



MEMOIRE

Présenté à la Faculté des Sciences
Département de Physique
Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN PHYSIQUE

Option : Matériaux, systèmes et énergies renouvelables

Par
LAHOUEL Asma

Sur le thème

***Influence de la température sur les
caractéristiques d'une cellule solaire à base
d'InGaN***

Soutenu le : 19 juin 2016

Devant le Jury :

Président :	Mr A. Berrayah	Professeur	Univ. Tlemcen
Encadreur :	M ^{me} A. Fardeheb	Maître de conférences	Univ. Tlemcen
Examineur :	Mr NE. Bibi Triki	Professeur	Univ. Tlemcen
Examineur :	Mr A. Benyoucef	Maître de conférences	Univ. Tlemcen

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Avant tous, nous remercions ALLAH de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de continuer le parcours scolaire de master malgré toutes les difficultés.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Madame A.Fardeheb Maître conférences à l'université de Tlemcen, de m'avoir encadré durant mon projet de fin d'études, sa patience et les nombreux conseils qu'elle m'a prodigués.

Je tiens à remercier Monsieur A.Berrayah professeur à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté la présidence du jury. J'adresse toute ma gratitude à Monsieur NE. Bibi Triki professeur à l'université de Tlemcen d'avoir répondu à notre invitation afin d'examiner ce travail. Je remercie aussi Monsieur A.Benyoucef, maître de conférences à l'université de Tlemcen d'avoir accepté de juger ce document, et qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon travail. Je les remercie pour le temps et de l'attention qu'ils ont consacrés à la lecture de mon manuscrit .

Ce travail a été effectué au Laboratoire d'unité de recherche, matériaux et énergies renouvelables (URMER) de l'université Abou bekr belkaïd de Tlemcen, sous la direction de monsieur le professeur T.Benouaz. Je le remercie sincèrement de m'avoir accueillie au sein du laboratoire et de nous avoir encouragé et conseillé tout le long de notre travail.

Dédicace

*A l'esprit honorable de mon cher père que
dieu l'accueille en son vaste paradis*

Résumé

Depuis plus d'une décennie, les matériaux III-V sont intensément étudiés pour des applications optoélectroniques dans l'UV et le bleu. En 2003, le gap d'énergie de l'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 fut largement étudié pour des applications photovoltaïques grâce à sa large couverture spectrale, ses bonnes caractéristiques électriques et sa résistance à de fortes puissances. Dans ce contexte, nous avons étudiés le fonctionnement des cellules photovoltaïques à base d'InGaN par la simulation numérique à deux dimensions sous éclairage avec un spectre AM1.5 effectuées sous SCAPS. Nous définissons une cellule de référence avec un ensemble de paramètres physiques, afin d'analyser leurs influences sur les caractéristiques de la cellule. Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus : le dopage, l'épaisseur de l'émetteur, ainsi que la température qui est le sujet constitutionnel de ce mémoire.

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

ملخص

لأكثر من عقد من الزمن، ودراسة المواد III-V مكثف للتطبيقات الضوئية في الأشعة فوق البنفسجية والزرقاء. في عام 2003، فجوة طاقة InN انخفض فنزل الى 0.7 فولت مما مهد الطريق للسبائك التي يمكن أن تغطي تقريبا الطيف الشمسي بأكمله. على وجه الخصوص، ودرس على نطاق واسع سبيكة InGaN للتطبيقات الضوئية من خلال تغطية واسعة الطيف، خصائصه الكهربائية جيدة ومقاومة عالية للقوى. في هذا السياق، درسنا وظائف الخلايا الضوئية على أساس InGaN عن طريق المحاكاة الرقمية في بعدين تحت إضاءة مع الطيف AM1.5 تتم باستعمال SCAPS. نحدد مرجع الخلية مع مجموعة من المعلمات الفيزيائية، من أجل تحليل تأثيراتها على خصائص الخلية. وهكذا، تم اختيار العديد من المعلمات: التنشيط، سمك المرسل، وكذا درجة الحرارة، و تعتبر الموضوع الجوهرى في هذه المذكرة.

الكلمات المفتاحية : نتريد الإنديوم الغاليوم، الخلايا الشمسية، درجة الحرارة، المحاكاة الرقمية، سكابس.

Abstract

For over a decade, the III-V materials are intensely studied for optoelectronic applications in the UV and blue. In 2003, the energy gap of InN is lowered to 0.7 eV paving the way for alloys that can cover almost the entire solar spectrum. In particular, the InGaN alloy was widely studied for photovoltaic applications through its wide spectral coverage, its good electrical properties and resistance to high powers. In this context, we studied the operation of photovoltaic cells based on InGaN by numerical simulation in two dimensions under illumination with an AM1.5 spectrum performed under SCAPS. We define a reference cell with a set of physical parameters, in order to analyze their influences on the characteristics of the cell. Thus, several parameters were selected: doping, the thickness of the issuer, and the temperature which is the constitutional about this memory.

Keywords: Nitride Indium Gallium, solar cells, temperature, numerical simulation, SCAPS.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : la conversion photovoltaïque	
1.1. Introduction :.....	4
1.2. L'énergie solaire :.....	4
1.2.1. Le soleil :	5
1.2.2. Le Spectre solaire :.....	5
1.3. La cellule photovoltaïque:.....	7
1.4. Les différentes structures des cellules photovoltaïques:	9
1.4.1. Les cellules à base de silicium cristallin :.....	9
1.4.2. Les cellules photovoltaïques en couches minces :	10
1.4.3. Les hétérostructures :	10
1.4.3.1. Structure MIS :	10
1.4.3.2. La structure Schottky :.....	10
1.4.3.3. Semiconducteur1-semiconducteur2 :.....	11
1.4.4. Les cellules multijonctions :	11
1.4.5. Les cellules photovoltaïques organiques :	11
1.4.6. Les cellules hybrides:	12
1.5. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :	13
1.6. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire :	14
1.7. Paramètres de la cellule solaire :	15
1.7.1. Courant de court circuit, I_{cc} :.....	16
1.7.2. Tension de circuit ouvert, V_{co} :	16
1.7.3. Facteur de forme, FF :.....	16
1.7.4. Rendement de conversion, η :.....	16
1.8. Groupement des cellules solaires :	17
1.9.1. Branchement série :	18

1.9.2. Branchement parallèle :	18
1.9.3. Branchement mixte :	19
1.9. Conclusion :	20
Chapitre 2 : Description du nitrure gallium'indium (InGaN)	
2.1. Introduction :	22
2.2. Historique :	24
2.3. Description du nitrure d'Indium-Gallium :	25
2.3.1. Caractéristiques structurales :	25
2.3.2. Propriétés électriques :	27
2.3.2.1. Gap d'énergie dans les nitrures :	28
2.3.2.2. Caractère intrinsèque de type n dans les nitrures :	32
2.3.2.3. Mobilité des porteurs dans les nitrures :	33
2.3.2.4. Longueur de diffusion :	34
2.3.3. Propriétés thermiques :	36
2.3.1.1. Conductivité thermique :	36
2.3.1.2. Expansion thermique :	36
2.4. Conclusion :	37
Chapitre 3 : Substrats et techniques	
3.1. Introduction :	39
3.2. Croissance et substrats :	39
3.2.1. Croissance sur saphir :	40
3.2.2. Croissance sur SiC :	41
3.2.3. Croissance sur AlN :	41
3.2.4. Croissance sur ZnO :	41
3.2.5. Croissance sur Si :	42
3.2.6. Croissance sur verre :	42
3.3. Dopage :	43

3.3.1.	Le dopage de type N :	44
3.3.2.	Le dopage de type P :	45
3.4.	Les techniques de caractérisation utilisées :	46
3.4.1.	Diffraction à Rayon-X Haute Résolution (<i>HRXRD</i>) :	46
3.4.2.	Microscope Electronique à balayage par Transmission (<i>STEM</i>) :	47
3.4.3.	Microscope à force atomique (<i>AFM</i>) :	48
3.5.	Cellule photovoltaïque à base d'InGaN :	50
3.5.1.	Simple jonction :	50
3.5.2.	Cellules hétérojonction pin :	51
3.5.3.	Cellules homojonction pin :	53
3.5.4.	Cellules InGaN/GaNMQWs :	55
3.6.	Conclusion :	55
Chapitre 4 : Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule d'InGaN, simulation et résultats		
4.1.	Introduction :	57
4.2.	Présentation du logiciel SCAPS :	57
4.3.	Simulation d'une cellule solaire à base d'InGaN :	58
4.3.1.	Description de la structure :	58
4.3.2.	Paramètres de simulation :	58
4.3.3.	Influence du dopage sur les caractéristiques de la cellule :	59
4.3.4.	Influence de l'épaisseur de l'émetteur d_E :	62
4.3.5.	Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule solaire d'InGaN:	65
4.3.6.	La caractéristique I-V de la cellule solaire à base d'InGaN :	69
4.4.	Comparaison avec des travaux similaires	71
4.5.	Conclusion.....	72
Conclusion générale.....		75
Bibliographie		77

Liste des figures

Figure 1 : Spectre électromagnétique.....	6
Figure 2 : Rayonnement solaire incident.....	7
Figure 3 : Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque simple.	7
Figure 4 : Schéma montrant la position des bandes de valence et de conduction dans un isolant, un semiconducteur et un métal.	8
Figure 5 : Effet de l'énergie de la lumière sur différentes bandes interdites Eg.	9
Figure 6 : Cellule solaire à structure MIS.....	10
Figure 7 : Cellule solaire à hétérojonction de type Schottky	10
Figure 8: Cellule solaire organique	12
Figure 9: Image d'une cellule Grätzel.....	12
Figure 10 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.....	13
Figure 11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à jonction PN.....	14
Figure 12 : Caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.....	15
Figure 13 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire.	17
Figure 14 : Association en série de N_s cellules solaires.....	18
Figure 15 : Association en parallèle de N_p cellules solaires identiques.....	19
Figure 16 : Association mixte de N_{SP} branches et de N_{MS} modules composés de N_c cellules solaires identiques.....	20
Figure 17: L'InGaN est composé des éléments de la colonne IIIA et de l'azote, N.	22
Figure 18 : Structure wurtzite, exemple du GaN	26
Figure 19 : Structure cubique zinc-blende, exemple du GaN.....	26
Figure 20: Diagramme des énergies pour un matériau.....	27
Figure 21 : Diagramme de bande du GaN à partir de la théorie de structure électronique des quasi-particules.....	28
Figure 22 : Diagramme de bande de l'InN avec la théorie de la structure électronique des quasi-particules.....	29
Figure 23: Evolution du gap d'énergie de GaN en fonction de la température. Les courbes A, B et C font référence aux excitons du même nom	31
Figure 24 : Evolution du gap d'énergie pour l'InN en fonction de la température.....	31

Figure 25 : Densité d'électrons et mobilité dans InN en fonction de l'épaisseur de la couche.	32
Figure 26 : Concentration d'électrons en fonction de la température dans $In_{1-x}Ga_xN$ avec différentes concentrations d'indium	33
Figure 27 : Mobilité des porteurs libres dans $In_{1-x}Ga_xN$ en fonction de la température.....	34
Figure 28 : Longueur de diffusion des trous dans GaN en fonction de la concentration d'électrons.	35
Figure 29 : Gap d'énergie de l'InGaN et des principaux substrats en fonction de leur paramètre de maille.	40
Figure 30: Mobilité des porteurs de charges à température ambiante en fonction de la concentration d'électrons.....	44
Figure 31: Mobilité des trous en fonction de la concentration de trous dans un film de P-GaN.	46
Figure 32 : Schéma de la mesure par diffraction à rayons X.....	46
Figure 33: Exemple de mesure en $2\theta/\omega$ selon la direction [002] pour un échantillon composé d'une couche d'InGaN avec 10 % d'indium, avec une épaisseur de 140 nm, sur une couche tampon de GaN.....	47
Figure 34: Schéma de fonctionnement d'un microscope électronique à balayage par transmission	48
Figure 35 : Schéma de fonctionnement d'un microscope à force atomique.	49
Figure 36: Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Jani et al.	51
Figure 37: Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Neufeld et al.....	52
Figure 38: Schéma de la cellule solaire pin à hétérojonction n- $In_{0,4}Ga_{0,6}N/p-Si$ proposée	52
Figure 39: Schéma de la cellule solaire pin à double hétérojonction proposée par Zeng et ...	53
Figure 40: Schéma de la cellule solaire pin proposée par Cai et al.	54
Figure 41: Schéma de la cellule solaire pin homojonction proposée par Islam et al.	54
Figure 42 : Schéma de la cellule solaire pin MQWs avec 12 périodes $InGaN(3nm)/GaN(17nm)$ proposée par Dahal et al.	55
Figure 43 : Structure de la cellule à simuler sous SCAPS.....	58

Figure 44 : Influence du dopage de l'émetteur N_a sur le courant de court circuit I_{cc} ($N_a=N_d$).	60
Figure 45 : Influence du dopage de l'émetteur sur la tension à circuit ouvert ($N_a=N_d$).	60
Figure 46 : Influence de dopage sur le facteur de forme.....	61
Figure 47 : Influence du dopage de l'émetteur sur le Rendement.	62
Figure 48 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le courant de court circuit.....	63
Figure 49 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension de court ouvert.....	63
Figure 50 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme.	64
Figure 51 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement de la cellule.	65
Figure 52 : Influence de la température sur le courant de court- circuit.....	66
Figure 53 : Influence de la température sur la tension de circuit-ouvert.....	67
Figure 54 : Influence de la température sur le facteur de forme.....	68
Figure 55 : Influence de la température sur le rendement.	68
Figure 56 : la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 278K(5°C), $I_{cc}=33.7 \text{ mA/cm}^2$	69
Figure 57 : la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 300K(27°C), $I_{cc}=33.75 \text{ mA/cm}^2$	70
Figure 58 : la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 400K(127°C) , $I_{cc}=27.1 \text{ mA/cm}^2$	70
Figure 59 : la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 500K(227°C) , $I_{cc}=26 \text{ mA/cm}^2$	71

Liste des tableaux

Tableau 1 : Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide	6
Tableau 2 : Bandes interdites de quelques semi conducteurs	8
Tableau 3 : Paramètres structuraux a, c et u pour le GaN et l'InN	27
Tableau 4 : Paramètres de Varshni et gap d'énergie à 0 et 300 K du GaN et de l'InN.	30
Tableau 5 : Résumé des propriétés électriques du GaN et de l'InN à 300 K.	36
Tableau 6 : Résumé des propriétés thermiques du GaN et de l'InN.....	37
Tableau 7: Comparatif des principales propriétés du GaN et des substrats les plus utilisés pour sa croissance.....	43
Tableau 8 : Paramètres de simulation à 300 K pour une concentration de 65% de l'InN	59
Tableau 9 : Comparaison avec des travaux similaires.....	72

Introduction générale

Introduction générale

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

Les panneaux photovoltaïques sont des systèmes qui convertissent directement la lumière du soleil en énergie électrique. Ce processus de conversion est assez fiable, facile, rentable et non polluant à l'environnement. Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Par conséquent, les cellules solaires à haut rendement ont fait l'objet de nombreux travaux ces dix dernières années dans le domaine de la physique.

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût. Depuis quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales. Les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux organiques et inorganiques, elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps. De nouveaux matériaux ont vu le jour, tel que le Nitrure d'Indium Gallium « InGaN » qui a subi des recherches approfondies depuis 2002 en tant que matériau photovoltaïque².

¹ “**BOUAFIA MOUNIR, DEBLAOUI LAID.** Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium. Mémoire de master. Univ Ourgla. 2012.”

² “**MOSTEFAOUI Mohammed Amine .** Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires à base de InGaN. Mémoire de master. Université Abou Bekr Belkaid. Tlemcen. 2015 ”

Le développement de cellules solaires avec un rendement élevé en utilisant l'InGaN, il représente un développement très important par rapport aux cellules solaires à base de silicium et de matériaux III-V³.

La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires. Sachant que sur le total d'énergie incidente, une très faible portion est réfléchiée par la surface du capteur et une petite portion est extraite sous forme d'énergie électrique, en conséquence c'est la grande partie de l'énergie incidente qui devra être dissipée sous forme de chaleur. Ceci conduit, sous rayonnement, à une température de fonctionnement relativement élevée si cette énergie non convertie en électricité n'est pas évacuée.

Dans le présent travail, nous étudions pour une cellule solaire a base d'InGaN, le comportement en fonction de la température des principaux paramètres; le courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement η de conversion PV. Pour cela on utilise le logiciel SCAPS. Ce manuscrit est organisé comme suit :

- Dans le premier chapitre : on fait appel aux notions générales sur l'énergie photovoltaïque et les caractéristiques des cellules solaires ;
- Le deuxième chapitre est consacré à la description des cellules solaires en couche mince à base d'InGaN ;
- Le troisième chapitre est réservé aux substrats et techniques des caractérisations ;
- Et enfin, Dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats obtenus de simulation, et nous citerons quelques critères s'inscrivant dans la perspective d'une meilleure efficacité des cellules photovoltaïques à base d'InGaN ;
- Ce travail se termine par une conclusion générale des résultats obtenus au cours de simulation.

³ "Ilknur Kars Durukan, Ozlem Bayal, Gurkan Kurtulus, Yunus Bas, Ali Gultekin, Mustafa Kemal Ozturk, Suleyman Corekc, Mehmet Tamer, Suleyman Ozcelik, Ekmel Ozbay. Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN solar cells (2015)"

CHAPITRE 1 :

La conversion photovoltaïque

1.1. Introduction :

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. C'est un phénomène qui est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. On utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation d'énergie en produisant du courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell en 1954 sur une simple jonction **PN** au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif. Trois processus élémentaires interviennent dans l'effet photovoltaïque :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges. Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

Ce premier chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire la compréhension de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque. Dans un premier temps, nous décrirons le soleil et son rayonnement. Nous montrerons ensuite ce qu'est une cellule solaire, en insistant sur les propriétés qui sont importantes dans le processus de conversion photovoltaïque. À la fin du chapitre, les différentes configurations des modules photovoltaïques ainsi que leurs déséquilibres de fonctionnement seront décrits.

1.2. L'énergie solaire :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables. Ce type d'énergie solaire sera développé dans les paragraphes suivants.

1.2.1. Le soleil :

Le Soleil est une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés⁴.

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie, malgré la distance considérable qui le sépare de la terre (149.6 x 10⁶ de kilomètres). Il s'agit d'une immense sphère lumineuse composée principalement de gaz ionisé, et du plus grand corps céleste du système solaire. Il est si grand qu'il pourrait contenir plus d'un million de planètes Terre. La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimé à 90x10¹⁵ GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que 180x10⁶ GW. L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires⁵. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.⁶

1.2.2. Le Spectre solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'ondes est appelée spectre électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h \nu = h c / \lambda \quad (1.1)$$

Où h est la constante de Planck, ν la fréquence, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde. C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules « les photons » et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

⁴“<http://www.memoireonline.com/07/08/1433/etude-effet-temperature-parametres-cellule-solaire-organique.html>.”

⁵ “**B. Chaouki, B. Tarek** "Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au qswréseau", Mémoire d'ingénieur. Univ. Biskra, 2007.”

⁶ “**A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles**, "Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency”, Active and Passive Electronic Components, 21, (1998) 265-278.”

La **figure 1** montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visibles est comprise entre **390 nm** (violet) à **780 nm** (rouge).⁷

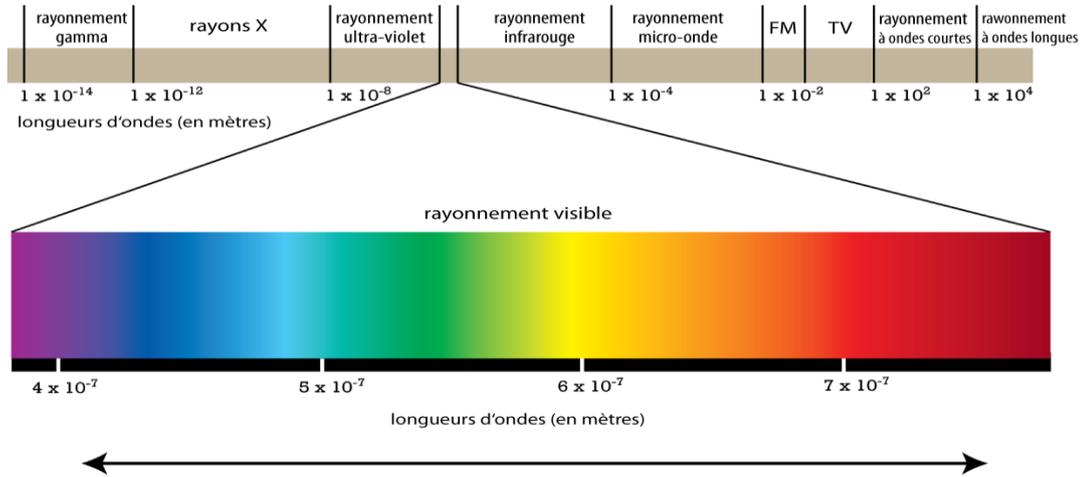


Figure 1 : Spectre électromagnétique⁸

Le spectre de lumière visible	
Couleur	Longueur d'ondes (nm)
Rouge	622-780
Orange	597-622
Jaune	577-597
Vert	492-577
Bleu	455-492
Violet	390-455

Tableau 1 : Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide⁹

⁷ “ **ZekaiSen**, "Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques"; Springer-Verlag London Limited, 2008.”

⁸ “ **Faruk Kurker**, " Microfabrication based design and simulation of hétérojonction solar cell", MSc Thesis. INAS, çukurova university, ADANA, 2010.”

⁹ “ Color wavelength table, www.usbyte.com/common/approximate_wavelength.htm,02/05/2007, consulté le 15/04/2012. “

Le soleil émet de la lumière de l'ultraviolet aux infrarouges en passant par le visible du spectre électromagnétique. L'irradiance solaire a la plus grande ampleur aux longueurs d'onde visibles et un pic dans le bleu-vert.

1.3. La cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque est un composant électronique semi-conducteur permettant de générer un courant électrique lors de son exposition au rayonnement solaire (photons) produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque¹⁰. Ce rayonnement est constitué de photons de longueur d'onde qui s'étend de l'ultraviolet (0,2 μm) à l'infrarouge lointain (3 μm) comme le montre la figure 2:

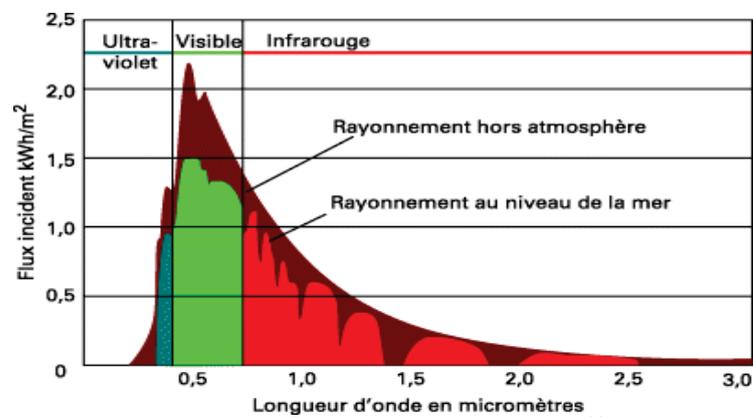


Figure 2 : Rayonnement solaire incident¹¹.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure 3.

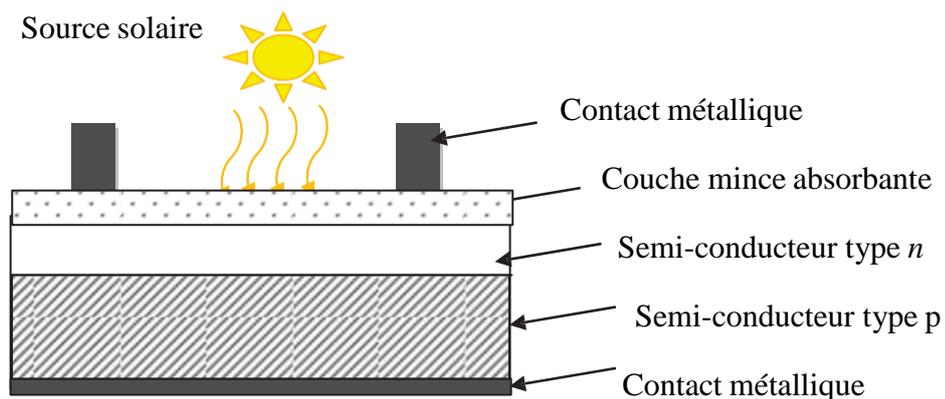


Figure 3 : Représentation de la structure d'une cellule photovoltaïque simple.

