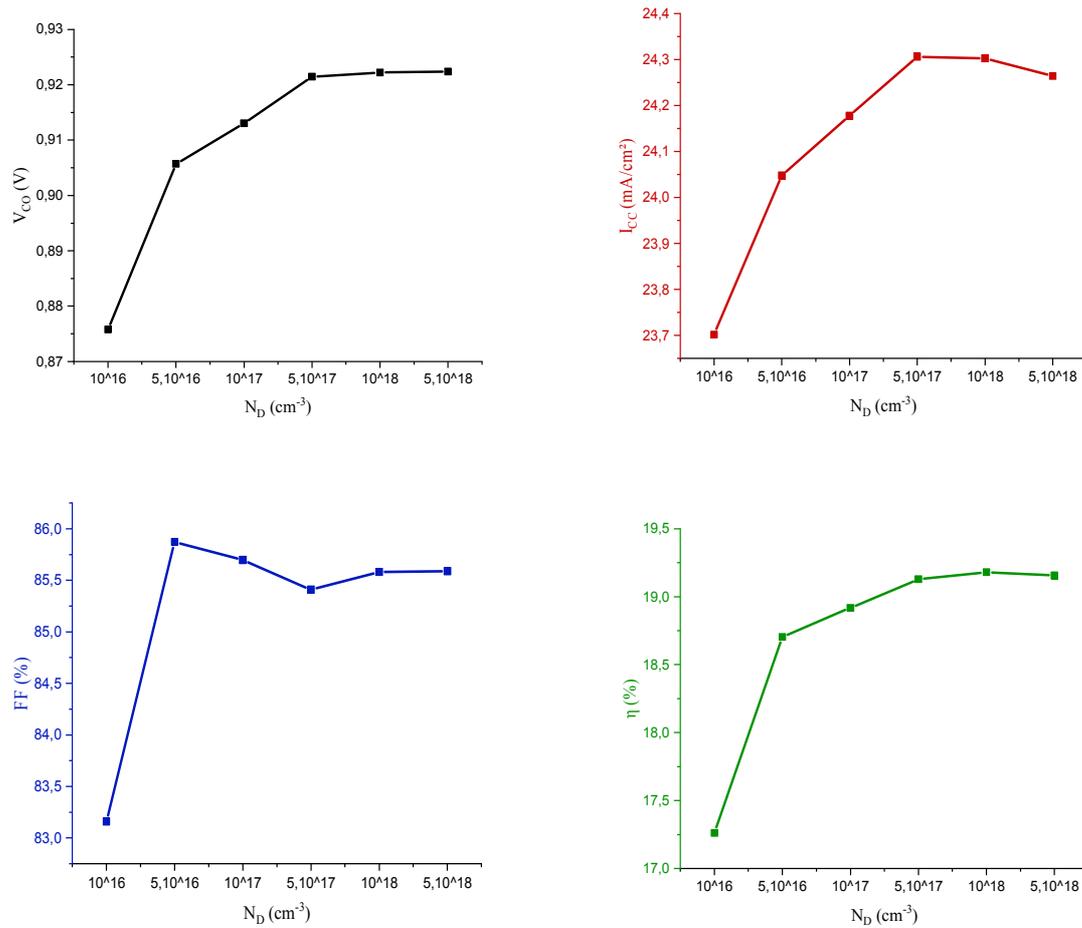


Figure III.10 Variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de N_D .

III.7 Effet de la variation de l'épaisseur de l'émetteur

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche p sur les performances de la cellule est aussi étudié (figure III.11 et III.12). Les résultats obtenus montrent la diminution de la densité de courant de court circuit avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche P ; lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente, la distance entre la région de charge d'espace et la surface augmente et par conséquent la recombinaison surfacique devient importante et la photogénération est réduite. On remarque qu'il y a une légère augmentation de V_{CO} et de FF. Le rendement maximal est obtenu à une épaisseur égale à $0.2 \mu\text{m}$ avec une valeur $\eta=23,61\%$.