¹⁰ “ http://www.photovoltaique.info/Lexique.html?id_mot=18#Cellulephotovoltaque.”

¹¹ “Daniel lincot. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire . Découverte N° 344-345 janvier- février 2007 ”

Le gap d'énergie interdite peut également être défini comme la différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction. A 0 K, tous les électrons se trouvent dans la bande de valence. Si on apporte une quantité d'énergie supérieure au gap du matériau sous forme de lumière, de chaleur, ou autre, alors un électron peut passer de la bande de valence à la bande de conduction où il pourra participer à la conduction d'un courant électrique¹².

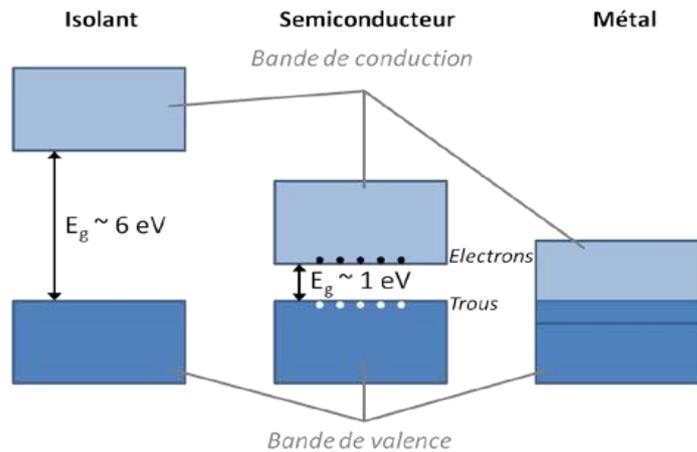


Figure 4 : Schéma montrant la position des bandes de valence et de conduction dans un isolant, un semiconducteur et un métal.

La bande interdite (l'énergie de gap) E_g d'un semi-conducteur détermine comment réagit une cellule solaire à la lumière. Le **tableau 2** montre les valeurs de la bande interdite de quelques semi-conducteurs.

Matériel	Bande interdite (eV) à 300K
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42
Inp	1.34

Tableau 2 : Bandes interdites de quelques semi conducteurs

La **figure 5** permet de visualiser le concept d'absorption de la lumière. Quand la lumière a une énergie supérieure à 1.1 eV , le silicium génère de l'électricité. La lumière d'énergie

¹² “ V.GORGE, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012.”

inférieure à 1.1 eV est inutilisable. De même pour l'arséniure de gallium, une lumière d'énergie supérieure à 1.43 eV excite ses électrons de la couche extérieure. Et enfin, l'arséniure de gallium aluminium requiert une lumière d'énergie supérieure à 1.7 eV ¹³.

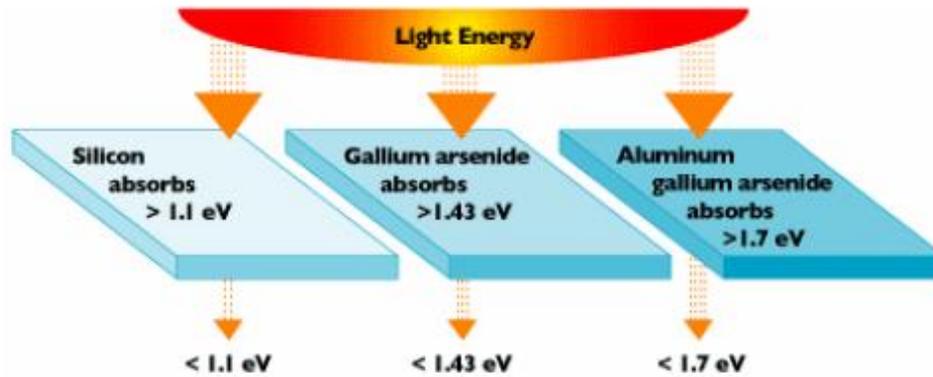


Figure 5 : Effet de l'énergie de la lumière sur différentes bandes interdites Eg.

1.4. Les différentes structures des cellules photovoltaïques:

On a utilisé différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques et augmenter le rendement. On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures¹⁴.

1.4.1. Les cellules à base de silicium cristallin :

Les premiers panneaux photovoltaïques ont été fabriqués avec du silicium cristallin. La production photovoltaïque mondiale actuelle est à base de silicium cristallin (mono-Si 36,3% et mc-Si : 44%). En effet, cette filière reste la plus avancée sur le plan technologique et industriel, car la technologie du silicium est arrivée presque à sa maturité et le silicium est un matériau abondant sur terre, parfaitement stable et non toxique. Les programmes actuels de recherche et de développement de l'industrie photovoltaïque revêtent une importance extrême aux nouveaux procédés de croissance du silicium cristallin, à la réduction de l'épaisseur des cellules qui représente 60% du coût final du module photovoltaïque¹⁵.

¹³ " P.Michalopoulos, " Anovel approach for the development and optimisation of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco", Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002."

¹⁴ " Laradj Nawal. Etude de Photopiles Solaires Nanostructures à base de Nitrures III-V GaN, AlN, InN. Magister Ecole doctorale Nanoscience Nanotechnologie. Université d'Oran.2012."

¹⁵ "A. ZERGA « Modelisation, Simulation et Caracterisation des Cellules Solaires au silicium »>> Synthèse des travaux de recherche de l'habilitation universitaire présentée à l'Université de Tlemcen (2009)."

1.4.2. Les cellules photovoltaïques en couches minces :

Ces cellules sont composées d'une couche mince de semi-conducteur entre 10 μm à 100-200 μm déposé sur un substrat tel que le verre, plastique, céramique, métal ou graphite. Les couches fine de silicium Si, d'Arsenic de Galium GaAs, de Tellure de Cadmium CdTe et de CIGS sont déposés sur le substrat par épitaxie en phase vapeur. L'avantage des cellules en couche fine c'est qu'on utilise moins de matériau donc elles sont moins coûteuses.

1.4.3. Les hétérostructures :

Les hétérostructures sont formées par des matériaux différents soit un métal-isolant-semi-conducteur (MIS), métal-semi-conducteur (Schottky), semiconducteur1-semiconducteur 2 déposés l'un sur l'autre.

1.4.3.1. Structure MIS :

La structure métal-isolant-semi-conducteur est constituée de trois couches: le substrat semi-conducteur sur lequel on a déposé une couche isolante sur laquelle on a déposé une électrode métallique. L'isolant est le SiO_2 , c'est un diélectrique transparent et antiréfléchissant. La cellule solaire à structure MIS est représentée dans la figure 6.

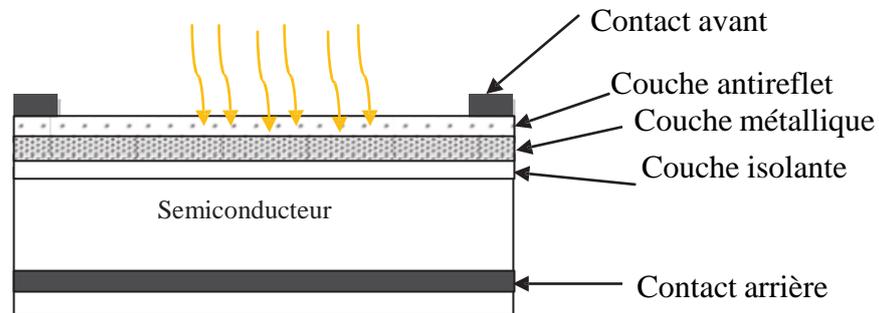


Figure 6 : Cellule solaire à structure MIS

1.4.3.2. La structure Schottky :

La structure Schottky est un contact entre un métal et un semi-conducteur. La cellule solaire à structure Schottky est représentée dans la figure 7.

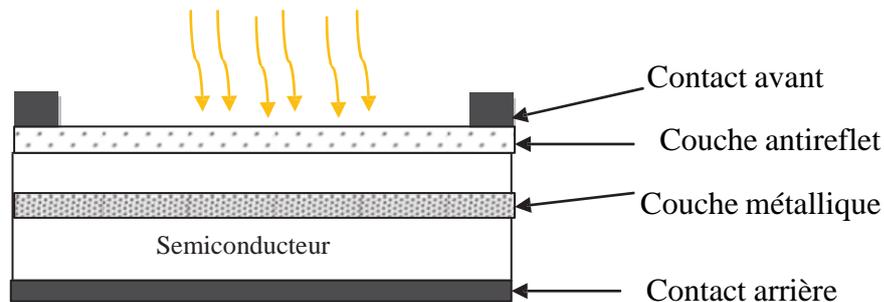


Figure 7 : Cellule solaire à hétérojonction de type Schottky

1.4.3.3. Semiconducteur1-semiconducteur2 :

La structure semi-conducteur 1- semi-conducteur 2 est appelée cellule solaire photovoltaïque à hétérojonction. C'est une jonction formée de deux semi-conducteurs de matériaux différents et de gap différents. E_{g1} (gap du semi-conducteur 1) et E_{g2} (gap du semi-conducteur 2). Le semi-conducteur 1 est de type n est déposé sur le semi-conducteur 2 de type p .

1.4.4. Les cellules multijonctions :

Les cellules multijonctions sont appelées cellule de troisième génération. C'est plusieurs couches de matériaux déposées l'une sur l'autre. Les matériaux utilisés sont les semi-conducteurs III-V. Elles se composent de plusieurs jonctions $p-n$. On améliore le rendement par rapport aux cellules simples ce qui permet d'atteindre des rendements de plus de 40 %¹⁶. Elles sont utilisées pour des applications spatiales. Parmi les structures multi jonctions on a la cellule Tandem.

Les cellules Tandem c'est l'empilement de plusieurs cellules l'une sur l'autre avec des gaps décroissant. Ce sont des cellules qui utilisent des semi conducteurs comme le GaAs et le GaN. Dans notre travail¹⁷, nous allons utiliser cette structure avec les matériaux GaN, InN puisqu'elle permet d'améliorer le rendement par rapport aux autres structures. En utilisant par exemple trois matériaux de gap décroissants $E_{g1} = 1.75$ ev , $E_{g2} = 1.18$ ev et $E_{g3} = 0.75$ ev, il a été possible d'atteindre un rendement de 56% sous une concentration de 1000 soleils¹⁸.

1.4.5. Les cellules photovoltaïques organiques :

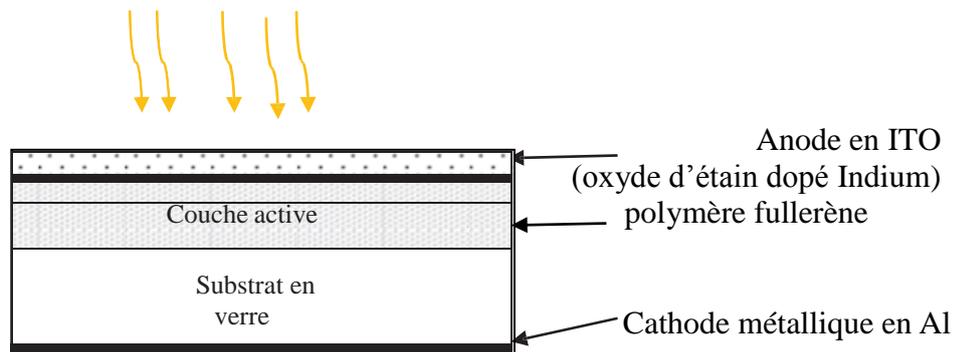
Les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organiques, tel que les polymères. Leurs rendement est de 5 %¹⁹. La structure de la cellule organique est démontrée dans la figure 8.

¹⁶ " M.A.Green,K.Emergy,Y.Hishikawa et W.Warta, progress in photovoltaics : Research and Applications 2008,16,61."

¹⁷ " S.M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, 2ème édition, Bell Laboratories, Chap 14 Solar Cells, (1981)."

¹⁸ " A. Goetzberger V.U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer, 2, 11/229, 2005."

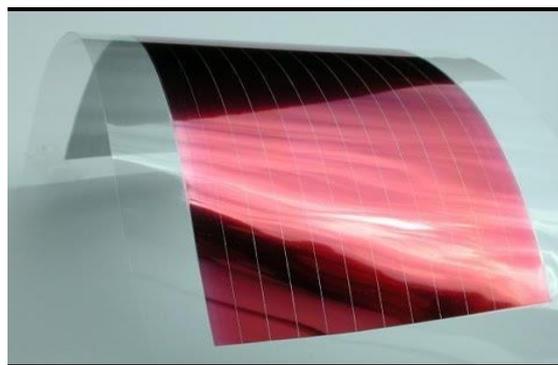
¹⁹ " Jing-shun Huang, Chen-Yuchou, Ching-Uhlin, Solar Energy Materials-Solar Cells 94 182-186 (2010)."

Figure 8: *Cellule solaire organique*

La couche active est composée de deux matériaux l'un donneur d'électron comme une chaîne de polymère et l'autre accepteur d'électron comme le fullerène. Quand on éclaire la cellule on a un transfert d'électrons du polymère à la molécule de fullerène. L'avantage de ces cellules c'est qu'on peut réaliser des grandes surfaces, elles sont légères flexibles et leur coût de fabrication est faible.

1.4.6. Les cellules hybrides:

C'est une nouvelle génération de cellules solaire, elles sont moins chères. Elles utilisent des matériaux organiques et inorganiques à base de semi-conducteur nanostructuré. Ces cellules sont flexibles. Parmi ces cellules, nous avons les cellules Grätzel. Ce sont des cellules nanocristallines à colorant. Elles sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi conducteur inorganique.

Figure 9: *Image d'une cellule Grätzel*²⁰

²⁰ “ Cellule graetzel- www.panneau-solairesouple.com - photovoltaïque.kappatau.eu.”

1.5. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

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

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la **figure 10**²¹. Les photons incidents créent des porteurs dans les régions **N**, **P** et la zone de charge d'espace. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres **P** et **N**, les photoporteurs minoritaires diffusent.

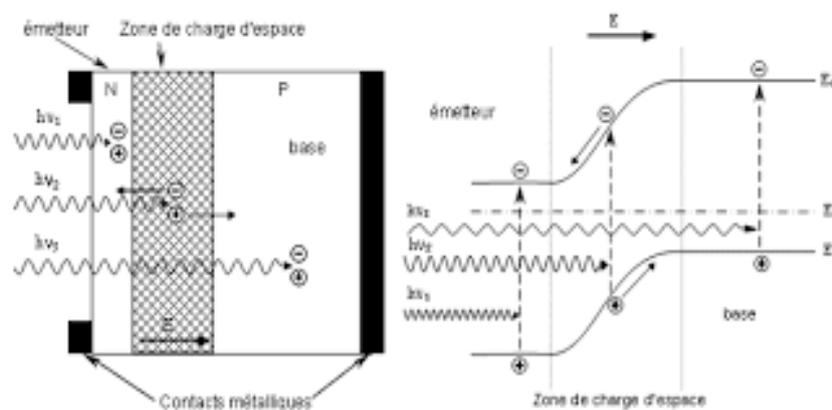


Figure 10 : *Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.*

²¹ « **H.Mathieu**, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème édition, Masson 1990. »

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

1.6. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire :

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale à jonction PN, décrite précédemment, peut être représenté par une diode (pour modéliser la jonction PN) et un générateur de courant continu, I_{ph} (pour modéliser le courant photogénéré), comme le montre la Figure 11.

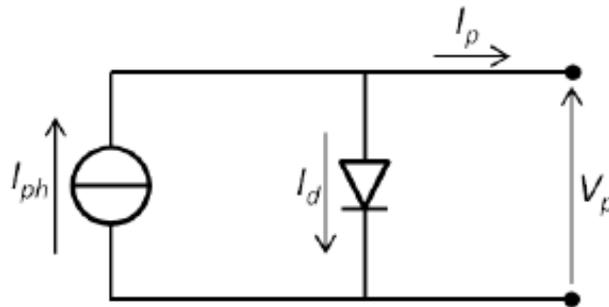


Figure 11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à jonction PN

Avec I_p le courant total produit par la cellule [A]
 I_d le courant traversant la diode [A]

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode. Sa caractéristique (V) correspond à la soustraction du photo courant et du courant de la diode à l'obscurité par²² :

$$I(V) = I_{obs}(V) - I_{ph} = I_s \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{K \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (1.2)$$

Avec :

I_{ph} la densité de courant photogénéré,

²² " S. M. SZE, Physics of semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981."

I_{obs} la densité de courant d'obscurité,
 I_s le courant de saturation de la diode,
 q la charge élémentaire,
 K la constante de Boltzmann,
 T la température.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la **figure 12** les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein. On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc} , qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur V_{co} , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité.

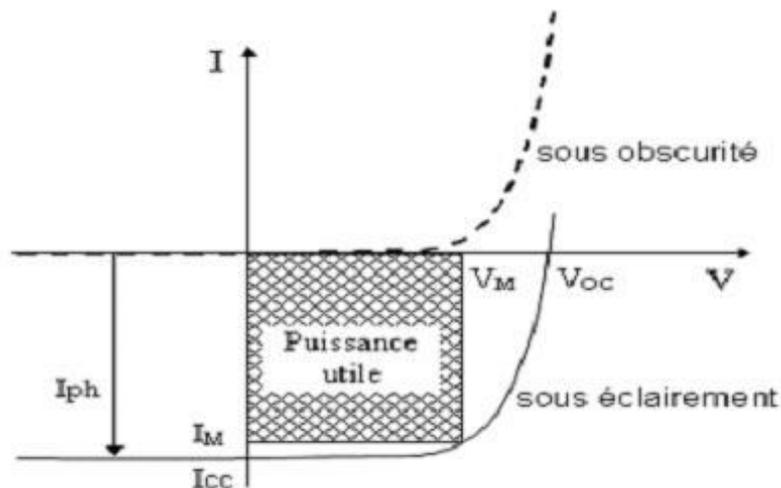


Figure 12 : Caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque.

1.7. Paramètres de la cellule solaire :

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc}
- La tension en circuit ouvert V_{co}
- Le facteur de forme FF
- Le rendement de conversion d'énergie η

1.7.1. Courant de court circuit, I_{cc} :

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

On peut exprimer le courant I_p en fonction de la tension appliquée V_p , de manière générale avec l'expression :

$$I_p(V_p) = I_{cc} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

1.7.2. Tension de circuit ouvert, V_{co} :

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

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.4)$$

1.7.3. Facteur de forme, FF :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée $P_m = P_{max}$) pour un point de fonctionnement P_m ($I_m = I_{max}$, $V_m = V_{max}$) de la courbe courant-tension. Le facteur de forme est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.5)$$

1.7.4. Rendement de conversion, η :

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} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (1.6)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert $P_m = \infty$, $V = V_{co}$ ou en court-circuit $R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$, aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée :

$P_m = P_{max}$ (figure 13).

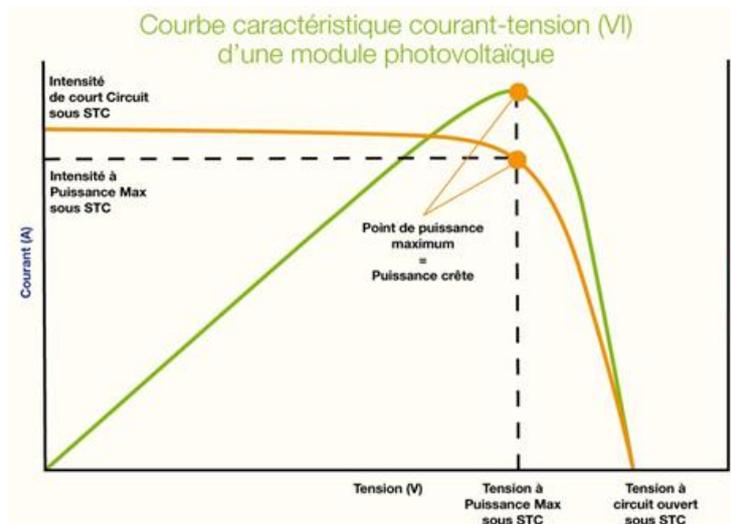


Figure 13 : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire²³.

1.8. Groupement des cellules solaires :

Les cellules solaires sont rarement employées seules, si ce n'est pour l'alimentation de très petits circuits. Dans la plupart des cas, elles sont regroupées et associées en un grand nombre. En général la puissance fournie par une cellule individuelle étant très petite, nous sommes donc appelés à réaliser des groupements séries ou parallèles des cellules afin de recueillir la tension et le courant nécessaires à une certaine application en fonction de la charge variable ou fixe à alimenter. La forme générale de la caractéristique $I(V)$ d'un module solaire ou photovoltaïque est identique à celle d'une cellule solaire élémentaire.

²³ “ J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy, " Le pompage photovoltaïque: Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens", IEPF/université d'Ottawa/eier/crepa,1998, www.iepf.org.”

1.9.1. Branchement série :

Les tensions de circuit ouvert de N_S modules peuvent être différentes mais le courant de court circuit qui les traverse est le même. La tension de l'ensemble est égale à la somme des tensions de circuit ouvert (**figure 14**).

$$V = N_S \cdot V_i \quad (1.7)$$

Avec :

- V_i : tension fournie par une cellule

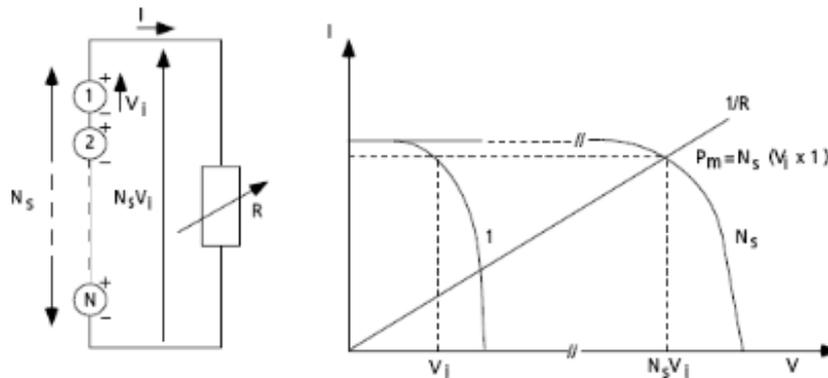


Figure 14 : Association en série de N_S cellules solaires²⁴.

1.9.2. Branchement parallèle :

Dans un tel montage, les modules ont la même tension de circuit ouvert et des courants de court circuit différents, on aura donc un courant égal à la somme des courants de chaque module alors que la tension sera celle du module (**figure 15**).

$$I = N_P \cdot I_i \quad (1.8)$$

Avec :

- I_i : courant fourni par une cellule

²⁴ « Sylvain BRIGAND, " Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque", complément technique Mars/Avril 2008, www.éditionsdumondeur.com, consulté le 12/11/2011. »

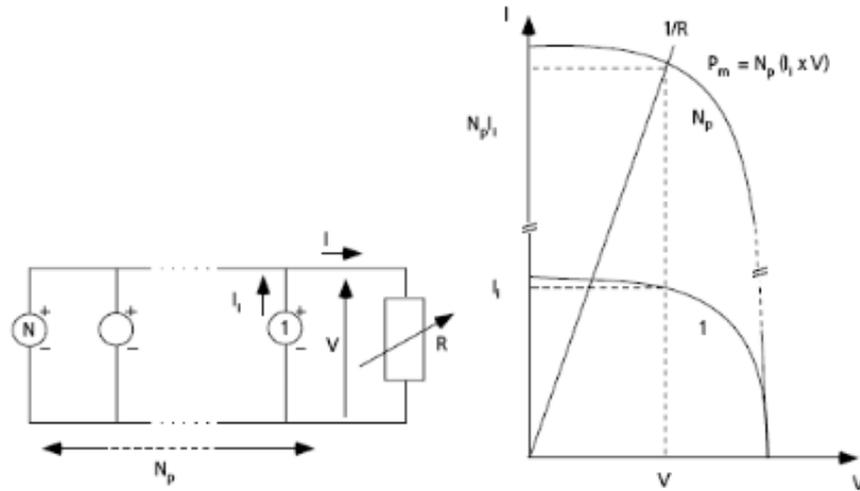


Figure 15 : Association en parallèle de N_p cellules solaires identiques.