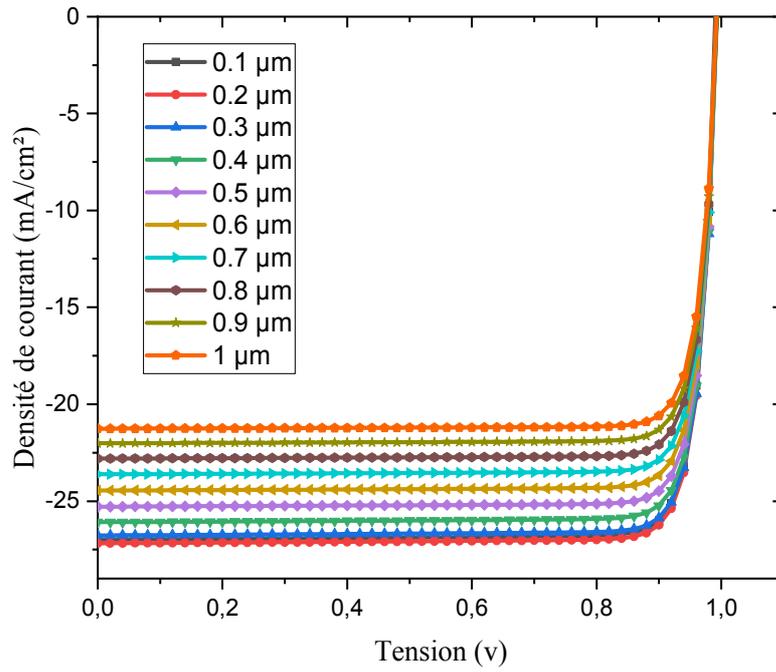


Figure III.11 Caractéristique I-V en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

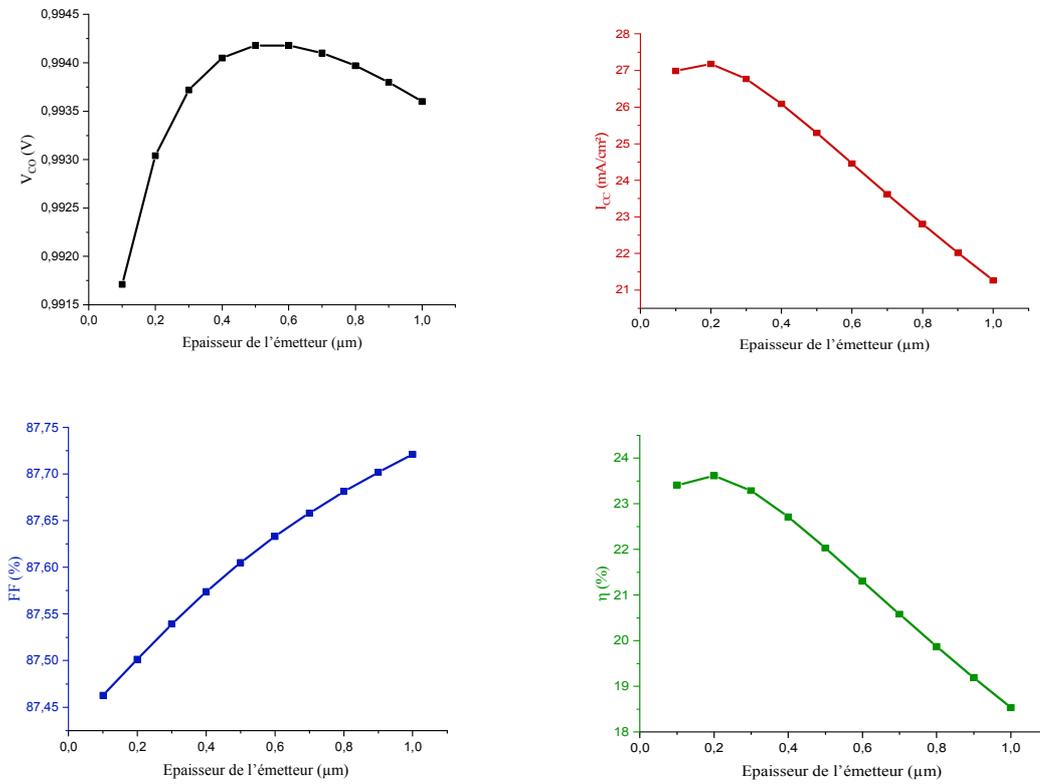


Figure III.12 Variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

III.8 Effet de la variation de l'épaisseur de la base

Dans la dernière partie, nous étudions l'influence de la variation de l'épaisseur de la base sur les performances de la cellule ; pour les autres paramètres de la cellule, on prend les valeurs optimisées dans les études précédentes faites dans ce travail. Comme il est montré dans les figures III.13, qui donne la caractéristique I-V en fonction de l'épaisseur de la couche n et la figure III.14, qui présente la variation de FF, V_{CO} , I_{CC} et η en fonction de l'épaisseur. Les résultats obtenus présentent une amélioration dans les différents paramètres de la cellule lorsque l'épaisseur de la base augmente, un rendement de conversion maximal de valeur $\eta=23,61\%$ est mesuré pour une épaisseur égale à $1\mu\text{m}$.