1.9.3. Branchement mixte :

Pour une application donnée il est nécessaire de faire augmenter le courant et la tension délivrée par les cellules solaires, on réalise un groupement mixte ou groupement série-parallèle, le module est composé d'un ensemble de cellules montées généralement en série. Il est possible d'utiliser un montage de N_c cellules identiques en série sur un module, N_{SP} nombre de branche (placées en parallèle) et N_{MS} nombre de modules par branche (**figure 16**)²⁵. La puissance totale disponible P_T , dans ces conditions, est égale à :

$$P_T = N_{MS} \cdot N_{SP} \cdot P_M \quad (1.9)$$

La résistance optimale est donnée par:

$$R_{opt} = (N_{MS} / N_{SP}) \cdot R_{optm} \quad (1.10)$$

Où R_{optm} est la résistance optimale du module dans les mêmes conditions.

²⁵ « S. Djeroud, " Caractérisation morphologique et optoélectronique des cellules solaires (a-Si:H)", Mémoire de magistère, Université Oran, 2010. »

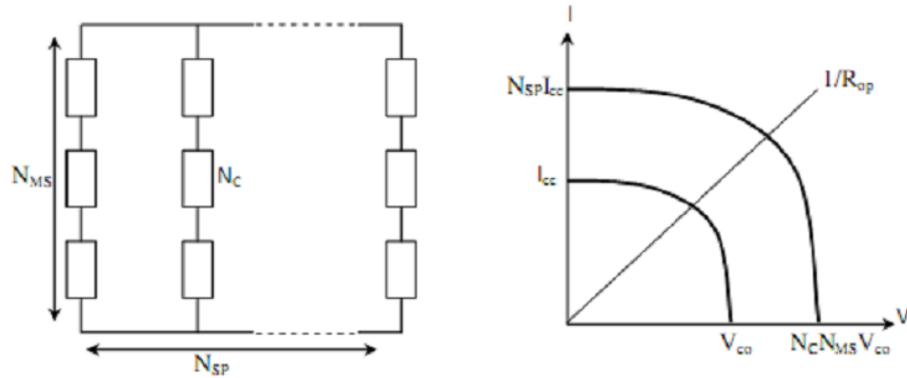


Figure 16 : Association mixte de N_{SP} branches et de N_{MS} modules composés de N_c cellules solaires identiques.

1.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base relatives au rayonnement solaire, tels que le spectre solaire et les mécanismes d'interaction entre les semi-conducteurs pour produire une conversion photovoltaïque. Nous avons décrit la cellule solaire, son principe de fonctionnement, ses différents paramètres électriques (rendement, facteur de forme, le courant de court circuit, ...). Nous avons aussi présenté son circuit équivalent, ainsi que ses différents montages constituant le panneau solaire.

CHAPITRE 2 :

Description du nitrure de
gallium-indium (InGaN)

2.1. Introduction :

Ce chapitre présente le matériau de type nitrure de gallium-indium (InGaN) qui est au centre de ce mémoire. Ce matériau est un semiconducteur faisant partie de la catégorie des nitrures-III, c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev, à savoir le bore, l'aluminium, le gallium, l'indium et le thallium, voir Figure 17. Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN). C'est pourquoi, nous allons principalement décrire dans ce chapitre les propriétés structurales, mécaniques, électriques et thermiques de ces deux alliages binaires, pour décrire ensuite les propriétés de l'InGaN qui en découlent.²⁶

IIIA	IVA	VA
bore 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674
aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762
gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160
indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760

Figure 17: L'InGaN est composé des éléments de la colonne IIIA et de l'azote, N²⁷.

Ces matériaux nitrures-III sont activement étudiés parce qu'ils représentent une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance.²⁸

Dans ces sections, nous présentons la structure cristalline du GaN, de l'InN et de l'InGaN, ainsi que leurs caractéristiques électriques, optiques et thermiques.

²⁶ "Gorczyca, I., Svane, A. and Christensen, N.E. Theory of point defects in GaN, AlN, and BN: Relaxation and pressure effects. *Physical Review B*. 1999, Vol. 60, 8147."

²⁷ "Tableau périodique des éléments. *Wikipédia*. [Online] 12 19, 2011. [Cited: 12 23, 2011.] http://fr.wikipedia.org/wiki/Tableau_périodique."

²⁸ "Johnson, W.C., Parson, J.B. and Crew, M.C. Nitrogen Compounds of Gallium-III. *Journal of Physical Chemistry*. 1932, Vol. 36, 2651."

2.2. Historique :

Le GaN fut synthétisé pour la première fois par Johnson *et al.* En 1932 et Juza et Hahn²⁹ déterminèrent la structure cristalline comme étant la wurtzite (figure 18) dans les conditions normales de température et de pression, en 1938. Depuis, le GaN fut beaucoup étudié dans les années 80 et 90 grâce à ses applications pour les diodes électroluminescentes (LED) et les détecteurs dans l'UV.

L'InN a eu une histoire plus tumultueuse. Le premier échantillon d'InN fut synthétisé en 1972 en utilisant un procédé de pulvérisation radio-fréquence. Cependant, la plupart des couches produites étaient polycristallines et présentaient une grande concentration d'électrons libres ($>10^{19} \text{ cm}^{-3}$)³⁰ et une contamination significative par l'oxygène. Typiquement, de tels matériaux montraient des mobilités électroniques relativement basses, entre 10 et 100 cm^2/Vs ³¹. Par ailleurs, le spectre d'absorption de ces matériaux présentait une forte bande d'absorption dans l'infrarouge et un seuil d'absorption à 1,9 eV. La bande d'absorption dans l'infrarouge fut alors attribuée aux impuretés et aux porteurs libres et la valeur 1,9 eV fut rapprochée du gap d'énergie interdite de l'InN intrinsèque. Cependant, ce matériau ne montrait étrangement pas d'émission lumineuse à la valeur proposée du gap d'énergie³². Ceci était en opposition avec le GaN et l'InGaN riche en gallium qui montraient une forte luminescence malgré une large concentration de défauts. Par la suite, la qualité des nitrures fut grandement améliorée par la technique de dépôt chimique en phase vapeur à base de métallo-organiques (MOCVD) produisant des couches d'InGaN et d'AlInN avec une faible densité de porteurs libres. Il a été alors découvert que le gap d'énergie interdite de l'AlInN diminuait rapidement avec l'incorporation d'indium et qu'il se situait bien en dessous de 2 eV pour des concentrations d'indium d'environ 50 %³³, provoquant un paramètre de courbure de bande inhabituellement grand. L'avancée majeure est venue d'échantillons fabriqués par épitaxie par jet moléculaire (MBE) présentant une bonne qualité cristalline, c'est-à-dire avec une faible concentration de porteurs libres ($<10^{18} \text{ cm}^{-3}$) et une grande mobilité électronique

²⁹ “ Akasaki, I., et al. Conductivity control of GaN and fabrication of UV/blue GaN light emitting devices. *Physica B: Condensed Matter*. 1993, Vol. 185, 428.”

³⁰ “ Hovel, H.J. and Cuomo, J.J. Electrical and Optical Properties of rf-Sputtered GaN and InN. *Applied Physics Letters*. 1972, Vol. 20, 71. ”

³¹ “ Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 106, 011101.”

³² “ Yamaguchi, S., et al. Anomalous features in the optical properties of Al_{1-x}In_xN on GaN grown by metal organic vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2000, Vol. 76, 876.”

³³ “ Lu, H., et al. Effect of an AlN buffer layer on the epitaxial growth of InN by molecular-beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2001, Vol. 79, 1489. ”

(>2000 cm²/Vs). Le gap d'énergie interdite de l'InN à température ambiante convergea alors vers 0,64 eV.

L'InGaN fut déposé pour la première fois en 1972 par Osamura *et al*³⁴ par la technique de plasma à rayon d'électrons sur deux types de substrat, saphir et quartz. Cependant, les couches produites étaient polycristallines et le gap d'énergie de l'InN fut mesuré à 1,95 eV laissant supposer que le matériau produit n'était pas de très bonne qualité. Par la suite, en 2002, Wu *et al.* Ils présentent des films de haute qualité cristalline et un gap pour l'InN à 0,77 eV. Ils déterminèrent alors la courbure de bande du gap de l'InGaN comme étant 1,43 eV. La croissance de l'InGaN étant maîtrisée dans les années 2000, la fabrication de composant à base de cet alliage va devenir un thème de recherche important. Aujourd'hui, les efforts de recherche se focalisent principalement sur la différence de paramètres de maille entre le matériau et le substrat, le dopage de type P, la ségrégation de phases dans les couches et les états de surfaces.

2.3. Description du nitrure d'Indium-Gallium :

L'InGaN apparaît à l'heure actuelle comme le matériau le plus prometteur pour les applications photovoltaïques. Il est activement étudié parce qu'il représente une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques: Un large gap d'énergie interdite direct, lui permettant une large couverture spectrale, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique. Son gap est modulable avec le taux de substitution de l'Indium dans l'alliage³⁵. Avant d'étudier le composé ternaire l'InGaN, il convient d'étudier les propriétés essentielles de ses composés binaires qui sont le nitrure d'indium (InN) et Le nitrure de gallium GaN.

2.3.1. Caractéristiques structurales :

Les nitrures GaN et InN se présentent essentiellement sous deux formes cristallines : la structure hexagonale «wurtzite » et la structure cubique « zinc -blende ». Dans les conditions ambiantes, la structure des nitrures-III est la wurtzite (**figure 18**), une structure hexagonale. Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un côté hexagonale a , la hauteur de la maille élémentaire c , et le paramètre interne u décrivant la séparation des sous-réseaux

³⁴ “ Nanishi, Y., Saito, Y. and Yamaguchi, T. RF-Molecular beam epitaxy growth and properties of InN and related alloys. Japanese Journal of Applied Physics. 2003, Vol. 42, 2549.”

³⁵ “ Osamura, K., et al. Fundamental absorption egde in GaN, InN and their alloys. Solid State Communications. 11, 1972, 617.”

des anions (N^{3-}) et des cations (Ga^{3+}) selon l'axe c . Ce dernier est défini comme étant la longueur de la liaison cation-anion divisée par c . Il est égal à 0,375 pour un cristal wurtzite idéal.

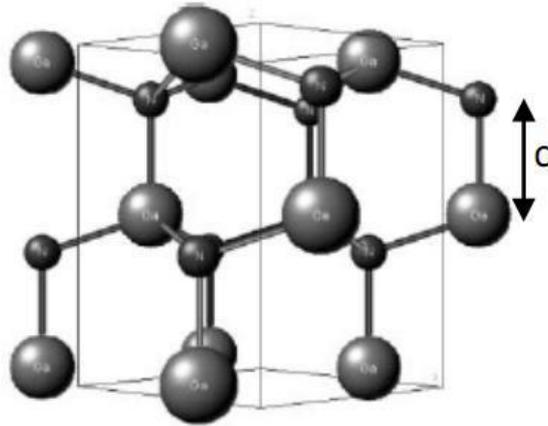


Figure 18 : *Structure wurtzite, exemple du GaN*³⁶.

La deuxième structure dite « zinc-blende » (**figure 19**) est constituée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, l'un est constitué d'un élément III et l'autre d'un élément V, les deux sous réseaux étant décalés du quart de la diagonale principale soit $a/4$, « a » étant la longueur du cube, Le **tableau 3** présente les paramètres de maille des nitrures GaN et l'InN pour les deux structures.

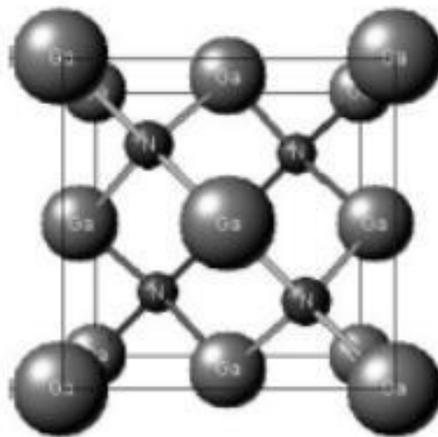


Figure 19 : *Structure cubique zinc-blende, exemple du GaN.*

³⁶ « Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. Materials Science and Engineering R. 2002, Vol. 37, 61.»

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

Tableau 3 : Paramètres structuraux a, c et u pour le GaN et l'InN^{37 38}

Il existe théoriquement une troisième structure cristalline pour les nitrures-III, la structure cubique à face centrée (CFC) ou NaCl. Comme son nom l'indique, c'est une structure cubique, avec un atome à chaque sommet du cube, plus un atome au centre de chacune des 6 faces. Cette structure est néanmoins très difficile à obtenir pour le GaN puisqu'il faut se placer sous de très fortes pressions (52 GPa) pour la produire³⁹. Elle est donc impossible à obtenir par épitaxie et ne sera donc pas davantage développée ici.

2.3.2. Propriétés électriques :

Les propriétés électriques d'un matériau proviennent de son gap d'énergie interdite, E_g , et de sa densité de porteurs. Avant de détailler ces valeurs pour l'InGaN, nous allons rappeler rapidement quelques notions essentielles de physique. Le gap d'énergie interdite est défini comme étant la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. Le diagramme d'énergie d'un matériau est présenté dans la Figure 20.

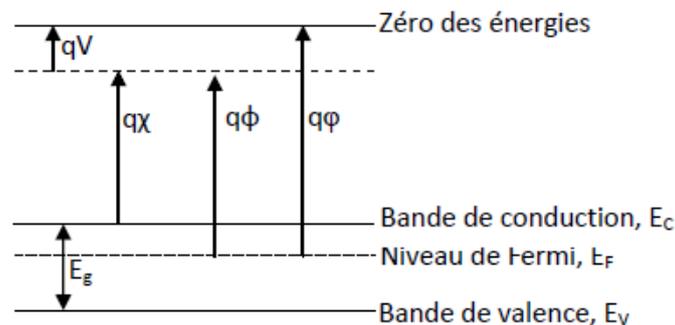


Figure 20: Diagramme des énergies pour un matériau.

³⁷ " A. Dussaigne, " Diodes électroluminescentes blanches monolithiques", thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2005."

³⁸ " Wright, A.F. and Nelson, J.S. Explicit treatment of the gallium 3d electrons in GaN using the plane-wave pseudopotential method. Physical Review B. 1994, Vol. 50, 2159."

³⁹ " Morkoç, H. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. Vol. 1. 978-3-527-40837-5."

Avec :

- q est la charge élémentaire,
- V le potentiel électrostatique pouvant régner dans le matériau,
- χ l'affinité électronique,
- ϕ le travail de sortie,
- ϕ le potentiel d'ionisation.

2.3.2.1. Gap d'énergie dans les nitrures :

La caractéristique principale pour laquelle les nitrures sont tant étudiés est leur gap d'énergie interdite direct, y compris à travers leurs alliages. Ceci permet d'avoir de meilleurs rendements de conversion ou d'émission de lumière, pour le photovoltaïque ou pour les LEDs, par exemple. De plus, 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 (300 K). Le diagramme de bande du GaN et l'InN est montré dans la Figure 21 et la Figure 22.

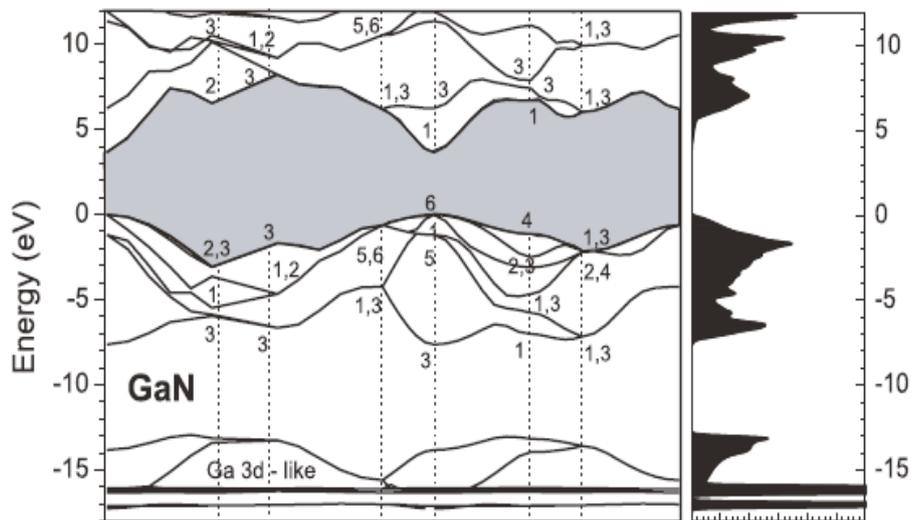


Figure 21 : Diagramme de bande du GaN à partir de la théorie de structure électronique des quasi-particules⁴⁰

⁴⁰ ‘‘ Cláudio de Carvalho, L., Schleife, A. and Bechstedt, F. Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes. Physical Review B. 2011, Vol. 84, 195105.’’

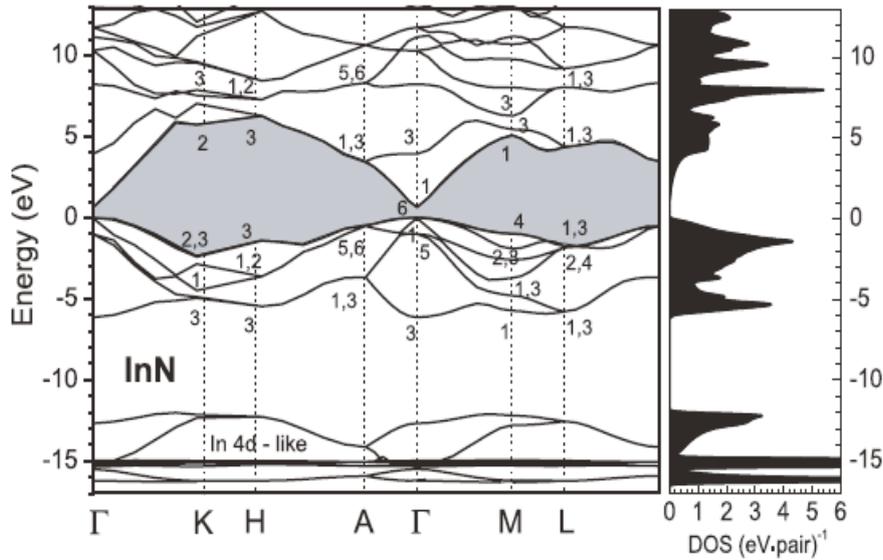


Figure 22 : Diagramme de bande de l'InN avec la théorie de la structure électronique des quasi-particules.

- **Evolution du gap des matériaux $In_xGa_{1-x}N$:**

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaN et InN, il est possible de déterminer le gap d'énergie de l'InGaN en utilisant la loi de Vegard avec un paramètre de courbure. La loi de Vegard est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (gap d'énergie, paramètre de maille, constantes élastiques, etc.)^{41 42} peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants.

Cependant, les valeurs mesurées peuvent dévier de l'interpolation linéaire à cause de la taille relative des constituants, du volume relatif par électron de valence, les effets de la zone de Brillouin, et des différences électrochimiques entre les éléments^{43 44}. On doit alors introduire un paramètre de courbure dans l'expression afin de suivre les données expérimentales. La loi de Vegard avec paramètre de courbure est définie par :

$$E_g (InGaN) = (1-x) E_g(GaN) + xE_g (InN) - bx (1-x) \quad (2.1)$$

Avec :

x : la concentration d'Indium dans l' $In_xGa_{1-x}N$ [$s.d$] .

b : le paramètre de courbure [eV].

⁴¹ “ Vegard, L. Z. Phys. 1921, Vol. 5, 17.”

⁴² “ Denton, A.R. and Ashcroft, N.W. Vegard's Law. Physical Review A. 1991, Vol. 43, 3161.”

⁴³ “ Katsikini, M., et al. Raman study of Mg, Si, O, and N implanted GaN. Journal of Applied Physics. 2003, Vol. 94, 4389.”

⁴⁴ “ Axon, H.J. and Hume-Rothery, W. Proc. R. Soc. London A. 1948, Vol. 1, A193. ”

$E_g(\text{InGaN})$: le gap d'énergie de l'InGaN [eV].

$E_g(\text{GaN})$: le gap d'énergie du GaN [eV].

$E_g(\text{InN})$: le gap d'énergie de l'InN [eV].

• *Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température :*

L'évolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température peut généralement être décrite par l'expression de Varshni⁴⁵ :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.2)$$

Avec :

$E_g(T)$: le gap du matériau à une température donnée [eV]

$E_g(0)$: le gap d'énergie du matériau à 0 K [eV]

α : une constante empirique [eV.K⁻¹]

β : une constante associée à la température de Debye [K]

Ces paramètres pour le GaN et l'InN sont rassemblés dans le Tableau 4. L'évolution des gaps d'énergie de GaN et de l'InN en fonction de la température est représentée dans la figure 23 et la figure 24, respectivement.

	$E_g(0K)$ [eV]	α [meV/K]	β [K]	$E_g(300K)$ [eV]
GaN	3.507	0.909	830	3.44
InN	0.69	0.41	454	0.64

Tableau 4 : Paramètres de Varshni et gap d'énergie à 0 et 300 K du GaN et de l'InN.

⁴⁵ " **EL GMILI Youssef**. Etude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque.Thèse de doctorat. L'Université de Lorraine & l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah–Fes.2013"

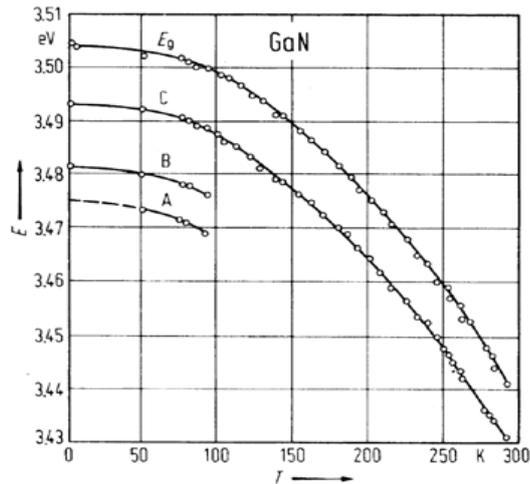


Figure 23: Evolution du gap d'énergie de GaN en fonction de la température. Les courbes A, B et C font référence aux excitons du même nom⁴⁶

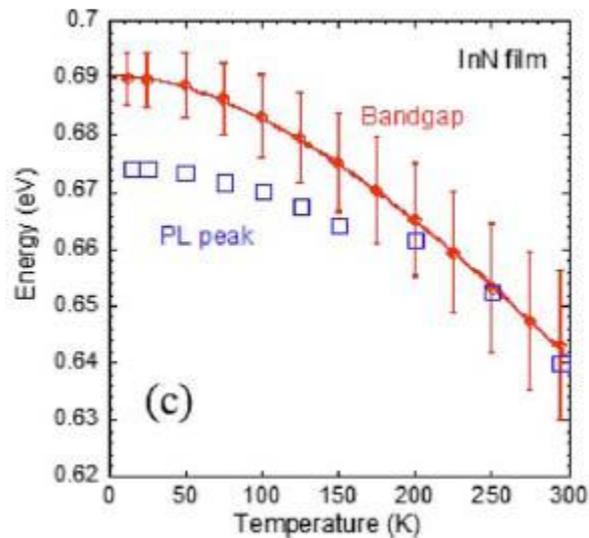


Figure 24 : Evolution du gap d'énergie pour l'InN en fonction de la température⁴⁷.

L'énergie de bande interdite varie avec la température : on observe expérimentalement une diminution de cette énergie lorsque la température augmente. Ceci est dû à deux phénomènes: la dilatation thermique qui modifie les distances interatomiques du réseau cristallin et deuxièmement l'interaction électron-phonon ; cette deuxième étant l'élément prépondérant dans la modification de l'énergie de bande interdite.

⁴⁶ “Monemar, B. Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra. Physical Review B. 1974, Vol. 10, 676.”

⁴⁷ “Wu, J., et al. Temperature dependence of the fundamental band gap of InN. Journal of Applied Physics. 2003, Vol. 94, 4457.”

2.3.2.2. Caractère intrinsèque de type n dans les nitrures :

Les mesures électriques sur les nitrures (GaN, InN et InGaN) montrent une forte concentration d'électrons, généralement de l'ordre de 10^{18}cm^{-3} , leur donnant un caractère intrinsèquement de type *N*. Il semble que cette forte densité d'électrons puisse avoir plusieurs origines. Dans un premier temps, les défauts structuraux ont été proposés comme étant à l'origine de la forte concentration d'électrons, avec au premier rang les lacunes d'azote. En effet, d'après les calculs, ces dernières ont la plus faible énergie de formation dans GaN et InN. Il a été également supposé que des impuretés comme l'oxygène, le carbone, etc. provenant des procédés de croissance participent au caractère de type *N*. Schaff et al ont montré que la concentration d'électrons dans InN est dépendante de l'épaisseur de la couche. En effet, la concentration des électrons suit la densité de défauts dus au désaccord de maille, qui diminue avec l'augmentation de l'épaisseur des couches, voir **figure 25**. C'est pourquoi les défauts, et pas les contaminants, sont la principale source d'électrons dans InN.

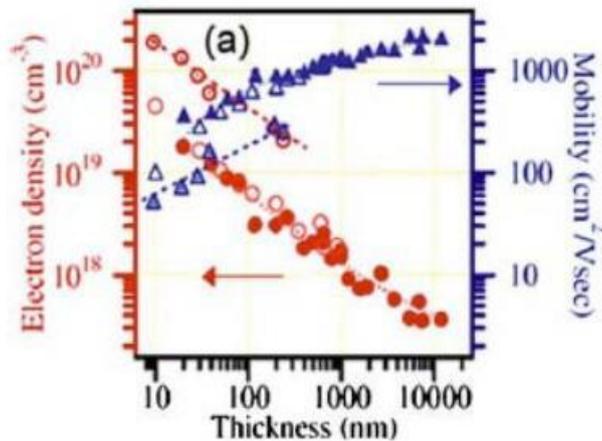


Figure 25 : Densité d'électrons et mobilité dans InN en fonction de l'épaisseur de la couche.

Les symboles pleins correspondent à des couches d'InN déposées sur une couche de GaN tampon. Les symboles vides, identifient les couches déposées sur une couche tampon d'Al.

La **figure 26** montre l'évolution de la concentration d'électrons en fonction de la température dans différents alliages d' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, x étant la concentration de Ga. On observe que la concentration d'électrons augmente avec la fraction de Ga dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ce qui confirme l'hypothèse de l'augmentation de la densité de charges libres avec l'augmentation de défauts structuraux. Cependant, cette concentration est très peu dépendante de la température entre 77

et 300 K . A noter que la densité d'électrons est maximale pour 50% de Ga ou d'indium. Si on continue à augmenter la concentration de Ga dans $In_{1-x}Ga_xN$, la densité d'électrons diminue.

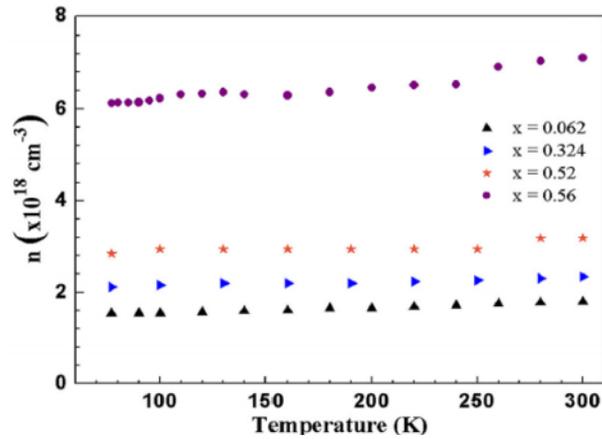


Figure 26 : Concentration d'électrons en fonction de la température dans $In_{1-x}Ga_xN$ avec différentes concentrations d'indium

Cette forte concentration de porteurs libres dans le matériau peut interférer dans la détermination du gap d'énergie. Donmez et al ⁴⁸ ont montré que des densités d'électrons libres au dessus de 10^{18}cm^{-3} provoquent une sous-estimation de la dépendance du gap d'énergie avec d'une part, la température et d'autre part, la composition, à partir de données de photoluminescence. Ce phénomène peut être à l'origine de la variation des données publiées dans la littérature.

2.3.2.3. Mobilité des porteurs dans les nitrures :

La mobilité des porteurs libres dans l' $In_{1-x}Ga_xN$ est présentée dans la **figure 27** avec x la concentration de Ga ⁴⁹. On observe que la mobilité diminue avec la concentration de Ga. Ceci est dû à la fois à l'augmentation de la masse effective des électrons avec l'augmentation de la concentration de Ga dans l' $In_{1-x}Ga_xN$ ($m_e^{GaN}=0,2m_0$, et $m_e^{InN}=0,11m_0$), mais aussi à l'augmentation du phénomène de diffusion des porteurs à cause de l'alliage et des défauts qui augmentent avec la concentration de Ga dans l' $In_{1-x}Ga_xN$. On observe également que la mobilité est quasiment indépendante de la température.

⁴⁸ "Donmez, O., et al. High carrier concentration induced effects on the bowing parameter and the temperature dependence of the band gap of $Ga_xIn_{1-x}N$. Journal of Applied Physics. 2011, Vol. 110, 103506."

⁴⁹ "Schaff, W.J., et al. 868, s.l. : Physica Status Solidi B, 2008, Vol. 245."

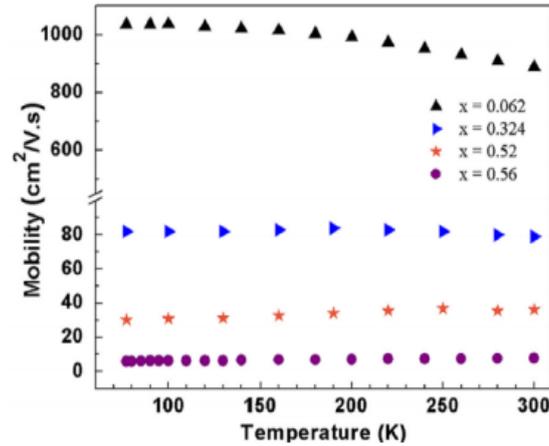


Figure 27 : Mobilité des porteurs libres dans $In_{1-x}Ga_xN$ en fonction de la température

2.3.2.4. Longueur de diffusion :

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

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.3)$$

Avec

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

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad (2.4)$$

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

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 28** 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.

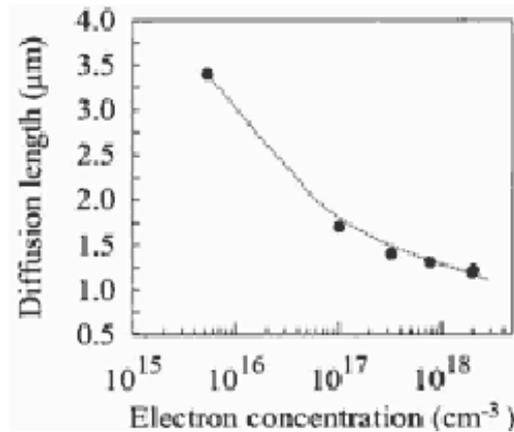


Figure 28 : Longueur de diffusion des trous dans le GaN en fonction de la concentration d'électrons⁵⁰.

- **Variation des caractéristiques avec la température :**

La température modifie de façon notable les caractéristiques suivant deux processus distincts:

- L'agitation thermique du réseau cristallin diminue la mobilité des porteurs. C'est le phénomène prépondérant dans les conducteurs: leur résistance augmente avec la température.
- L'agitation thermique augmente l'énergie des électrons, ce qui leur permet de passer de la bande de valence à la bande de conduction, ou plus facilement sur un niveau accepteur d'impureté. C'est le phénomène le plus important dans un semi-conducteur : lorsque la température augmente, la concentration des porteurs augmente et la résistance diminue. Dans le cas des jonctions PN, la température intervient dans la valeur de I_s d'une part et dans l'exposant eV/kT d'autre part. On montre que, si on néglige les recombinaisons dans la zone désertée, le courant de saturation est donné avec une bonne approximation par la relation⁵¹ :

$$I_s = e S (b_N + b_P) n_{\text{intrin}}^2 \quad (2.5)$$

Avec :

- $e = 1,6.10^{-19}$ C est la charge élémentaire,
- S la section de la jonction,
- b_N et b_P des quantités dépendant en particulier des concentrations d'atomes donneurs et accepteurs respectivement dans les zones N et P,
- n_{intrin} la densité d'électrons de conduction (ou de trous) dans le semi-conducteur d'origine.

⁵⁰ “ Chernyak, L., et al. Electron beam induced current measurements of minority carrier diffusion lengths in gallium nitride. Applied Physics Letters. 1996, Vol. 69, 2531.”

⁵¹ “ Caractéristique d'une diode selon La temperature. Semi-Conducteurs – Diode en Température -1 Plate-Forme matière condensée et cristallographie (Mcc) --- C.E.S.I.R.E. Université J.Fourier Grenoble ”

Les propriétés électriques du GaN et de l'InN sont rassemblées dans le **tableau 5**

	GaN	InN
Gap d'énergie interdite [eV]	3.39	0.7
Affinité électronique [eV]	4.1	5.8
Masse effective des électrons, m_e	0.20 m_0	0.11 m_0
Masse effective des trous, m_h	0.80 m_0	0.65 m_0
Densité d'états effective de la bande de conduction, N_c [cm^{-3}]	$2.3 \cdot 10^{18}$	$9 \cdot 10^{17}$
Densité d'états effective de la bande de valence, N_v [cm^{-3}]	$4.6 \cdot 10^{19}$	$5.3 \cdot 10^{19}$
Mobilité des électrons [$\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$]	1400	3200
Mobilité des trous [$\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$]	<20	17-36
Paramètres de Varshi : α [meV/K] β [K]	0.909 830	0.41 454

Tableau 5 : *Résumé des propriétés électriques du GaN et de l'InN à 300 K.*

2.3.3. Propriétés thermiques :

2.3.1.1. Conductivité thermique :

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

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\varrho} \quad (2.6)$$

2.3.1.2. Expansion thermique :

Le coefficient d'expansion thermique (CET) α , décrit la dilatation ou la contraction d'un réseau cristallin à une variation de température. Dans le plan cristallin, il est défini par :

$$\alpha_a = \frac{\Delta a}{a \Delta T} \text{ et } \alpha_c = \frac{\Delta c}{c \Delta T} \quad (2.7)$$

Avec :

- Δa et Δc la variation des paramètres de maille suite à une variation de température dans le plan et perpendiculairement au plan A° .
- ΔT la variation de température.

Les principales propriétés thermiques sont rassemblées dans le **tableau 6**⁵².

	GaN	InN
Expansion thermique [K⁻¹]	$\Delta a/a = 5.59 \cdot 10^{-6}$ $\Delta c/c = 3.17 \cdot 10^{-6}$	$\Delta a/a = 2.85 \cdot 10^{-6}$ $\Delta c/c = 3.75 \cdot 10^{-6}$
Conductivité thermique à 300K [W.cm⁻¹.K⁻¹]	2.3	0.8
Température de Debye [K]	600	660
Température de fusion [K]	>1993 à 2Kbar	1373

Tableau 6 : *Résumé des propriétés thermiques du GaN et de l'InN.*

2.4. Conclusion :

Nous avons donc vu dans ce chapitre les caractéristiques et les propriétés de l'InGaN tant sur le plan structural, électronique et thermique. Nous connaissons ses avantages (large gap direct selon toutes les compositions pouvant couvrir quasiment tout le spectre solaire).

⁵² “Yacine Maarouf. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco. mémoire de Magister en Electronique. 2013.”

CHAPITRE 3 :

Substrats et techniques

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les nanostructures qui peuvent être fabriquées à partir des nitrures III et les applications développées à partir de ces matériaux⁵³, les différentes techniques utilisées pour fabriquer ce type de cellule sont présentées brièvement les substrats, ainsi que les différents types de dopage sont présentées.

3.2. Croissance et substrats :

En raison de la grande rareté de substrats InGaN, on doit procéder à la croissance sur un substrat de nature différente c'est-à-dire faire de l'hétéroépitaxie. Reste à choisir le substrat. En général, le premier critère pour choisir le substrat est l'accord de maille : le paramètre a de la maille du substrat doit s'approcher le plus possible de celui de la couche à épitaxie.

La croissance de l'InGaN est un point critique pour le développement de ce matériau. En effet, il n'est pas possible de le fabriquer de manière massive comme pour le silicium. Il est donc déposé en film fin sur un substrat. Le problème est qu'il n'existe pas de substrat possédant un paramètre de maille proche de celui de l'InGaN. Une épaisse couche tampon est alors utilisée pour adapter les paramètres du substrat et de la couche déposée. Cette technique a l'inconvénient de produire une grande quantité de défauts réduisant les performances des composants.

Traditionnellement, le saphir (Al_2O_3) est utilisé comme substrat pour les couches d'InGaN avec une couche tampon de GaN ou d'AlN. Le carbure de silicium (SiC) a également été intensivement étudié comme substrat. Bien que les paramètres de maille du SiC et InGaN soient assez proches, leur coefficient d'expansion thermique est très différent provoquant de nouveaux défauts lors du refroidissement des structures après la croissance. D'autre part, le nitrure d'aluminium (AlN) serait une bonne alternative. Cependant, il est également très difficile à fabriquer de manière massive. C'est aussi le cas pour l'oxyde de zinc (ZnO).

La Figure 29 présente le diagramme du gap d'énergie interdite en fonction du paramètre de maille de l'InGaN et des principaux substrats utilisés pour ce matériau.

⁵³ “ **Bremner, S.P., Levy, M.Y. and Honsberg, C.B.** Analysis of Tandem Solar Cell Efficiencies Under AM1.5G Spectrum Using a Rapid Flux Calculation Method. Progress in photovoltaics: Research and Applications. 2008, Vol. 16, 225.

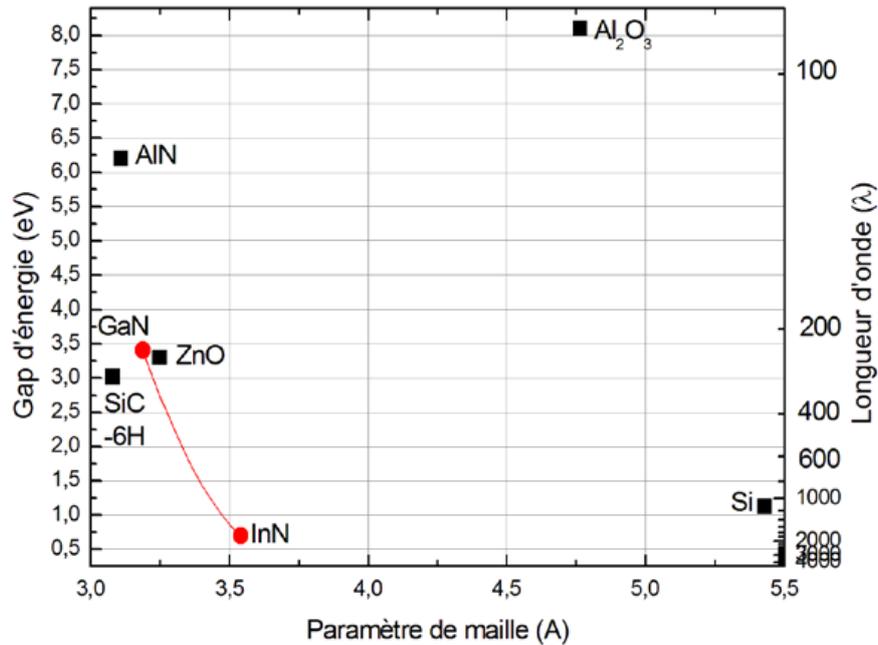


Figure 29 : Gap d'énergie de l'InGaN et des principaux substrats en fonction de leur paramètre de maille.

3.2.1. Croissance sur saphir :

Le premier substrat utilisé pour l'hétéroépitaxie du GaN était du saphir (Al_2O_3), par Maruskas et Tietjen's en 1969, en utilisant l'épitaxie en phase vapeur hybride (HVPE)⁵⁴.

Malgré un paramètre de maille et un coefficient d'expansion thermique très éloignés de ceux du GaN, le saphir est devenu son substrat le plus largement utilisé. Ces différences provoquent des défauts dans le matériau GaN comme des dislocations, des défauts d'empilement, etc., réduisant la qualité des couches. A ce jour, la solution pour palier à ce problème consiste à déposer des couches très épaisses (plusieurs microns) afin de s'éloigner de l'interface. En outre, le saphir est un matériau relativement cher rendant impossible son utilisation à grande échelle.

La première étape du processus de croissance est le nettoyage de la surface, la deuxième étape est la nitruration de la surface. Pour cela, la surface du saphir nettoyée est exposée à un mélange de gaz ammoniac/hydrogène. Ce procédé permet d'augmenter la mouillabilité de la surface en formant une couche inférieure à 1 nm d'AlN, et ainsi d'améliorer la qualité cristalline de la couche de GaN épitaxiée. Enfin, la dernière étape avant la croissance de la

⁵⁴ "Maruskas, H.P. and Tietjen, J.J. The preparation and properties of vapor-deposited single crystalline GaN. *Applied Physical Letters*. 1969, Vol. 15, 327.

couche de GaN proprement dite est la croissance d'une couche tampon de GaN à basse température⁵⁵.

3.2.2. Croissance sur SiC :

Le carbure de silicium (SiC) est souvent mentionné comme substrat alternatif au saphir. Il existe plus de 250 polytypes de SiC. De plus, il est largement disponible. Il a également l'avantage de présenter un désaccord de maille avec le GaN bien inférieur à celui du saphir, d'environ 3 %, et d'avoir un coefficient d'expansion thermique plus grand (3,8 W.cm-1.K-1). Il peut également devenir conducteur en fonction du dopage, et ainsi devenir le contact arrière simplifiant la conception de composants. Enfin, ce substrat peut se présenter sous les deux polarités, Si et C, permettant ainsi de contrôler la polarité de la couche GaN épitaxiée.

3.2.3. Croissance sur AlN :

Le nitrure d'aluminium (AlN) est un substrat idéal pour le GaN puisqu'il a la même structure wurtzite, des paramètres de maille et coefficient d'expansion thermique similaires. L'AlN a également l'avantage d'être facilement gravé chimiquement avec le KOH, d'être un isolant électrique et de posséder une bonne conductivité thermique. Cependant, le plus grand défaut de l'AlN est qu'il n'est pas disponible sous forme massive industriellement. On ne peut le trouver que sous forme de couche épitaxiée sur saphir⁵⁶. C'est pourquoi, à ce jour, il reste principalement utilisé comme couche tampon.

3.2.4. Croissance sur ZnO :

L'oxyde de zinc (ZnO) apparaît également comme un substrat possible grâce à son paramètre de maille proche de celui du GaN (3,25 Å, soit 1,9 % de désaccord de maille). Il se présente sous la structure wurtzite. L'énergie de stabilisation du niveau de Fermi, *EFS*, se trouve seulement à 0,2 eV sous la bande de conduction du ZnO conduisant à une forte densité d'électrons sans dopage intentionnel, comme dans les nitrures⁵⁷.

⁵⁵ "Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61."

⁵⁶ "MTI Corporation. Crystals substrates: A-Z. [Online] [Cited: 11 16, 2011.] <http://www.mtixtl.com/crystalssubstratesa-z.aspx>."

⁵⁷ "Walukiewicz, W. Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors. *Physica B*. 2011, Vols. 302-303, 123-134."

On peut trouver maintenant dans le commerce le ZnO sous forme de substrat massif mais il reste très cher⁵⁸, ce qui limite son utilisation à grande échelle. Pour réduire les coûts tout en gardant les avantages de ce matériau, il est possible de l'utiliser en tant que couche tampon entre le GaN et un autre substrat.

3.2.5. Croissance sur Si :

Ses propriétés physiques, sa haute qualité cristalline et son faible coût font du silicium (Si) un substrat très attractif pour des composants à base de GaN. De plus, il ouvre la possibilité d'une intégration de composants optoélectroniques à base de GaN avec les composants électroniques à base de silicium.

Le silicium a une structure cubique en maille diamant. Sa structure peut être représentée par deux sous-réseaux cubiques à face centrée (*cfc*) interpénétrés et décalés d'une distance équivalente à un quart de la diagonale de la maille élémentaire ($(a\sqrt{3})/4$ avec $a=5,43 \text{ \AA}$).

3.2.6. Croissance sur verre :

La croissance de cellules solaires sur verre est très intéressante puisqu'elle permet de réduire le coût des matériaux, et ouvre un grand champ d'applications, comme par exemple, des panneaux photovoltaïques intégrés au bâtiment. Il existe une multitude de verres différents allant du verre sodocalcique utilisé dans les bouteilles ou les vitrages, à l'oxynitride d'aluminium qui sert de verre blindé, en passant par le verre borosilicate (Pyrex) ou le polyméthacrylate de méthyle (PMMA)⁵⁹.

Le Tableau 7 résume les principales caractéristiques des substrats les plus utilisés pour la croissance du GaN.

⁵⁸ "Walukiewicz, W. 1257, s.l. : J. Vac. Sci. Technol. B, 1988, Vol. 6."

⁵⁹ "Barton, J. and Guillemet, C. Le Verre, Science et Technologie. s.l. : EDP Sciences, 2005. ISBN 2- 86883-789-1."

	GaN	Saphir	SiC	AlN	ZnO
Paramètre de maille (Å)	3.189	4.765	3.081	3.111	3.25
Désaccord de maille		15%	3.4%	2.4%	2.9%
Coefficient d'expansion thermique selon l'axe a ($\times 10^6 \text{K}^{-1}$)	5.8	5.6	4.46	2.9	4.31
Contrainte à 300k	/	tension	compression	Compression	tension
Conductivité thermique (W/cm.K)	2.1	0.25	3.8	2.85	1.02
Constante diélectrique	8.9	8.6 axe c 10.55 axe a	9.66	8.5	8.91 axe c 7.77 axe a
Gap d'énergie interdite (eV) à 300K	3.4	8.1-8.6	3.02	6.2	3.3
Résistivité matériau non dopé (Ωcm)	10^{-1}	$<10^{11}$	/	10^7-10^{13}	~ 0.2

Tableau 7: Comparatif des principales propriétés du GaN et des substrats les plus utilisés pour sa croissance⁶⁰.

3.3. 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.

La « mise en contact » d'un matériau de type N avec un matériau de type P va provoquer un déplacement de charge afin de retrouver l'équilibre électrique créant ainsi un champ interne. Ce type de dispositif est appelé une jonction PN et est à la base de quasiment tous les

⁶⁰ "Vurgaftman, I. and Meyer, J.R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. Journal of Applied Physics. 2003, Vol. 94, 3675."

composants électroniques (transistors, LEDs, cellule solaire, etc.). Il est donc important d'avoir de bons dopages type N et P afin d'obtenir des composants efficaces. La description physique de la jonction PN est effectuée dans le paragraphe « 1.5 La jonction PN ».

3.3.1. Le dopage de type N :

Les nitrures sont intrinsèquement de type N, avec un excès d'électrons. L'augmentation du caractère N des nitrures est donc relativement facile⁶¹. 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} , La Figure 30 présente la mobilité des porteurs en fonction de la concentration d'électrons à température ambiante dans le GaN. Cette mobilité diminue avec l'augmentation de la concentration d'électron, et donc du dopage, à cause du phénomène de dispersion des porteurs par les atomes de Si ionisés qui augmente avec la concentration de dopants.