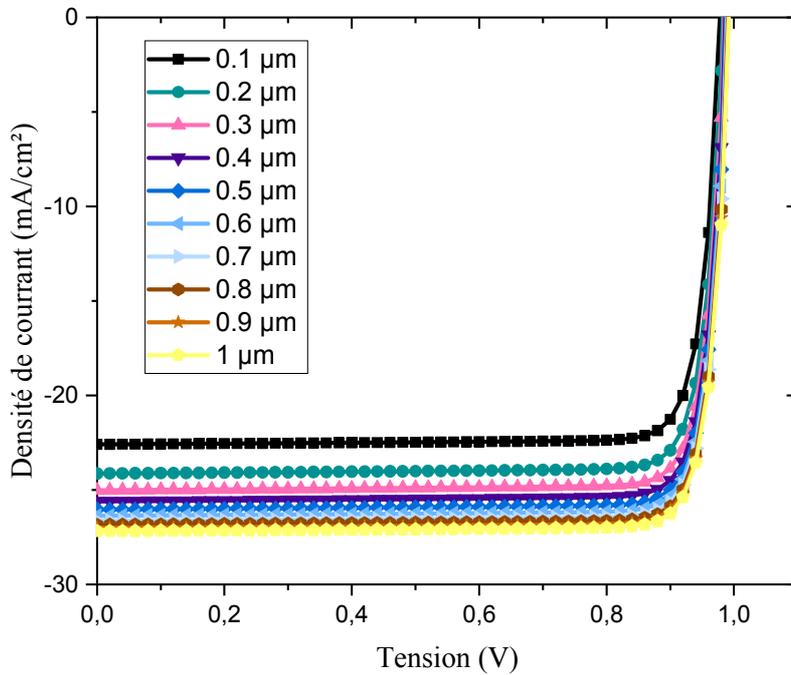


Figure III.13 Caractéristique I-V en fonction de l'épaisseur de la base.