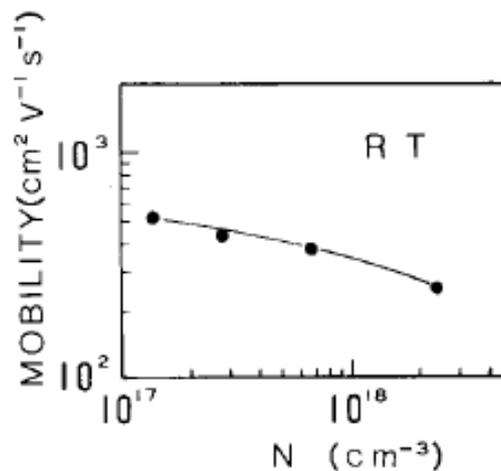


Figure 30: Mobilité des porteurs de charges à température ambiante en fonction de la concentration d'électrons⁶².

Pour de forts dopages, on observe un effet de saturation de la concentration d'électrons avec l'augmentation de la concentration de dopants. Cet effet s'explique par l'apparition de lacunes de gallium, triplement ionisées, compensant le dopage N.

D'autres dopants ont également été étudiés comme l'oxygène⁶³, l'hydrogène⁶⁴ ou le germanium⁶⁵. Cependant, ils restent moins efficaces que le Si parce qu'ils créent une plus grande densité de défauts qui compense d'autant plus le dopage.

⁶¹ "Katsikini, M., et al. Raman study of Mg, Si, O, and N implanted GaN. Journal of Applied Physics. 2003, Vol. 94, 4389."

⁶² "Koide, N., et al. Doping of GaN with Si and properties of blue m/i/n/n+ GaN LED with Si-doped n+layer by MOVPE. Journal of Crystal Growth. 1991, Vol. 115, 639."

3.3.2. Le dopage de type P :

Puisque les nitrures sont intrinsèquement de type N, il est difficile d'obtenir un dopage P. En effet, il faut dans un premier temps compenser les électrons en excès présents dans le matériau, avant de créer un excès de trous. Le problème majoritairement rencontré est la création de défauts de compensation lors du dopage, c'est-à-dire que pour un dopant de type P introduit dans le réseau, un défaut possédant un caractère N se crée à proximité annulant l'effet du premier. Ce phénomène est dû à l'énergie de stabilisation du niveau de Fermi proche de la bande de conduction dans le GaN et à l'intérieur de la bande de conduction dans l'InN. Aujourd'hui, le magnésium, Mg, est le dopant le plus fréquemment utilisé pour les nitrures⁶⁶. Le dopage de type P a été démontré pour la première fois en 1989 par Amano *et al*, en irradiant du GaN dopé avec du Mg avec un faisceau d'électrons à basse énergie (*LEEBI*) pour activer les dopants de type accepteur.

Pour l'InN, le magnésium est également le dopant accepteur le plus étudié. L'InN de type P a été rapporté pour la première fois en 2006 par Jones *et al*⁶⁷. Depuis, plusieurs groupes ont confirmé et caractérisé la conduction des trous de l'InN dopé Mg^{68 69}. Il semble exister une fenêtre de concentration de magnésium, entre $\sim 10^{18}$ et $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, dans laquelle le caractère P est présent dans le matériau. Hors de cette fenêtre, l'incorporation de magnésium ne compense que partiellement les électrons intrinsèques de l'InN. La mobilité des trous a été estimée entre 17 et 36 $\text{cm}^2/\text{V.s}$.

⁶³ “Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 106, 011101.”

⁶⁴ “Janotti, A. and Van de Walle, C.G. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 92, 032104.”

⁶⁵ “Hageman, P.R., et al. N-type doping of wurtzite GaN with germanium grown with plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*. 2004, Vol. 267, 123.”

⁶⁶ “Walukiewicz, W. Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors. *Physica B*. 2011, Vols. 302-303, 123-134.”

⁶⁷ “Jones, R.E. and al., et. *Physical Review Letters*. 2006, Vol. 96, 125505.”

⁶⁸ “Wang, X. and al., et. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 92, 132108.

⁶⁹ “Ager, J.W. and al., et. *Physica Status Solidi B*. 2008, Vol. 245, 873.”

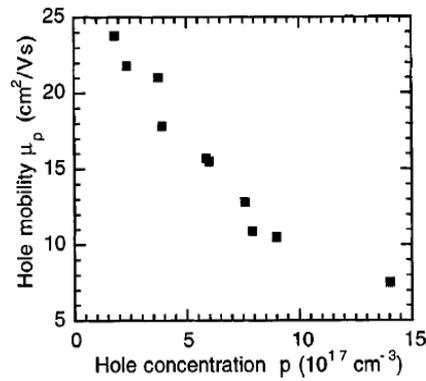


Figure 31: Mobilité des trous en fonction de la concentration de trous dans un film de P-GaN⁷⁰.

3.4. Les techniques de caractérisation utilisées :

3.4.1. Diffraction à Rayon-X Haute Résolution (HRXRD) :

La diffraction à rayon-X est une technique de caractérisation structurale très répandue et très puissante pour l'étude des réseaux cristallins. Elle permet de connaître notamment les paramètres de maille des cristaux, la composition chimique des alliages, et la contrainte présente dans les couches épitaxiées. La Figure 32 montre un schéma de la mesure par diffraction X. La source de rayons X est fixe car c'est un équipement lourd et volumineux. Le faisceau de rayons X arrive sur l'échantillon avec un angle d'incidence appelé ω . Il ressort de l'échantillon, après réflexion et diffraction sur les différents plans de la structure avec un angle de 2θ . Le signal est alors collecté par un détecteur amovible.

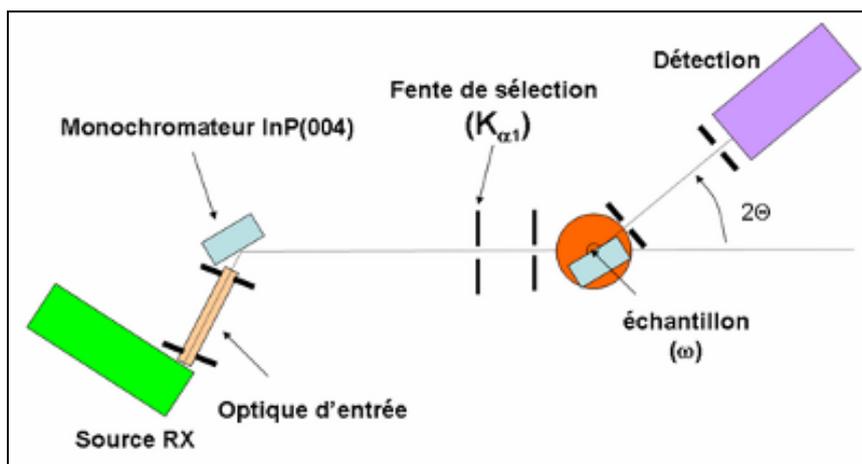


Figure 32 : Schéma de la mesure par diffraction à rayons X.

⁷⁰ "Haus, E., et al. Mg doping of GaN layers grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2000, Vol. 76, 718."

En variant l'orientation du balayage, différentes informations sont accessibles. La mesure en 2 θ sur oméga ($2\theta/\omega$) permet de connaître la composition et l'épaisseur des différentes couches de l'échantillon, ainsi que la qualité des interfaces entre les couches. Un exemple de courbe obtenue est donné dans la Figure 33. Dans notre cas, le balayage est effectué en configuration symétrique ($00\bar{2}$). La position des pics permet de calculer le paramètre de maille de la couche, normal à la surface, soit le paramètre de maille c . Les franges que l'on peut observer sur certains spectres vont permettre de déterminer l'épaisseur de la couche.

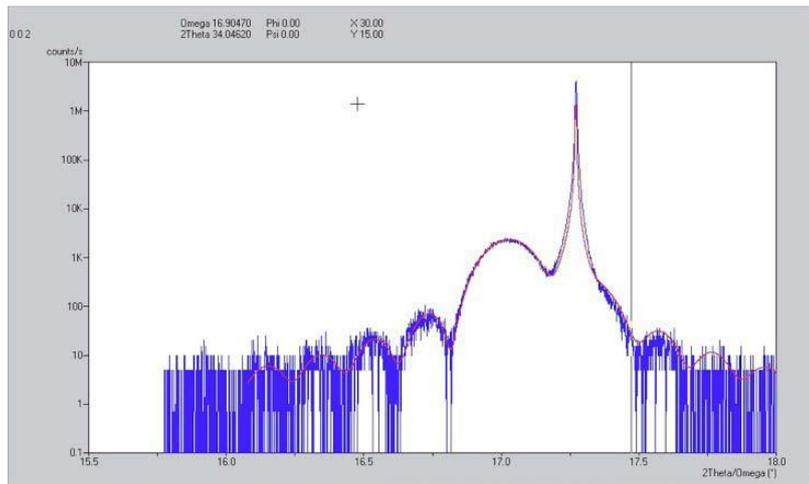


Figure 33: Exemple de mesure en $2\theta/\omega$ selon la direction $[00\bar{2}]$ pour un échantillon composé d'une couche d'InGaN avec 10 % d'indium, avec une épaisseur de 140 nm, sur une couche tampon de GaN.

3.4.2. Microscope Electronique à balayage par Transmission (STEM) :

La microscopie électronique à balayage par transmission (STEM) permet d'observer un cristal avec une résolution atomique. Elle est particulièrement utilisée pour l'analyse des défauts et des interfaces dans les couches épitaxiées. Cependant cette technique requière une préparation minutieuse de l'échantillon. Un schéma de fonctionnement de cette technique de mesure est présenté dans la Figure 34⁷¹. Une source d'électrons délivre un faisceau qui est focalisé sur l'échantillon à l'aide de lentilles. L'échantillon se déplace latéralement. Quand les électrons arrivent sur un atome, ils peuvent passer sans être déviés, être diffractés élastiquement (sans perte d'énergie), ou bien être diffractés inélastiquement. Ces électrons sont ensuite collectés par des détecteurs. Les électrons diffractés sont collectés par un détecteur en forme d'anneau, appelé détecteur en champ sombre annulaire (ADF).

⁷¹ "Muller, D.A. Structure and bonding at the atomic scale by scanning transmission electron microscopy. *Nature Materials*. 2009, Vol. 8, p. 263."

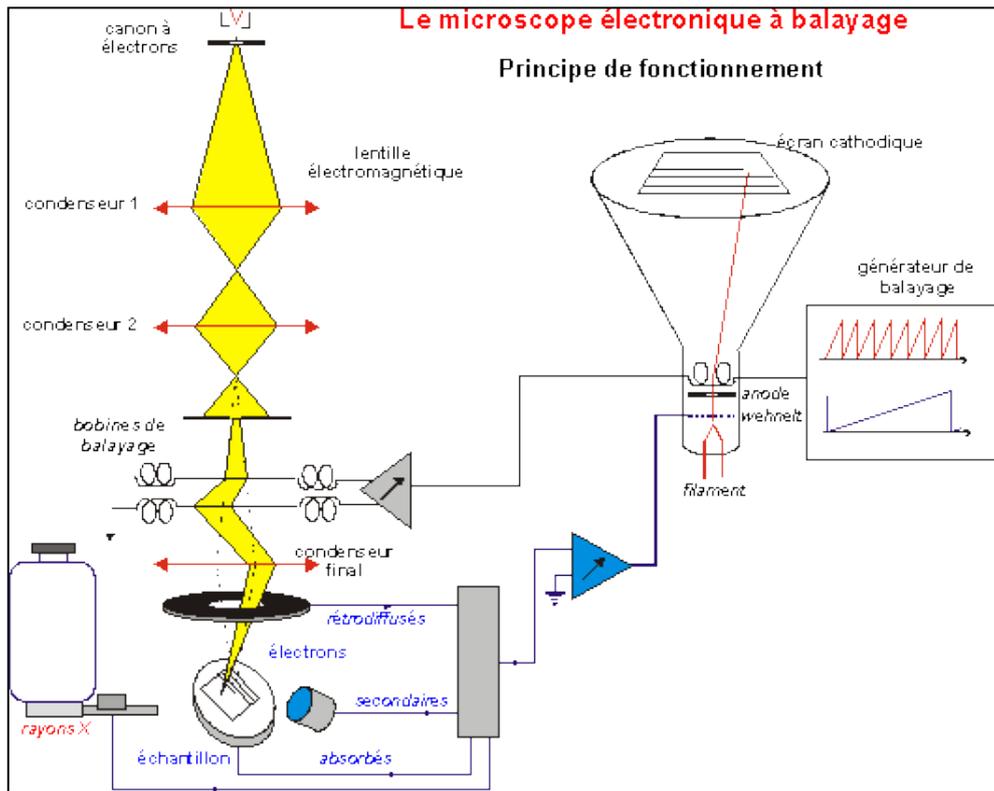


Figure 34: Schéma de fonctionnement d'un microscope électronique à balayage par transmission

Les mesures *STEM* ont été réalisées au Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN) à l'aide d'un microscope Jeol 2200FS. La tension de travail typique était de 200 kV avec un courant de sonde de 150 pA. La taille du faisceau d'électrons était de 0,12 nm. Les échantillons étaient préparés à l'aide d'un faisceau d'ions focalisés (*FIB*) et leur épaisseur était de 100 nm.

3.4.3. Microscope à force atomique (*AFM*) :

Un microscope à force atomique (*AFM*) permet de scanner la surface d'un échantillon à l'aide d'une pointe d'une dizaine de nanomètres de diamètre. Le principe est basé sur les interactions de Van der Waals entre la pointe et les atomes de la surface de l'échantillon. Lorsque la pointe est placée très proche de la surface d'un échantillon, la force de répulsion courbe le bras de levier de la pointe. Cette courbure est contrôlée par un laser qui se réfléchit sur le bras de levier pour aller taper une cible. En gardant une courbure constante du bras de levier, on peut donc mesurer la topographie de l'échantillon. La Figure 35 présente le schéma de fonctionnement d'un microscope à force atomique.

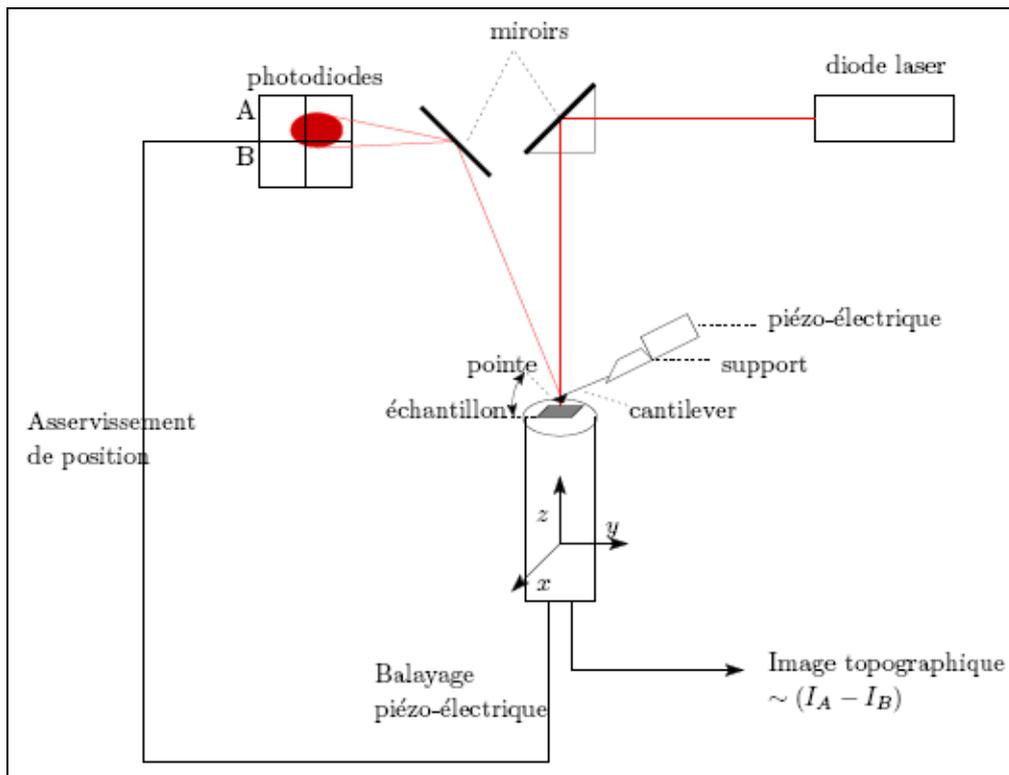


Figure 35 : Schéma de fonctionnement d'un microscope à force atomique.

En mode contact, la pointe est posée à la surface de l'échantillon permettant d'avoir sa topographie. Cependant, ce mode a l'inconvénient d'user rapidement les pointes et de détériorer les surfaces des échantillons fragile. C'est pourquoi le mode alternatif (*tapping*) est plus souvent utilisé. Dans cette configuration, la pointe est mise en résonance. L'amplitude de la résonance est définie de telle sorte que la pointe arrive très proche de l'échantillon. Il est alors possible de détecter des variations de topographie, comme dans le mode contact, mais aussi des changements de propriétés du matériau à l'aide de la phase du signal alternatif. La mesure de la phase correspond au décalage de phase entre l'oscillation de la pointe libre et l'oscillation de la pointe très proche de la surface. Puisque le décalage de phase dépend des propriétés viscoélastiques du matériau et des interactions entre l'échantillon et la pointe, l'image de la phase présente des domaines où les propriétés du matériau changent sans néanmoins donner la nature de ces propriétés. Dans le mode alternatif, on a donc accès à de nombreuses informations.

3.5. Cellule photovoltaïque à base d'InGaN :

On a utilisé différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules photovoltaïques et augmenter le rendement. On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures.

3.5.1. Simple jonction :

Le matériau InGaN fut proposé pour la première fois pour des applications photovoltaïques en 2003 par J. Wu *et al*⁷², en mettant en avant son gap d'énergie modulable et sa résistance aux radiations de haute énergie. Depuis, la fabrication de cellules photovoltaïques à base d'InGaN a été réalisée avec une homojonction PN^{73 74} ou PiN⁷⁵ sur GaN, ou sur AlN⁷⁶. Des structures en double hétérojonction P-GaN/i-InGaN/N-GaN, plus faciles à fabriquer, furent également largement étudiées^{77 78 79 80 81 82 83}.

Dans le but d'améliorer le rendement, des puits quantiques InGaN/GaN ont été testés en tant que couche active^{84 85 86}. Ces puits quantiques sont généralement pris en sandwich entre deux couches de GaN P et N. Le principal avantage de ce type de structure est sa qualité cristalline supérieure grâce à la conservation de l'InGaN contraint, en dessous de l'épaisseur critique. La

⁷² "Wu, J., et al. Superior radiation resistance of In_{1-x}Ga_xN alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 6477."

⁷³ "Yang, C., et al. Photovoltaic effects in InGaN structures with p-n junctions. *Physica Status Solidi A*. 2007, Vol. 204, 4288."

⁷⁴ "Effect of phase separation on performance of III-V nitride solar cells. **Jani, O., et al.** Milan, Italy :Papier présenté à la 22ème conférence européenne de l'énergie solaire photovoltaïque., 2007."

⁷⁵ "Zeng, S.W., et al. Substantial photo-response of InGaN p-i-n homojunction solar cells. *Semiconductor Science and Technology*. 2009, Vol. 24, 055009."

⁷⁶ "Chen, X., et al. Growth, fabrication, and characterization of InGaN solar cells. *Physica Status Solidi A*. 2008, Vol. 205, 1103."

⁷⁷ "Neufeld, C.J., et al. High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 93, 143502."

⁷⁸ "Matioli, E., et al. High internal and external quantum efficiency InGaN/GaN solar cells. *Applied Physics Letters*. 2011, Vol. 98, 021102."

⁷⁹ "Lang, J.R., et al. High external quantum efficiency and fill-factor InGaN/GaN heterojunction solar cells grown by NH₃-based molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2011, Vol. 98, 131115."

⁸⁰ "Tsai, C.-L., et al. Substrate-free large gap InGaN solar cells with bottom reflector. *Solid State Electronics*. 2010, Vol. 54, 541."

⁸¹ "Zheng, X., et al. High-quality InGaN/GaN heterojunctions and their photovoltaic effects. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 93, 261108."

⁸² "Fujiyama, Y., et al. GaInN/GaN p-i-n light-emitting solar cells. *Physica Status Solidi C*. 2010, Vol. 7, 2382.."

⁸³ "Kuwahara, Y., et al. Nitride-based light-emitting solar cell. *Physica Status Solidi C*. 2010, Vol. 7, 1807."

⁸⁴ "Farrell, R.M., et al. High quantum efficiency InGaN/GaN multiple quantum well solar cells with spectral response extending out to 520 nm. *Applied Physics Letters*. 2011, Vol. 98, 201107."

⁸⁵ "Jeng, M.J., Lee, Y.L. and Chang, L.B. Temperature dependences of In_xGa_{1-x}N multiple quantum well solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009, Vol. 42, 105101."

⁸⁶ "Lai, K.Y., et al. Effect of indium fluctuation on the photovoltaic characteristics of InGaN/GaN multiple quantum well solar cells. *Applied Physics Letters*. 2010, Vol. 96, 081103."

simulation d'une telle structure par Asgari *et al.*⁸⁷ présentait un rendement de 35%. A ce jour, le meilleur rendement obtenu expérimentalement est de 2,95 % par Dahal *et al.*⁸⁸

3.5.2. Cellules hétérojonction pin :

En 2007, Jani *et al.*⁸⁹ ont élaboré une cellule PV dont les caractéristiques sont une tension en circuit ouvert (V_{co}) de 2,4V, une densité de courant de court-circuit (I_{cc}) de 3,7mA/cm² et un facteur de forme (FF) de 0,78. Le schéma de la structure est présenté sur la **figure 36**.

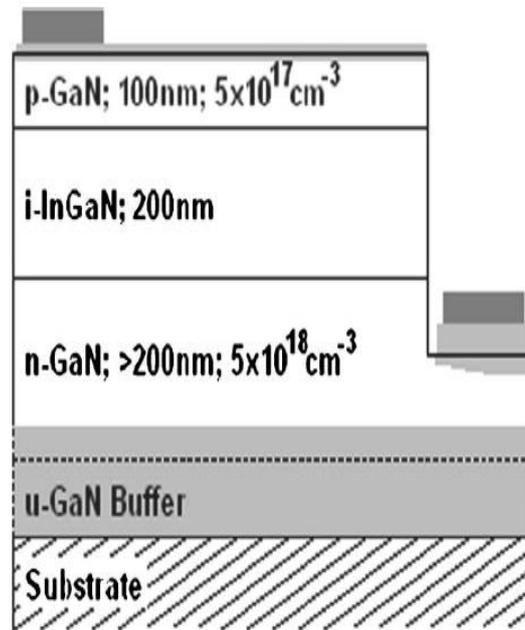


Figure 36: Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Jani *et al.*

En 2008, Neufeld *et al.*⁹⁰ ont également rapporté des résultats intéressants avec un V_{co} de 1,81V, un I_{cc} de 4,2mA/cm² et un FF de 0,753, donnant une puissance maximum de 5,7mW/cm² (rendement de 4,4%). Le schéma de la structure donnée sur la **figure 37**.

⁸⁷ "Asgari, A. and Khalili, Kh. Temperature dependence of InGaN/GaN multiple quantum well based high efficiency solar cell. Solar Energy Materials & Solar Cells. 2011, Vol. 95, 3124–3129."

⁸⁸ "Dahal, R., et al. InGaN/GaN multiple quantum well concentrator solar cells. Applied Physics Letters. 2010, Vol. 97, 073115."

⁸⁹ "O. Jani. Effect of phase separation on performance of III-V nitridesolarcells. Papier présenté à la 22ème conférence européenne de l'énergie solaire photovoltaïque, 2007."

⁹⁰ "C. J. Neufeld, N. G. Toledo, S. C. Cruz, M. Iza, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra. High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap. Applied Physics Letters, 93(14) :143502, 2008."

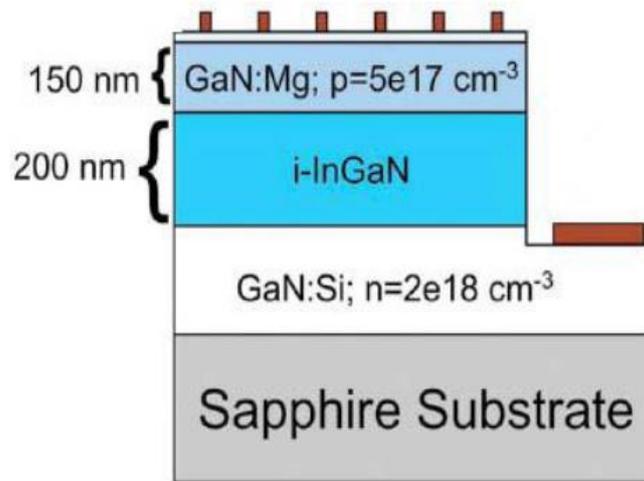


Figure 37: Schéma de la cellule solaire pin en double hétérojonction proposée par Neufeld et al.

En 2012, Tran et al.⁹¹ ont étudié une cellule photovoltaïque composée d'une couche active de 300nm d' $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}$ (**Fig. 38**) dont le rendement de conversion atteint 7%. Bien que cette valeur soit la plus élevée à ce jour, elle reste faible en comparaison des résultats obtenus pour d'autres filières PV en couches minces.

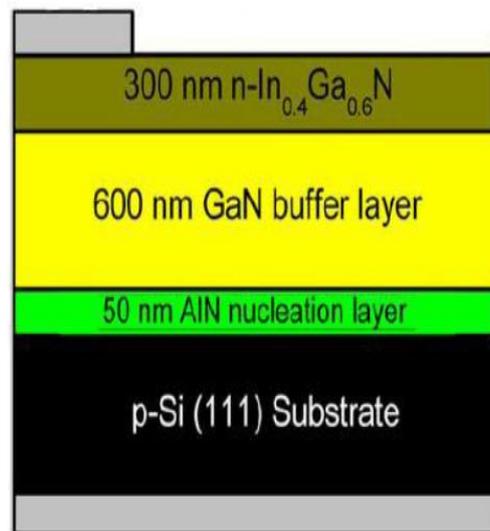


Figure 38: Schéma de la cellule solaire pin à hétérojonction n- $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}/\text{p-Si}$ proposée par Tran et al.

⁹¹ “Binh-Tinh Tran, Edward-Yi Chang, Hai-Dang Trinh, Ching-Ting Lee, Kartika Chandra Sahoo, Kung-Liang Lin, Man-Chi Huang, Hung-Wei Yu, Tien-Tung Luong, Chen- Chen Chung, and Chi-Lang Nguyen. Fabrication and characterization of n $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{p-Si}$ solar cell. Solar Energy Materials and Solar Cells, 102(0) :208 – 211, 2012.”

3.5.3. Cellules homojonction pin :

En 2009, Zeng et al⁹².ont proposés des cellules solaires pin uniquement à base d'InGaN dans le but d'augmenter le taux d'incorporation en indium et l'épaisseur des couches mais aussi de résoudre le problème de la formation d'un contact ohmique entre le métal et le GaN de type P.

La figure 39 présentent la structure de cette cellule solaire.

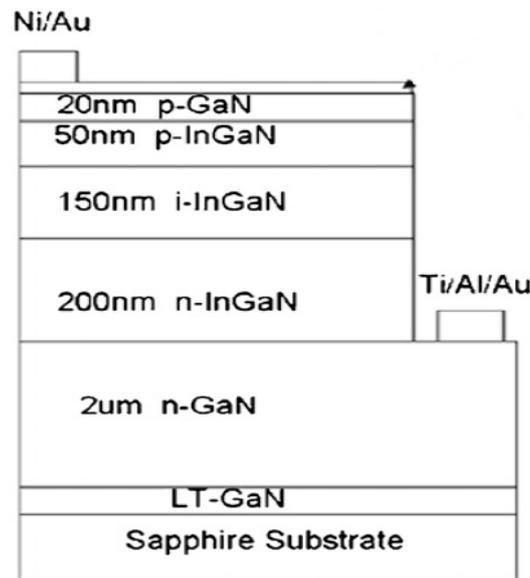


Figure 39: Schéma de la cellule solaire pin à double hétérojonction proposée par Zeng et al.

Par ailleurs, Cai et al⁹³ 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 $h = 5,14\%$ pour une incorporation de 4% d'indium, la qualité cristalline du matériau InGaN "épais" étant toujours au cœur du problème. La figure 40 présentent la structure de cette cellule solaire.

⁹² "S. W. Zeng, B. P. Zhang, J. W. Sun, J. F. Cai, C. Chen, and J. Z. Yu. Substantial photoresponse of InGaN p-i-n homojunction solar cells. Semiconductor Science and Technology, 24 :055009, 2009."

⁹³ "X.-M. Cai, S.-W. Zeng, and B.-P. Zhang. Favourable photovoltaic effects in InGaN pin homojunction solar cell. Electronics Letters, 45(24) :1266 – 1267, 2009."

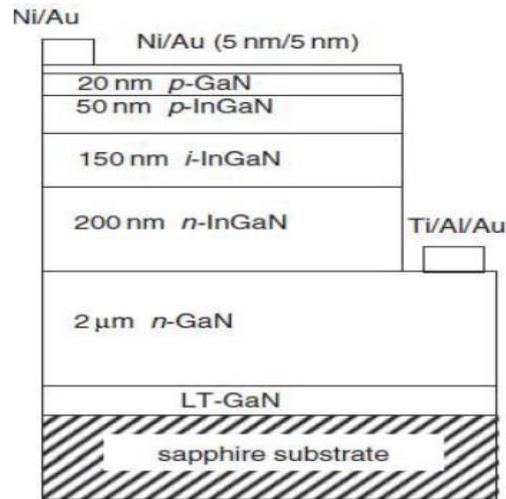


Figure 40: Schéma de la cellule solaire pin proposée par Cai et al.

En 2013, Islam et al⁹⁴ ont élaboré une structure homo-jonction $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ de type $n^+ - p$ sur $0,65 \mu\text{m}$ de GaN. Sous ces auteurs obtiennent une tension en circuit ouvert de $1,4\text{V}$ 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 $1,5\text{V}$ et une densité de courant à court-circuit de $0,5\text{mA}/\text{cm}^2$ d'où un rendement de conversion très faible $\eta < 1\%$. La figures 41 présentent la structure de cette cellule solaire.

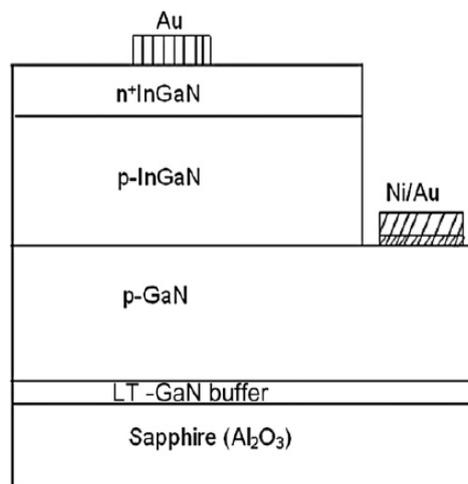


Figure 41: Schéma de la cellule solaire pin homojonction proposée par Islam et al.

⁹⁴ "Md. Rafiqul Islam, Md. RejviKaysir, Md. Jahirul Islam, A. Hashimoto, and A. Yamamoto. MOVPE Growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \leq 0.4$) and Fabrication of Homojunction Solar Cells. Journal of Materials Science & Technology, 29(2) :128 – 136, 2013."

3.5.4. Cellules InGaN/GaNMQWs :

Dans l'optique d'augmenter l'épaisseur des couches d'InGaN et l'incorporation d'indium des multi-puits quantiques (MQW pour Multiple Quantum Wells) InGaN/GaN ont été développés en tant que couche active 40 . Ces MQWs sont généralement déposés entre deux couches de GaN de type P et N. Le principal avantage de ce type de structure réside dans une amélioration de la qualité cristalline du matériau InGaN puisque ce dernier est contraint, n'étant déposé que sur de faibles épaisseurs et bien en dessous de l'épaisseur critique de relaxation des contraintes. À ce jour, le meilleur rendement de conversion de 2,95% est bien inférieur aux données théoriques annonçant 35%41. Les recombinaisons radiatives et la réabsorption des photons dans les structures MQWs favorise le choix des couches simple d'InGaN épaisses pour les applications photovoltaïques. La structure développée par Dahalet al. Présenté sur la **figure 42**.

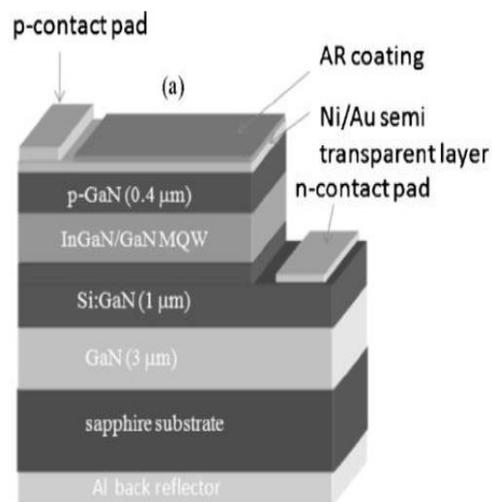


Figure 42 : Schéma de la cellule solaire pin MQWs avec 12 périodes InGaN(3nm)/GaN(17nm) proposée par Dahal et al.

3.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de caractérisation des couches minces et les substrats de croissance. Aussi on a déduit le dopage de procédé. Nous avons présenté aussi les techniques de caractérisation utilisés, et les différentes structures proposés en expérimentale de notre cellule solaire étudiée.

L'état de l'art des cellules PV d'InGaN montre que ce matériau possède des atouts non négligeables, pour la réalisation de cellules solaires haut rendement.

CHAPITRE 4 :

Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule d'InGaN, simulation et résultats

4.1. Introduction :

En général, la modélisation analytique basée sur l'utilisation d'équations pour estimer le comportement réel des cellules solaires, nécessite une description détaillée du dispositif à simuler et des matériaux qui sont utilisés dans sa construction. La sélection du type de matériau approprié et de sa composition ainsi que ses propriétés électriques et physiques sont très importants et influent directement sur le rendement des cellules.

D'après la littérature existante, les matériaux les plus souvent utilisés sont les semi-conducteurs simples Si et Ge et les composés binaires GaAs et InP. En addition à ceux-là, de nombreux composés ternaires et quaternaires sont également utilisés dans la plupart des cas. Le grand nombre de ces combinaisons fournit aux chercheurs de dispositifs électroniques une précieuse abondance de choix. Cependant, les propriétés électriques et physiques de chaque matériau ne peuvent pas être calculées théoriquement avec une précision suffisante. Au lieu de cela, ils doivent être mesurés par des expériences précises et coûteuses. Cependant, pour le reste des composés binaires, seulement leurs principales et plus importantes propriétés sont publiées. Pour les composés ternaires et quaternaires, très peu de leurs propriétés est disponible.

Dans la plupart du temps, la seule solution est fournie par interpolation des propriétés de leurs composants binaires. SCAPS dispose d'une bibliothèque des propriétés de nombreux matériaux utilisés dans les dispositifs électroniques. Cependant, dans un effort pour pousser le rendement des cellules solaires à des niveaux supérieurs, les chercheurs ont tendance à utiliser de nombreux matériaux exotiques.

4.2. Présentation du logiciel SCAPS :

SCAPS est un logiciel à application sur Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couches minces. Il a été intensivement, testé sur des cellules solaires à base de CdTe et Cu(In,Ga)Se₂ par M.Burgelman et al. Les résultats simulés et mesurés ont été en très bon accord ^{95,96}. Au laboratoire LPDS il a été utilisé pour la première fois sur des piles solaires à base de Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs.

⁹⁵ “ A. Niemegeers and M. Burgelman, "Effects of the Au/CdTe back contact on I(V) and C(V) characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells", J.Appl.Phys.,Vol.81,N°6 (1997), pp.2881-2886.”

⁹⁶ “ M. Burgelman, P. Nollet and S. Degrove, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", Thin Solid Films., 362-361(2000),pp.527-532.”

Avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre défini de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire⁹⁷.

4.3. Simulation d'une cellule solaire à base d'InGaN :

4.3.1. Description de la structure :

Notre structure de référence est une cellule solaire mono jonction à base d'InGaN d'épaisseur totale $d=400$ nm, de largeur $500 \mu\text{m}$, composée d'une couche **P** (Emetteur-Accepteur) d'épaisseur d_E dopée à une concentration N_a et d'une couche **N** (Base-Donneur) d'épaisseur d_B dopée à une concentration N_d . Pour la collecte du courant nous avons positionné des électrodes en haut et en bas de la structure, faisant la largeur de la cellule.

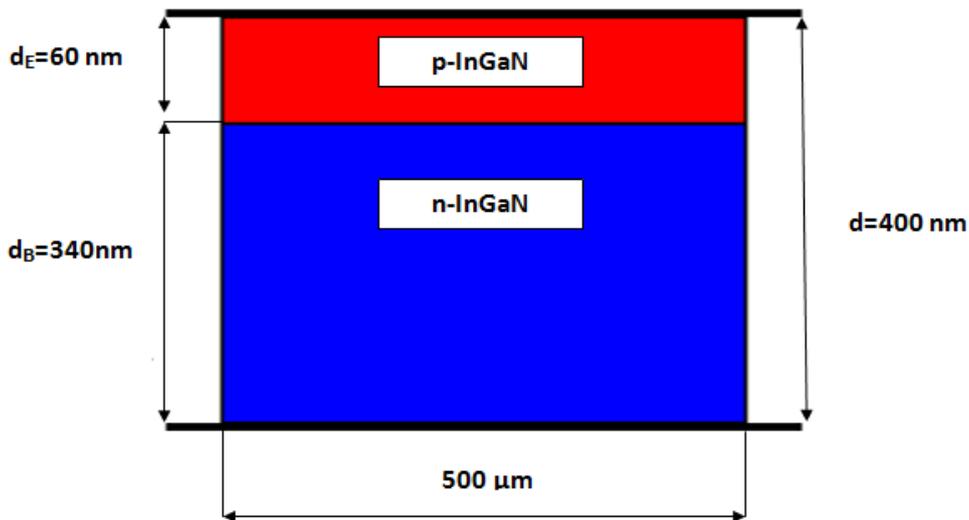


Figure 43 : Structure de la cellule à simuler sous SCAPS

4.3.2. Paramètres de simulation :

L'InGaN, matériau utilisé dans notre travail est défini à partir de ses paramètres tirés de la littérature, dont les valeurs sont rassemblées dans le **tableau 8**.

⁹⁷ “ S. Khelifi et A. Belghachi, Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d'une Cellule Solaire GaAs. Rev. Energ. Ren. Vol.7 (2004)13-21, Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semiconducteurs, Centre Universitaire de Béchar”

Paramètres	Valeurs
Bande interdite E_g (eV)	1.32
Permittivité	13.13
Affinité électronique χ (eV)	5.56
Densité d'états des électrons N_C ($\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	1.39
Densité d'états des trous N_V ($\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	4.075
Durée de vie des électrons et des trous τ_{n0} et τ_{p0} (ns)	6.5
Vitesse de recombinaison en surface S_n et S_p (cm/s)	1000

Tableau 8 : Paramètres de simulation à 300 K pour une concentration de 65% de l'InN

4.3.3. Influence du dopage sur les caractéristiques de la cellule :

Pour une épaisseur totale de **400 nm** de la cellule, nous avons calculé les rendements de la cellule pour différentes valeurs de la concentration du dopage N_a de l'émetteur (couche P) allant de $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et des valeurs du rapport $N_a/N_d = 1$. Les **figures 44, 45** illustrent l'influence du dopage N_a de l'émetteur sur le courant de court-circuit et sur la tension à circuit ouvert de la cellule.

- *Le courant de court circuit :*

Le courant de court circuit I_{cc} est donné par l'équation (1.3) qui est intitulée dans la partie 1.7.1 :

$$I_p(V_p) = I_{cc} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

D'après la **figure 44**, la densité du courant de court circuit I_{cc} augmente avec la diminution de la concentration du dopage N_a ($N_a = N_d$), et atteint une valeur maximale de **33.54 mA/cm²** et de dopage de $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

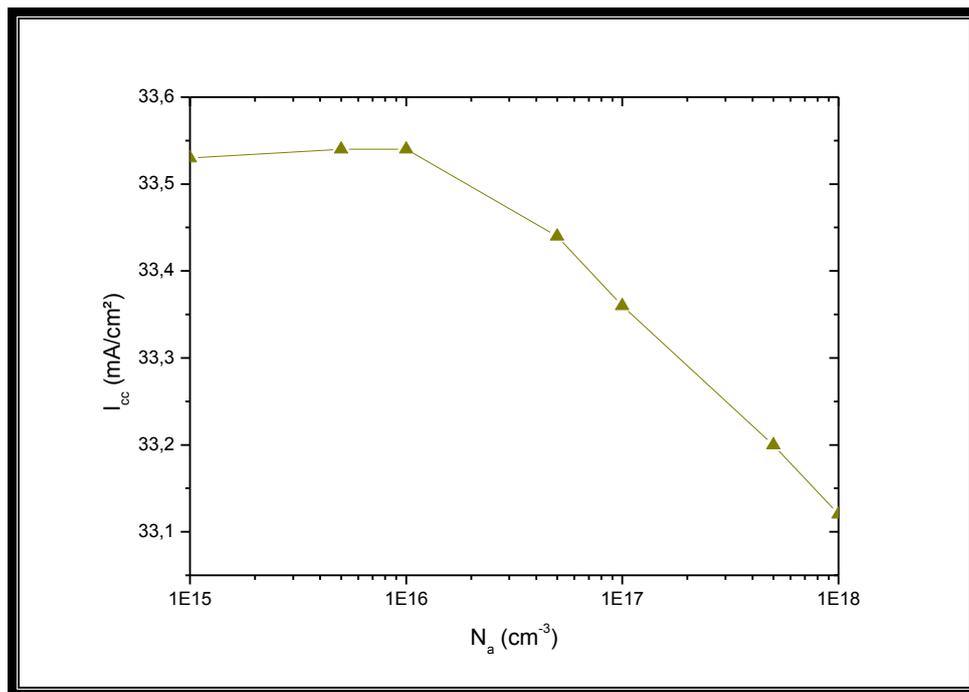


Figure 44 : Influence du dopage de l'émetteur N_a sur le courant de court circuit I_{cc} ($N_a=N_d$).

- **La tension de circuit ouvert :**

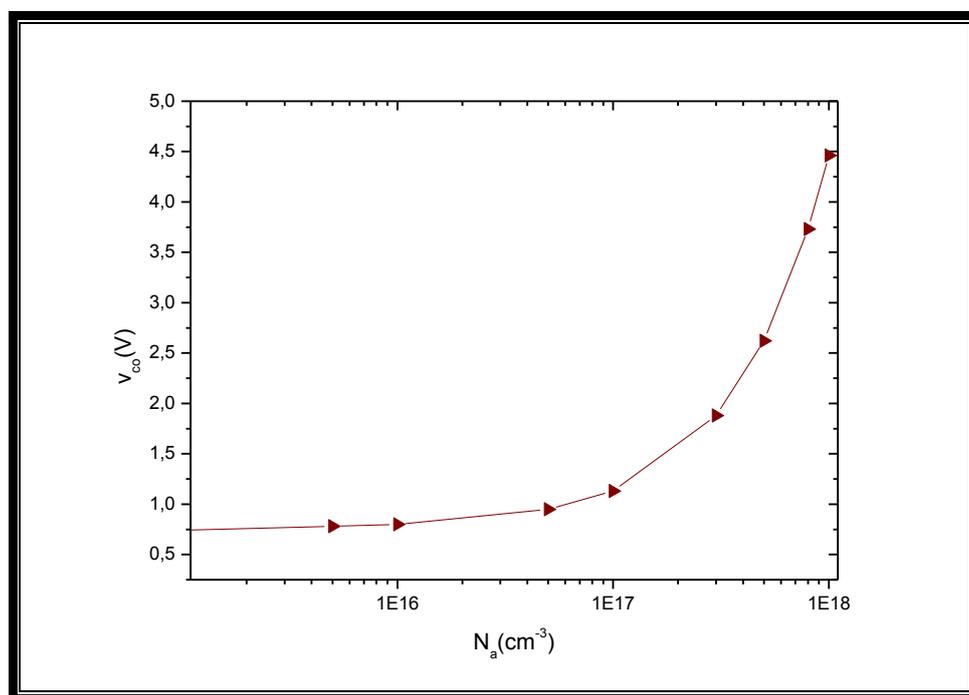


Figure 45 : Influence du dopage de l'émetteur sur la tension à circuit ouvert ($N_a=N_d$).

La tension à circuit ouvert V_{co} est donnée par la relation:

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.4)$$

D'après l'équation (1.4) on peut constater que la tension V_{co} décroît avec la diminution de N_a , et présente un V_{co} maximum (4.46 V) pour $N_a = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

- **Le facteur de forme :**

C'est un paramètre important qui dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction PN, et du matériau utilisé.

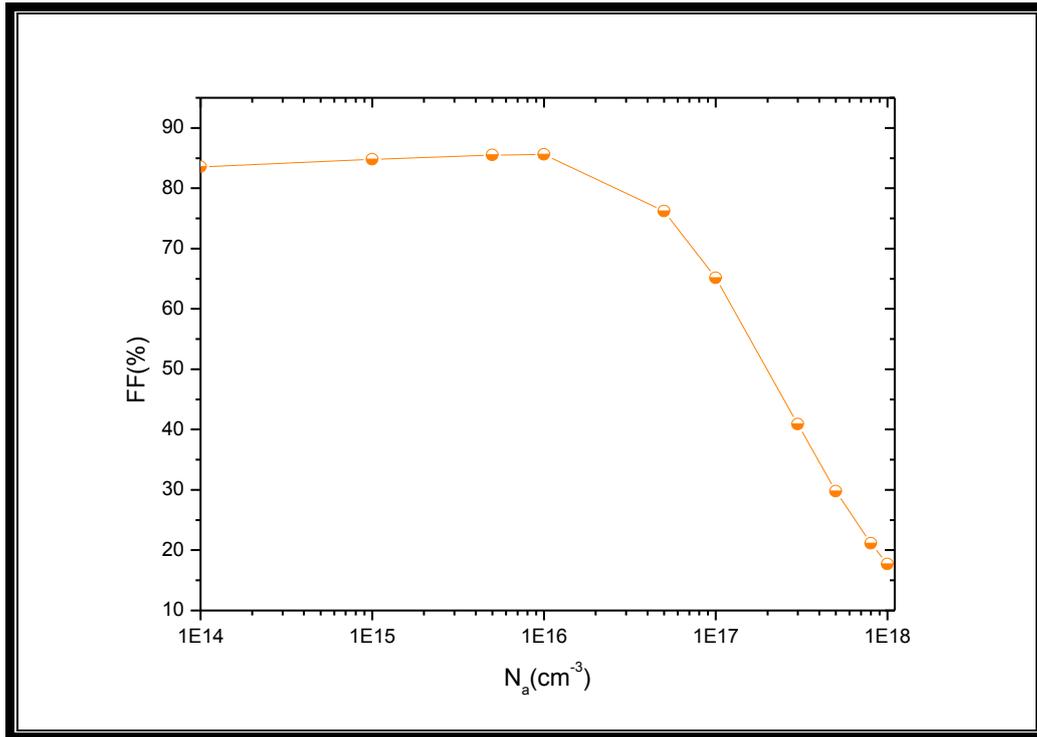


Figure 46 : Influence de dopage sur le facteur de forme.

La **figure 46** illustre une simulation du facteur de forme en fonction de la concentration du dopage N_a de l'émetteur, on remarque qu'un pourcentage de presque **85 %** a été atteint avec $9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ de dopage, mais des valeurs plus élevées de ce dernier provoquent une diminution remarquable du facteur de forme.