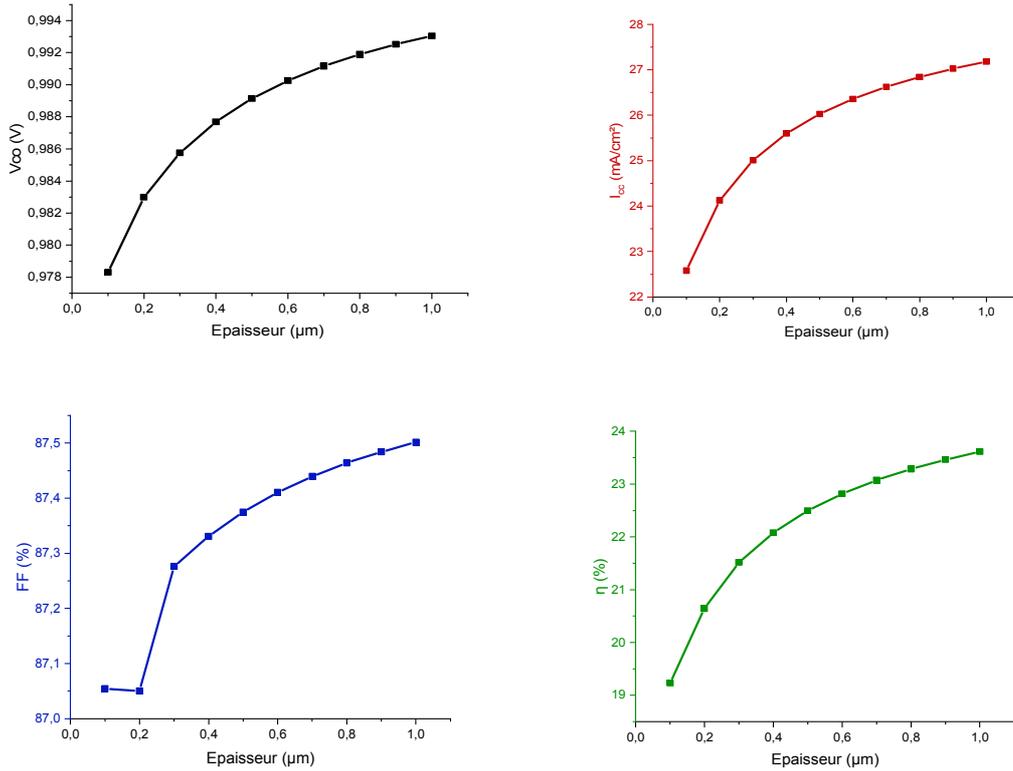


Figure III.14 Variation de FF, V_{co} , I_{cc} et η en fonction de l'épaisseur de la base.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé une cellule solaire à base d'InGaN de type p-n en utilisant le simulateur SCAPS, nous avons étudié l'effet de la variation des différents paramètres physiques et géométriques de la cellule, tels que la fraction molaire, le dopage et l'épaisseur des deux couches émetteur et base, sur les caractéristiques électrique de la cellule (V_{co} , I_{cc} , FF et η). Le tableau III.4 récapitule les valeurs optimisées des différentes caractéristiques de la cellule solaire étudiée. La caractéristique I-V de la cellule optimisée ainsi que le rendement quantique externe sont présentés dans la figure III.15.

Tableau III.4 les valeurs optimisées des paramètres de la cellule.

V_{co} (V)	I_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0,99	27,17	87,50	23,61

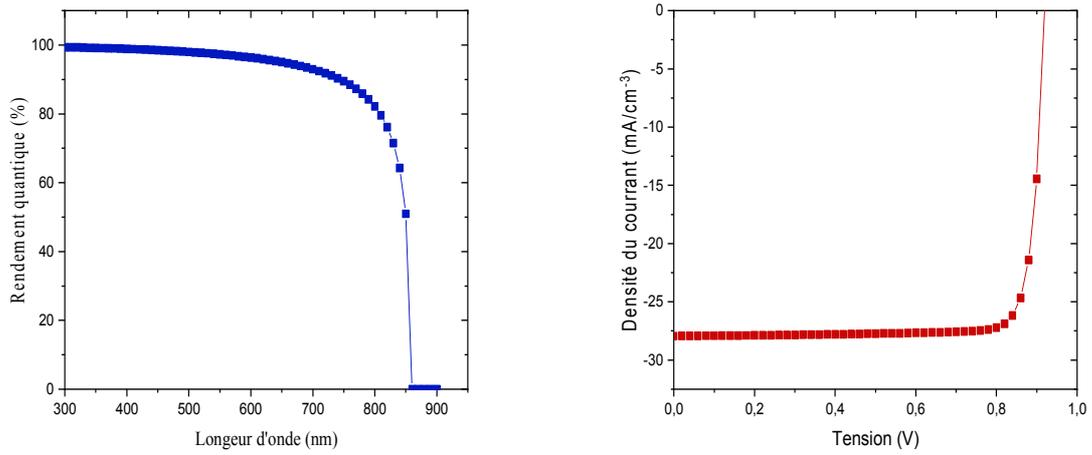


Figure III.15 Efficacité quantique externe et caractéristique I-V de la cellule solaire optimisée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Sekar, K. Cellules solaires pérovskite hybrides à base de formamidinium-césium (FA-Cs): Simulation et analyse expérimentale (Doctoral dissertation, Université de Limoges; El Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del Insituto Politécnico National. Cinvestav (Méxique)) (2021).
- [2] Mahfoud, A. Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement (Doctoral dissertation) (2018).
- [3] Chandra, V., Dwivedi, A. D. D., & Sinha, N. TCAD based performance assessment of Indium Gallium Nitride based single junction solar cells for different mole fractions of Indium. *Optical and Quantum Electronics*, 53(2), 1-15 (2021).
- [4] Marouf, Y., Dehimi, L., Bouzid, F., Pezzimenti, F., & Della Corte, F. G. Theoretical design and performance of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ single junction solar cell. *Optik*, 163, 22-32 (2018).
- [5] Hernández-Gutiérrez, C. A., Morales-Acevedo, A., Cardona, D., Contreras-Puente, G., & López-López, M. Analysis of the performance of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ based solar cells. *SN Applied Sciences*, 1(6), 1-7 (2019).
- [6] Manzoor, H. U., Zawawi, M. M., Pakhuruddin, M. Z., Ng, S. S., & Hassan, Z. High conversion and quantum efficiency indium-rich p-InGaN/p-InGaN/n-InGaN solar cell. *Physica B: Condensed Matter*, 622, 413339 (2021).

CONCLUSION GENERALE

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le Soleil. Elle constitue donc une vraie alternative efficace aux énergies fossiles à plusieurs titres: elle est inépuisable, elle peut être produite localement et selon les besoins locaux, elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets et n'entraîne aucun risque majeur et aucune nuisance significative. Cette énergie est produite par un dispositif (cellule solaire photovoltaïque ou photopile) qui transforme l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie électrique.