- **Le rendement :**

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque. Le rendement, comme l'indique la **figure 47** subit une augmentation puis se stabilise pour les valeurs croissantes de la concentration de dopage N_a en passant par un maximum $\eta = 26.29 \%$ à $N_a = 8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour un rapport $N_a/N_d = 1$, alors N_d est aussi égale à $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

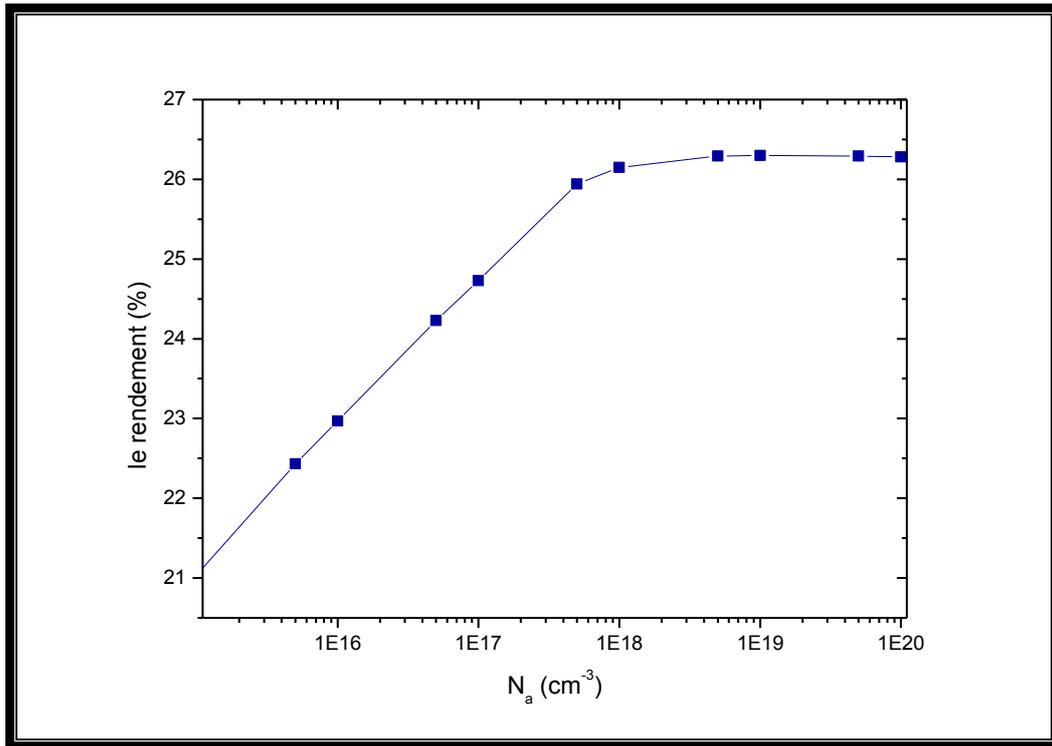


Figure 47 : Influence du dopage de l'émetteur sur le Rendement.

D'après ces résultats, On constate que le meilleur dopage ne prend pas la valeur de $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ comme le montrait la figure 47, considérons les différents paramètres étudiés tel que la tension de circuit ouvert V_{co} et le facteur de forme FF, qui sont des valeurs aberrantes de ce qui nous a empêché d'en tenir compte, où la valeur de la tension de circuit ouvert $V_{co} = 4.46 \text{ V}$, et la valeur de facteur de forme FF ne s'affiche pas dans le secteur de simulation, cela veut dire qu'elle est une valeur non comptabilisée. D'après les calculs, la valeur la plus proche de la littérature est de $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ qui correspond à $V_{co} = 1.13 \text{ V}$, et $FF = 65.10 \%$ qui sont des valeurs raisonnables.

4.3.4. Influence de l'épaisseur de l'émetteur d_E :

Dans notre simulation, nous avons fixé la concentration du dopage N_a de l'émetteur (couche P), on prend la meilleure valeur trouvée, après avoir la simulation précédente des paramètres étudiés qui est de valeur $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, et on fait varier l'épaisseur de l'émetteur d_E et voir l'influence sur les différentes caractéristiques de la cellule solaire étudiée.

- **Le courant de court circuit :**

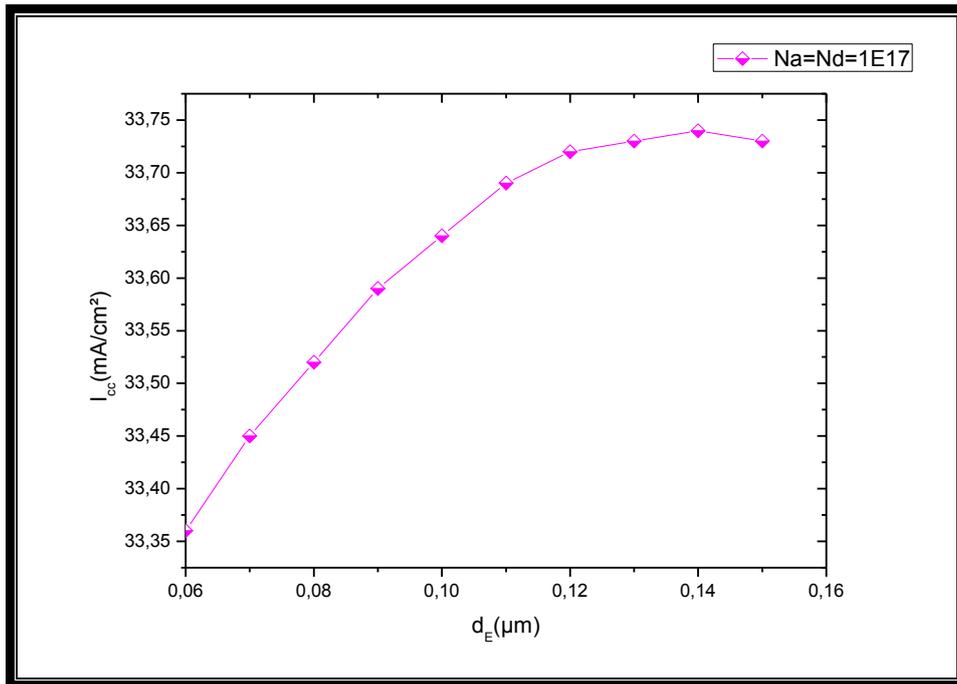


Figure 48 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le courant de court circuit.

D'après la **figure 48**, la densité du courant I_{cc} croit de manière remarquable lorsque l'épaisseur de la couche P augmente, jusqu'à l'épaisseur 140 nm ($I_{cc} = 33.74 \text{ mA}/\text{cm}^2$), puis il diminue pour les valeurs supérieures.

- **La tension de circuit-ouvert :**

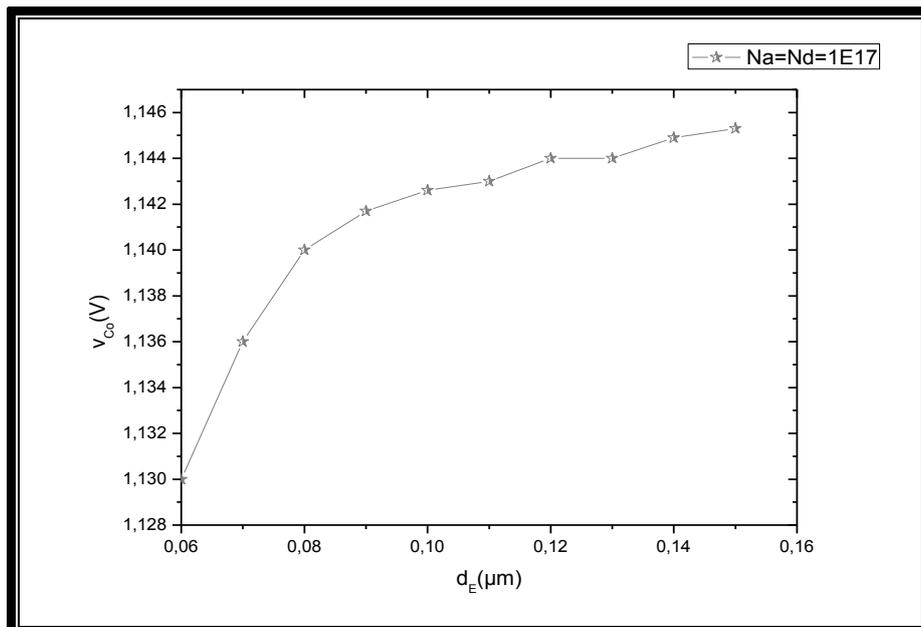


Figure 49 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la tension de court ouvert.

D'une part, on peut constater que la tension de circuit ouvert V_{co} croît avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, et atteint une meilleure valeur de 1.145 V pour 0.15 μm d'épaisseur.

- **Le facteur de forme :**

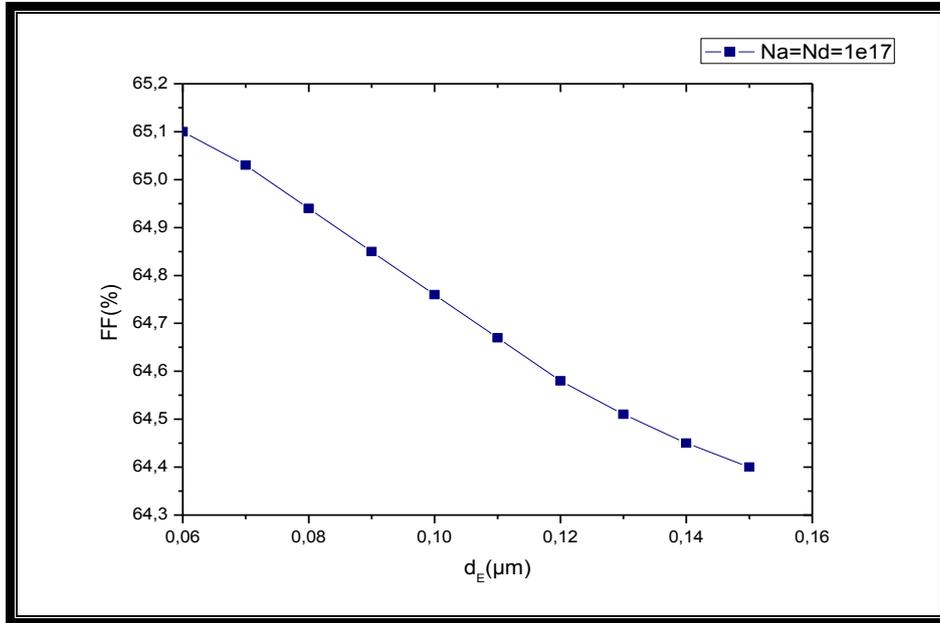


Figure 50 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le facteur de forme.

Le facteur de forme est donnée par l'équation (1.5) qui est intitulée dans la partie 1.7.3.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co}.I_{cc}} = \frac{V_m.I_m}{V_{co}.I_{cc}} \quad (1.5)$$

D'après cette figure, on remarque que lorsque l'épaisseur de la couche P augmente, le facteur de forme FF diminue d'où la valeur la plus basse est de 64.40 % avec un épaisseur de 0.15 μm .

- **Le rendement :**

On rappelle que le rendement d'une cellule solaire est relié à la densité du courant de court circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le facteur de forme FF par la relation :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = FF \cdot \frac{V_{co}.I_{cc}}{P_{in}} \quad (1.6)$$

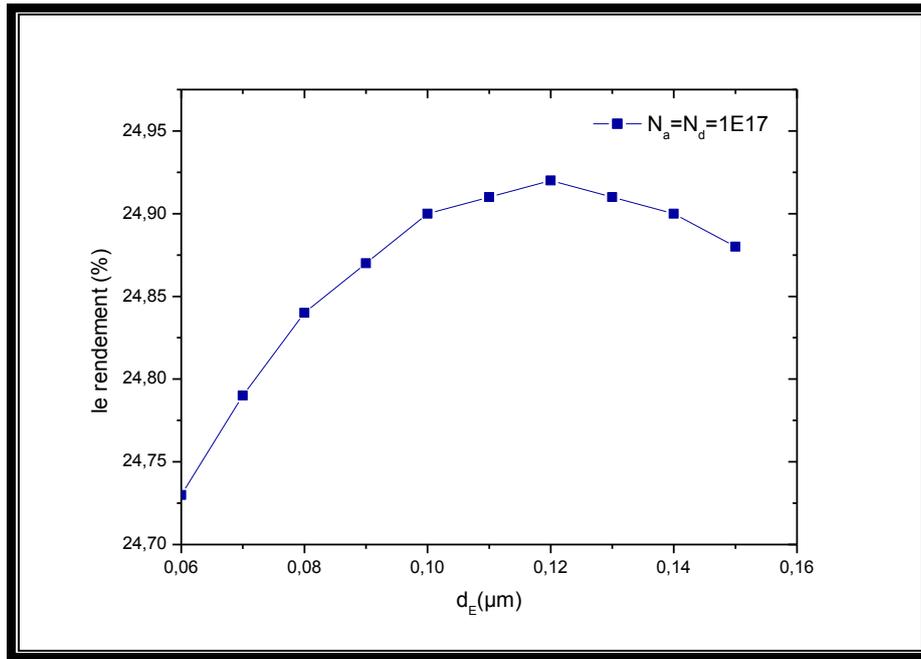


Figure 51 : Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement de la cellule.

Avec une concentration du dopage de $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et une épaisseur totale de la cellule de **400nm**, le rendement η et la densité de courant de court circuit I_{cc} correspondants sont calculés en faisant varier l'épaisseur d_E de l'émetteur (couche P) de **60nm** à **160nm**. En conséquence, lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente, le rendement et la densité de courant augmentent d'abord puis diminuent à la fois. La courbe de la **figure 51** montre que le meilleur rendement est obtenu est de **24,92%** avec **120nm** d'épaisseur de l'émetteur.

4.3.5. Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule solaire d'InGaN:

D'après les résultats obtenues jusqu'ici, et pour étudier l'effet de température sur les paramètres de la cellule solaire d'InGaN, nous considérons les meilleurs résultats de simulation trouvés; le meilleur dopage de l'émetteur $N_a = N_d = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, et la meilleur épaisseur de la couche P qui est de 120nm. Ensuite, on varie la température de 5° C à 50° C , on étudie l'influence de la température et on reporte les résultats.

- **Le courant de court-circuit :**

On rappelle que le courant de court-circuit est en relation avec la température suivant l'expression :

$$I_p(V_p) = I_{cc} - I_s \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

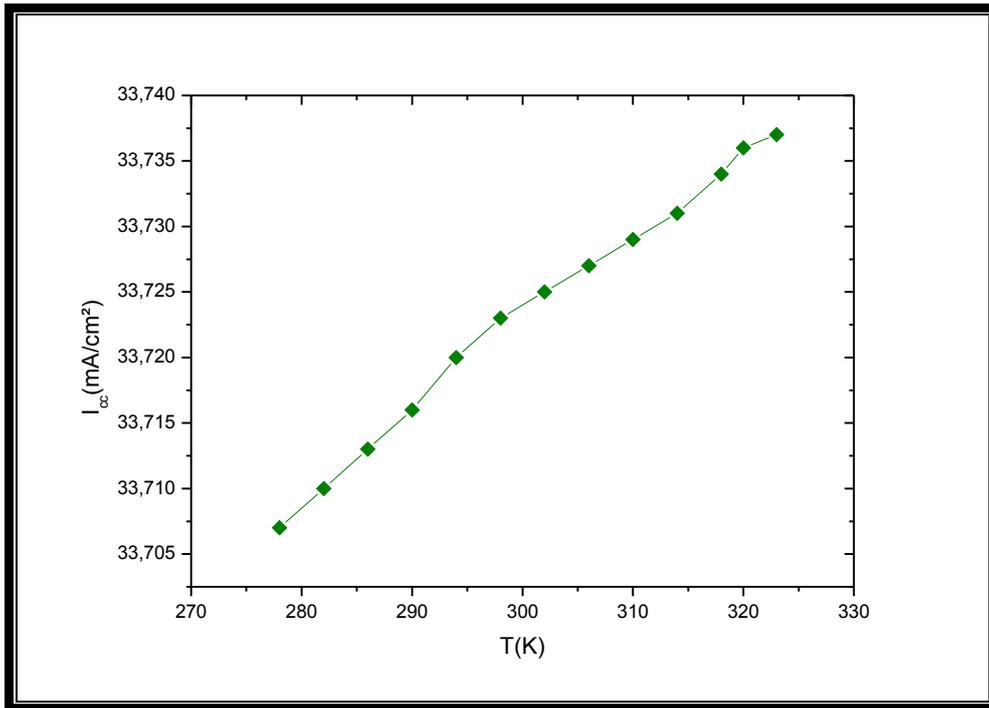


Figure 52 : Influence de la température sur le courant de court-circuit

Nous avons également observé une augmentation linéaire de I_{cc} avec la température dans la gamme $278\text{-}323\text{ K}$. Nous indiquons que le coefficient de température du courant de court circuit calculé ($\mu I_{cc} = 0.0021\text{ A/K}$) est en bon accord avec celui obtenu par *De Soto et al*⁹⁸ (0.00238 A/K) pour la même technologie sous les mêmes conditions de fonctionnement en utilisant l'équation (4.1).

$$I_{ph}(T) = I_{ph,ref} + \mu I_{cc} (T - T_{ref}) \quad (4.1)$$

Avec :

- μI_{cc} : est le coefficient de température du courant de court-circuit [A/K].
- $T_{ref} = 25^\circ\text{C} = 298.15\text{ K}$.
- I_{ph} : le courant photogénéré [A]

Le photocourant (I_{ph}) d'une cellule solaire augmente généralement légèrement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est due à la décroissance de la largeur de la bande interdite (E_g) du matériau semi-conducteur; ce qui permet d'utiliser un peu plus de photons de basse énergie. En conséquence, le courant de court-circuit (I_{cc}) de la cellule augmente.

⁹⁸ « W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman, Solar Energy 80 (2006) 78–88.

- **La tension de circuit-ouvert :**

D'une part, on a constaté dans la partie 1.7.2 de ce mémoire une relation entre la tension de circuit-ouvert V_{co} et la température, dans l'expression suivante :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.4)$$

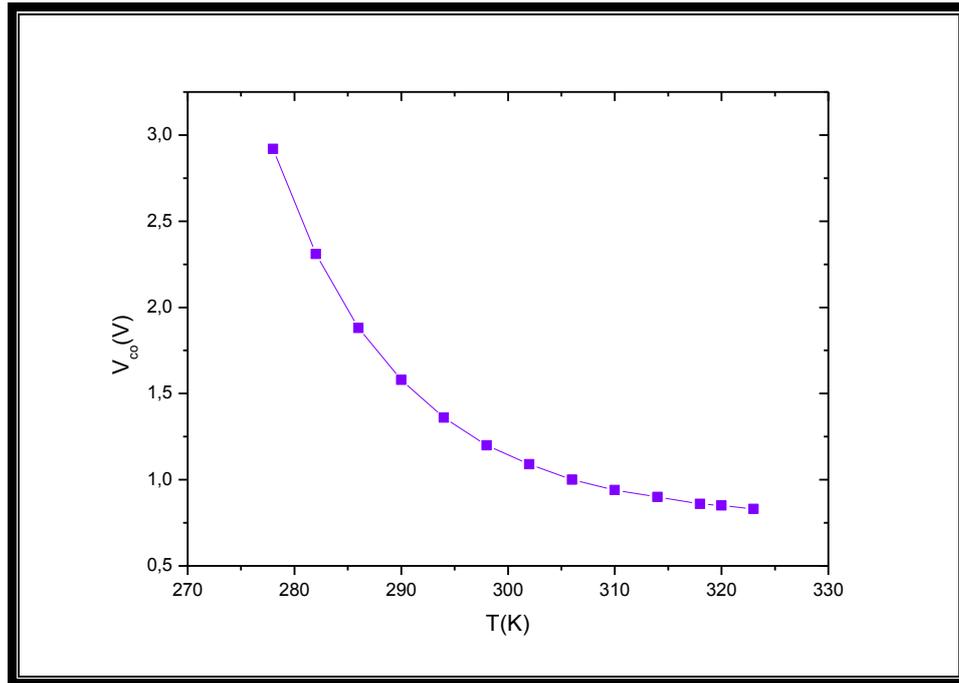


Figure 53 : Influence de la température sur la tension de circuit-ouvert

On peut voir que l'augmentation de la température mène à une diminution de V_{co} . Le comportement thermique de V_{co} sous un éclairage constant est montré dans la **Fig.53**, la tension en circuit ouvert V_{co} diminue avec la croissance de la température par un ordre de grandeur de -2.1 mV/K ; ce qui est en bon accord avec l'évaluation de *Singh et al*⁹⁹.

⁹⁹ “ P. Singh, S.N.Singh, M. Lal, M.Husain, Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 1611–1616.”

- **Le facteur de forme :**

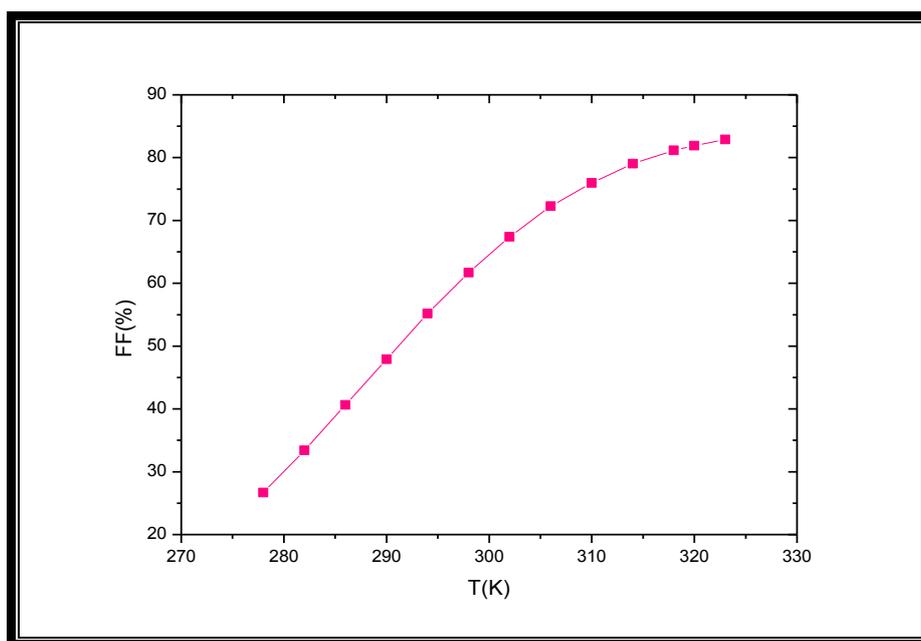


Figure 54 : Influence de la température sur le facteur de forme.

La variation de FF avec la température dans la gamme $278-323 K$ pour les cellules solaires à base d'InGaN est illustrée dans la **Fig.54**; avec un éclairage de $1000 W/cm^2$, le FF croit avec l'augmentation de la température. Ceci est vrai pour l'ensemble des cellules solaires ¹⁰⁰.

- **Le rendement :**

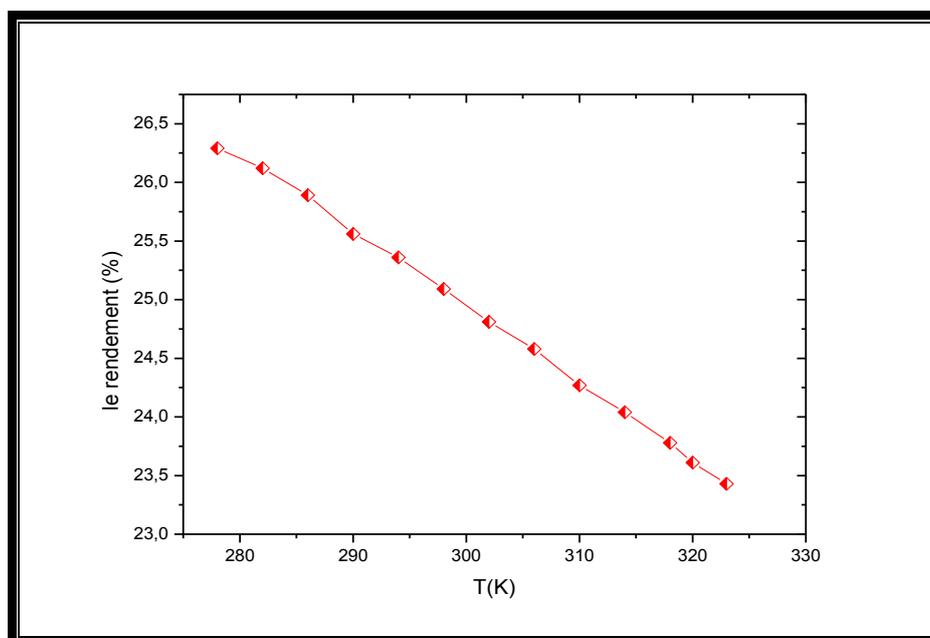


Figure 55 : Influence de la température sur le rendement.