L'objectif de ce travail est d'étudier et simuler une cellule solaire de structure p-n à base d'InGaN par le logiciel SCAPS. Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques cristallines, électriques et optiques du matériau InGaN. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement et les caractéristiques principales d'une cellule photovoltaïque en général et la cellule solaire en InGaN en particulier. Le troisième chapitre décrit logiciel SCAPS-1D, qui est utilisé pour la simulation électrique des cellules solaires, et présente les résultats de l'étude réalisée.

Ce travail nous a permis de mieux appréhender les propriétés de ce matériau et de participer à l'optimisation d'une cellule solaire à base d'InGaN. Nous avons étudié principalement l'influence de l'épaisseur, la fraction d'indium et du dopage des différentes couches (émetteur, base) sur les performances de la cellule. Les résultats obtenus après simulation de la cellule permettent de dire que nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 23,61 % avec un facteur de forme de 87,50 %, une densité de courant de court-circuit $I_{CC} = 27,17 \text{ mA/cm}^2$ et une tension de circuit ouvert $V_{CO} = 0,99 \text{ V}$.

Résumé

Depuis plus d'une décennie, les matériaux III-V sont largement étudiés pour des applications optoélectroniques dans l'UV et le bleu. En 2003, le gap d'énergie d'InN est abaissé à 0,7 eV ouvrant la voie à des alliages pouvant couvrir quasiment tout le spectre solaire. En particulier, l'alliage InGaN qui fut largement étudié pour des applications photovoltaïques grâce à sa large et modulable bande gap allant de 0.7 eV pour le nitrure d'indium à 3.42 eV pour le nitrure de gallium, à sa bonne absorption et à sa résistance à de fortes puissances. Dans ce travail de mémoire, nous avons étudié par simulation numérique une cellule solaire de structure p-n à base d'InGaN en utilisant le logiciel SCAPS. L'objet de ce travail est d'optimiser les performances de la cellule modélisée, pour ce faire nous avons étudiés l'influence de différents paramètres de la cellule sur ces caractéristiques électriques (I_{CC} , V_{CO} , FF et η). Les résultats obtenus présentent une amélioration dans le rendement de conversion de 18.29 % à 23.61%.

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

ملخص

منذ أكثر من عقد درست المواد III-V بشكل كبير نظرا لاستعمالاتها المتعددة في التطبيقات الكهروضوئية وخاصة في المجال الطيفي الموافق للأشعة فوق البنفسجية والزرقاء. أسفرت هذه الدراسات في عام 2003 عن إمكانية تخفيض فجوة الطاقة في InN إلى 0.7eV، مما سمح بتغطية الطيف الشمسي بأكمله تقريبا في سبائك InN. على وجه الخصوص تمت دراسة سبائك InGaN على نطاق واسع في التطبيقات الكهروضوئية نظرا لكبر عرض العصابة الكبير والقابل للتعديل الذي يتراوح بين 0.7eV و 3.42eV. في عملنا هذا قمنا بدراسة عددية لخلية شمسية ذات بنية p-n تعتمد على InGaN باستخدام برنامج SCAPS. الهدف من عملنا هذا هو تحسين مركبات الخلية الشمسية لدراسة تأثيرها على المردود (FF, V_{CO}, I_{CC}, η). النتائج المحصل عليها أعطت تحسنا في مردود الخلية الشمسية من 18.29% إلى 23.61%.

الكلمات المفتاحية: نترات الأنديموم و الغاليوم, الخلايا الشمسية, المحاكاة الرقمية, SCAPS.

Summary

For over a decade, III-V materials have been widely applied with optoelectronic applications in UV and blue. In 2003, the energy gap of InN was decreased to 0.7 eV, opening doors to alloys that can cover almost the solar spectrum. In particular, the InGaN alloy was extensively studied for photovoltaic applications due to its wide band gap that extends from 0.7eV for indium nitride into 3.2 eV for gallium nitride, as well as its good absorption attribute and its resistance to high powers. In this work, a InGaN-based solar cell was studied through numerical simulation using SCAPS software. The aim is to optimize the performance of the modeled cell by investigating the effect of several cell parameters on the electrical characteristics: I_{CC} , V_{CO} , FF and η . The obtained results revealed an improvement in the conversion efficiency from 18.29% to 23.61%.

Keywords: Indium Gallium Nitride, Solar cell, numerical simulation, SCAPS