¹⁰⁰ “ J. Krustok, R. Josepson, M. Danilson, D Meissner, Solar Energy (2009), doi:10.1016/j.solener.2009.09.011.”

La Fig. 55 illustre l'allure du rendement de la conversion PV en fonction de la température, nous constatons que la valeur maximum de η est au-dessous de la température ambiante. Dans notre gamme de température 278-325 K; la diminution du rendement de la conversion PV est presque linéaire avec la température, la pente correspondante ($d\eta/dT=-0.063 \text{ \% /K}$) est en accord avec l'évaluation de Singh et al; pour les cellules solaires d'InGaN ($d\eta/dT=-0.042 \text{ \% /K}$)¹⁰¹.

4.3.6. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base d'InGaN :

Pour les valeurs de dopage de $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, une épaisseur de $0.12 \text{ }\mu\text{m}$ et un meilleur rendement de 24.92 %, On a obtenu ces courbes qui sont indiquées sur les figures 56, 57, 58 et 59. Ces courbes représentent les caractéristique I-V de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 278K, 300K, 400K et 500K respectivement sous un éclaircissement constant (1000 W/m^2).

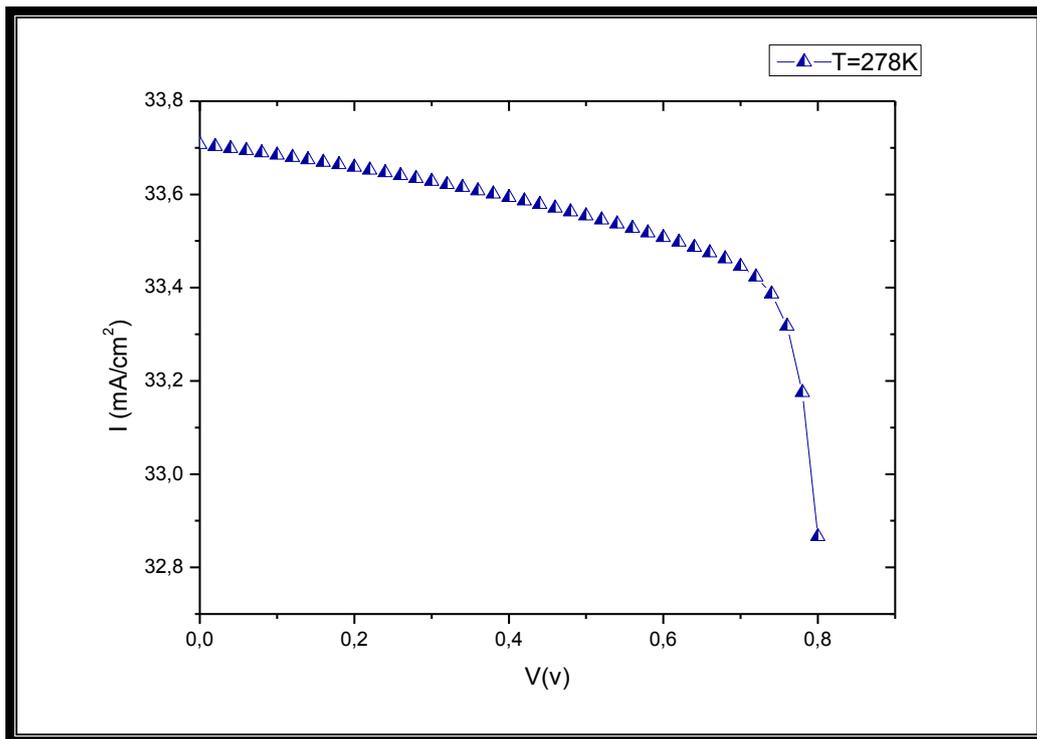


Figure 56: la caractéristique I-V de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 278K(5°C), $I_{cc}=33.7 \text{ mA/cm}^2$

¹⁰¹ “Salaheddine BENSALÉM. Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires. Mémoire de magister en physique. universite Ferhat Abbas - setif. 2011”

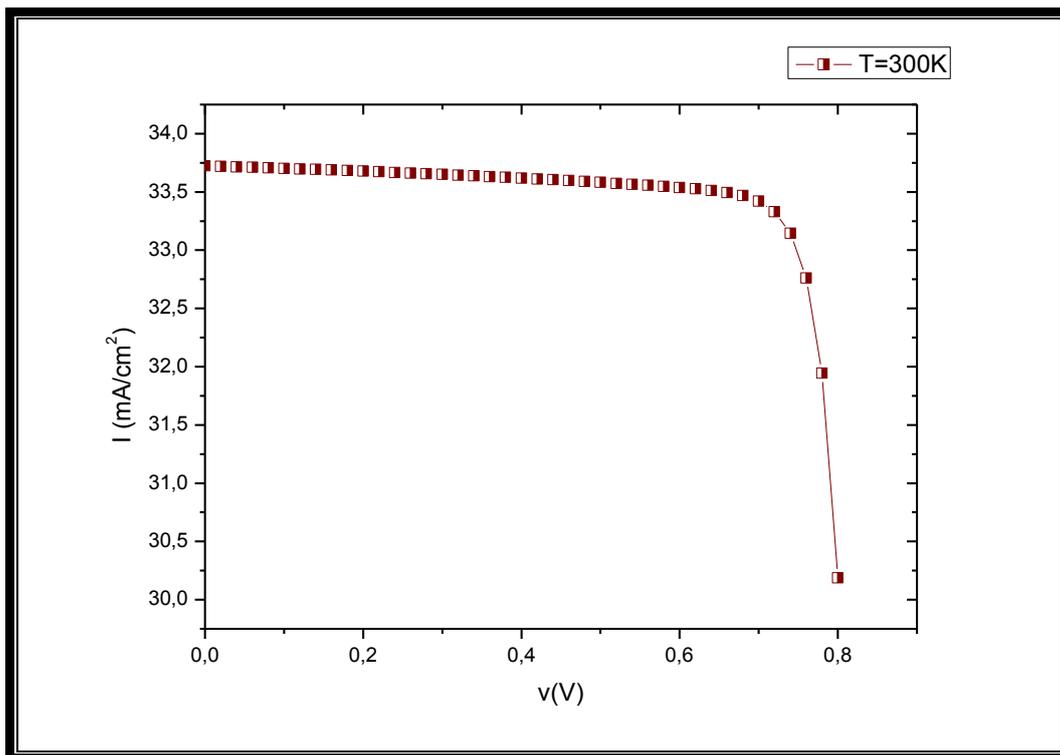


Figure 57: la caractéristique I-V de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 300K(27°C), $I_{cc}=33.75 \text{ mA/cm}^2$

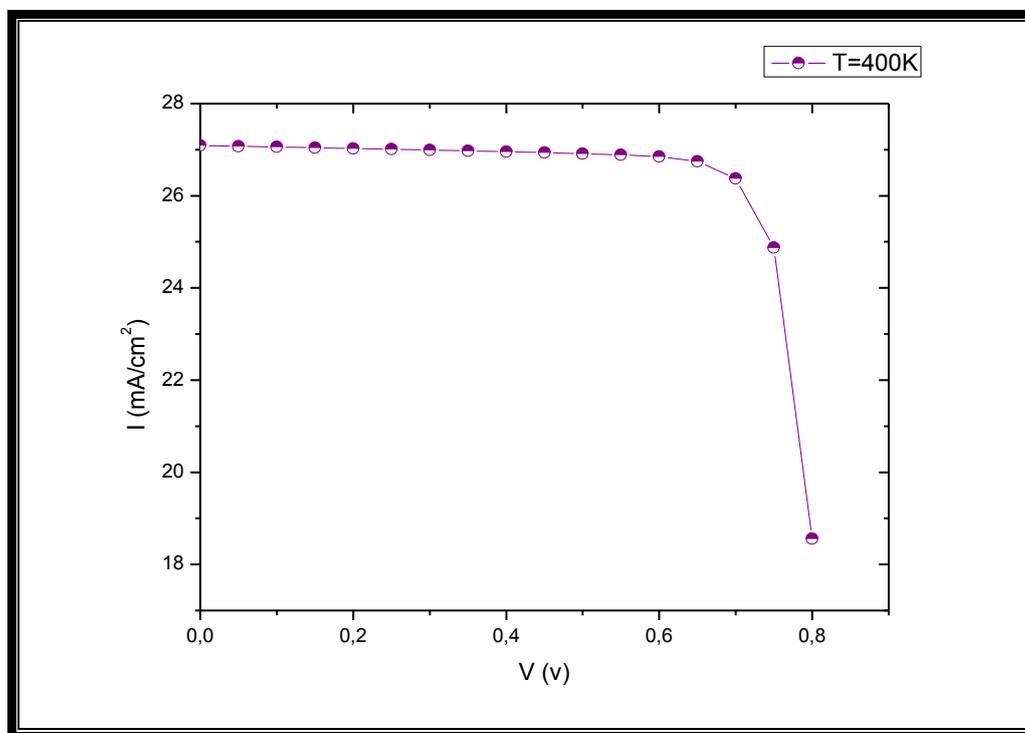


Figure 58 : la caractéristique I-V de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 400K(127°C), $I_{cc}=27.1 \text{ mA/cm}^2$

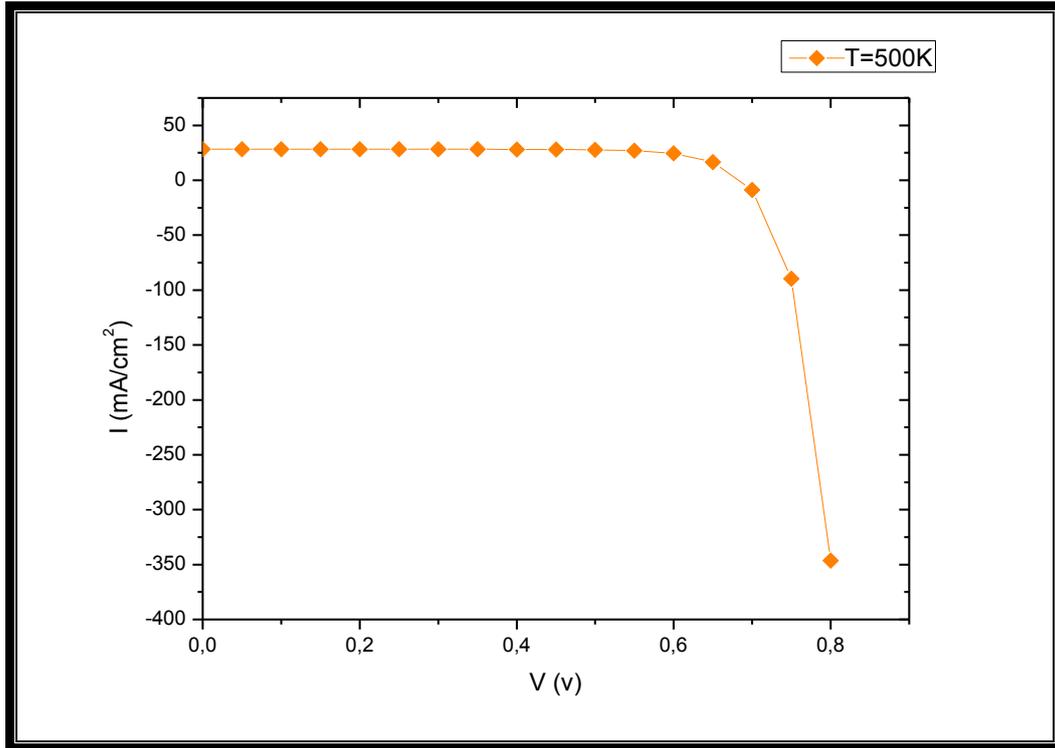


Figure 59 : la caractéristique I-V de la cellule solaire à base d'InGaN à la température 500K(227°C), $I_{cc}=26 \text{ mA/cm}^2$

D'après les courbes de la caractéristiques I-V de la cellule à différentes température, on constate que la caractéristique I-V la plus proche de la littérature qui est à la température ambiante de 300 K.

4.4. Comparaison avec des travaux similaires

D'après notre étude nous avons abouti les résultats suivants : pour $d_E=120\text{nm}$, $d_B=280\text{nm}$, $N_a=N_d=1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, les paramètres optimaux sont : $I_{cc}=33.72 \text{ mA/cm}^2$, $V_{co}=1.143 \text{ V}$, $FF=64.57\%$ et $\eta=24.92\%$ à 300 K de température,

Des travaux similaires ont été effectués par Zhang.X et J.Li¹⁰², X.Shen et S.Lin¹⁰³. Zhang.X et J.Li ont simulé une cellule solaire en $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ monojonction en utilisant le logiciel AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structure), ils ont trouvé les performances suivantes $\eta=20.284 \%$, $V_{co}=0.834 \text{ V}$, $I_{cc}=29.613 \text{ mA/cm}^2$ et $FF=82.2 \%$

¹⁰² Zhang.X et J.Li, "Simulation of $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}$ single-junction solar cell", j of phys.D:Appl.Phys.40,7335-7338 (2007)."

¹⁰³ " X.Shen, S.Lin, " Simulation of the InGaN-based tandem solar cell", Photovoltaic cell and module Technologies Ii, proc. of SPIE Vol.7045,70450, 2008. "

pour des dopages de $N_a=N_d= 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ et d'épaisseurs $d_E=130\text{nm}$, $d_B=270\text{nm}$. X.Shen et S.Lin ont utilisé le même logiciel pour déterminer le rendement de conversion des cellules mono, double et triple jonction, ils ont trouvé un rendement $\eta=24.95 \%$, $V_{co}=0.96 \text{ V}$, $I_{cc}=29.58 \text{ mA/cm}^2$ et $FF=88 \%$ pour la même cellule et les mêmes paramètres technologiques susmentionnés pour une température ambiante de **300 K**.

Yacine Marouf a simulé une cellule solaire en InGaN monojonction en utilisant le logiciel **Atlas Silvaco**. il a trouvé les performances suivantes $\eta=21.70 \%$, $V_{co}=0.678 \text{ V}$, $I_{cc}=37.82 \text{ mA/cm}^2$ pour des dopages de $N_a=N_d= 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ et d'épaisseurs $d_E=60\text{nm}$, $d_B=340\text{nm}$, avec **T=300 K**. Et **Mostefaoui Mohammed Amine** a utilisé le logiciel **SCAPS**, d'après son étude, il exprime Les meilleurs performances : $I_{cc}=29.23 \text{ mA/cm}^2$, $V_{co} =0.655 \text{ V}$ et $\eta=21.05 \%$ pour $d_E=60\text{nm}$, et $N_a=N_d= 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ avec une température de e 300 K .

Notre travail et leurs résultats sont rassemblées dans le **tableau 9**.

	$I_{cc} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{co} \text{ (V)}$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
Zhang.X et J.Li	29.61	0.83	82.20	20.28
X.Shen et S.Lin	29.58	0.96	88.00	24.95
Y. Marouf	37.82	0.67	76.20	21.70
M.Moustefaoui	29.23	0.65	/	21.05
Notre travail	33.72	1.143	64.57	24.92

Tableau 9 : Comparaison avec des travaux similaires.

Notre résultats étudiées sont rédigées avec une température ambiante de **300 K** pour veuiller être soyer à des mêmes conditions avec les autres travaux similaires.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons optimisé les caractéristiques d'une cellule solaire d'InGaN. Nous avons choisi une cellule monojonction de référence de type P(InGaN), N(InGaN), ensuite nous avons changé les paramètres technologiques (dopage et épaisseur) pour chacune de ses régions, donnant les meilleurs performances. D'obtenir notre étude, nous a permet les paramètres technologiques optimaux des deux couches (l'émetteur et la base) suivants :

$d_E=120\text{nm}$, $d_B=280\text{nm}$, $N_a=N_d=1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, et les meilleures performances suivantes : $I_{cc}=33.72\text{ mA/cm}^2$, $V_{co}=1.143\text{ V}$, $FF=64.57\%$ et $\eta=24.92\%$, à $T=300\text{ K}$.

Nous avons exploité les paramètres extraits à différentes températures et sous même éclairement pour une cellule solaire à base d'InGaN. Pour un éclairement de 1000 W/cm^2 on trouve que $dI_{cc}/dT=\mu I_{cc}=0.0021\text{ A/K}$ et $dV_{co}/dT = -2.1\text{ mV/K}$, la variation relative de V_{co} est ($-0.33\% / \text{K}$) soit approximativement *huit fois* en valeur absolue celle de I_{cc} ($0.04\% / \text{K}$). Le FF croît avec l'augmentation de la température, pour l'efficacité relative de la cellule solaire, le rendement η diminue linéairement avec la température par une pente de $0.063\% / \text{K}$, par conséquent nous avons montré qu'il est possible d'obtenir un excellent rendement à 278K (5°), et pour la température de 323K (50°) dont le rendement est le plus bas (23.43%), mais il représente une bonne valeur en comparaison avec les cellules solaires de type Si, Ga....

Notre étude nous a permis de conclure que lorsqu'on est proche de la température ambiante [$278\text{K} - 323\text{K}$], le courant de court-circuit I_{cc} augmente lorsqu'on augmente la température, alors que lorsqu'on passe à des valeurs plus élevées [$400\text{K} - 500\text{K}$], le courant I_{cc} diminue et le rendement également à cause des pertes dues à la haute température car le fonctionnement de la cellule est relativement différent.

Par la suite nous avons fait une étude comparative des travaux similaires de quelques chercheurs dans les mêmes conditions de températures (300 K), nous remarquons que nos résultats concordent avec ceux que nous avons trouvé dans notre étude.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La température est un paramètre très marquant dans le comportement des cellules solaires; car les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles à celle-ci. Il est important d'étudier l'effet de cette dernière sur les caractéristiques électriques des cellules solaires puisque, dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées à des températures dans la gamme 15°C (288 °K) à 50°C (323 °K) et même à des températures encore plus élevées comme dans les régions extrêmement chaudes, les systèmes concentrateurs dans l'espace. Des études antérieures ont montré que les performances des cellules solaires se dégradent avec l'augmentation de la température, ces performances sont déterminées essentiellement par les paramètres : densité du courant de court circuit (I_{cc}), la tension du circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF), et le rendement de la conversion photovoltaïque (η). La variation de la température affecte ces paramètres et, ainsi, la performance des cellules solaires.

L'effet de la température a été largement étudié dans des cellules solaires à base de silicium (Si), GaAs, germanium (Ge) ou silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), cependant, peu d'études sont consacrées au cas des cellules solaires en couches minces telles que celles à base de tellure de cadmium (CdTe), ou de nitrure de gallium indium (InGaN). Pour cette raison, nous nous sommes intéressés, dans ce travail, à l'étude de l'effet de variation de la température ambiante sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire à base d'InGaN. Nous avons extrait les différents paramètres caractéristiques aux différentes températures et sous même éclairage. Ensuite, nous avons commencé par l'illustration de l'effet de la température sur la caractéristique $I(V)$ expérimental.

Dans une première étape, nous avons optimisé les performances d'une cellule solaire d'InGaN monojonction en faisant varier le dopage et l'épaisseur de l'émetteur, cela nous donne les meilleurs paramètres pour étudier l'effet de la température. Cette optimisation a abouti que le paramètre le plus affecté par l'accroissement de la température est le courant de court circuit I_{cc} et la tension de circuit-ouvert V_{co} . La réduction de cette dernière avec l'augmentation de la température entraîne ainsi la réduction de la puissance maximale P_m fournie par la cellule et par la suite la réduction du rendement de la conversion photovoltaïque

η . Le comportement thermique du I_{cc} , V_{co} , FF et η s'accorde avec les résultats d'après la littérature.

On note vers la fin, que les résultats de ce travail sont obtenus pour un cas particulier; les cellules solaires à base d'InGaN sous un éclairage constant. En effet, le développement d'autres travaux dans le même contexte est envisagé et concernant l'étude de l'influence de l'éclairage sur ces différents paramètres. Une étude de même genre pour d'autres types de cellules solaires non organiques et organiques peut être envisagée.

Bibliographie :

- [1] “**BOUAFIA MOUNIR, DEBLAOUI LAID.** Modélisation et simulation d’une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d’Indium et de Gallium. Mémoire de master. Univ Ourgla. 2012.”
- [2] “ **MOSTEFAOUI Mohammed Amine .** Contribution à l’amélioration des performances des cellules solaires à base de InGaN. Mémoire de master. Université Abou Bekr Belkaid. Tlemcen. 2015 ”
- [3] “**Ilknur Kars Durukan, Ozlem Bayal, Gurkan Kurtulus, Yunus Bas, Ali Gultekin, Mustafa Kemal Ozturk, Suleyman Corekc, Mehmet Tamer, Suleyman Ozelik, Ekmel Ozbay.** Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN solar cells (2015)”
- [4] “<http://www.memoireonline.com/07/08/1433/etude-effet-temperature-parametres-cellule-solaire-organique.html>.”
- [5] “ **B. Chaouki, B. Tarek** "Optimisation floue neuronale et génétique d’un système photovoltaïque connecté au qswréseau", Mémoire d’ingénieur. Univ. Biskra, 2007.”
- [6] “ **A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles,** "Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency”, Active and Passive Electronic Components, 21, (1998) 265-278.”
- [7] “ **ZekaiSen,** "Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques”; Springer-Verlag London Limited, 2008.”
- [8] “ **Faruk Kurker,** " Microfabrication based design and simlation of hétérojunction olar cell", MSc Thesis. INAS, çukurova university, ADANA, 2010.”
- [9] “Color wave length table, www.usbyte.com/common/approximate_wavelength.htn, 02/05/2007, consuleté le 15/04/2012. “
- [10] “http://www.photovoltaique.info/Lexique.html?id_mot=18#Cellulephotovoltaque.”
- [11] “**Daniel lincot.** La conversion photovoltaïque de l’énergie solaire . Découverte N° 344-345 janvier- février 2007 ”

- [12] “ **V.GORGE**, "Caractérisation de matériaux et test de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012.”
- [13] “ **P.Michalopoulos**, " Anovel approach for the development and optimisation of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco", Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.”
- [14] “ **Laradj Nawal**. Etude de Photopiles Solaires Nanostructures à base de Nitrures III-V GaN, AlN, InN. Magister Ecole doctorale Nanoscience Nanotechnologie. Université d’Oran.2012.”
- [15] “**A. ZERGA** « Modelisation, Simulation et Caracterisation des Cellules Solaires au silicium » Synthese des travaux de recherche de l’habilitation universitaire presentee a l’Universite de Tlemcen (2009).”
- [16] “ **M.A.Green,K.Emergy,Y.Hishikawa et W.Warta**, progress in photovoltaics : Researchand Applications 2008,16,61.”
- [17] “ **S.M. SZE**, Physics of Semiconductor Devices, 2ème edition, Bell Laboratories, Chap 14 Solar Cells, (1981).”
- [18] “ **A. Goetzberger V.U. Hoffmann**, Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer, 2, 11/229, 2005.”
- [19] “ **Jing-shun Huang, Chen-Yuchou, Ching-Uhlin**, Solar Energy Materials-Solar Cells94 182-186 (2010).”
- [20] “ Cellule graetzel- www.panneau-solairesouple.com -photovoltaique.kappatau.eu.”
- [21] “ **H.Mathieu**, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème édition, Masson 1990.”
- [22] “ **S. M. SZE**, Physics of semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981.”
- [23] “ **J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy**, " Le pompage photovoltaïque: Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens", IEPF/université d'Ottawa/eier/crepa,1998, www.iepf.org.”
- [24] “ **Sylvain BRIGAND**, " Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque", complément technique Mars/Avril 2008, www.éditionsdumoniteur.com, consulté le 12/11/2011.”

- [25] “ **S. Djeroud**, " Caractérisation morphologique et optoélectronique des cellules solaires (a-Si:H)", Mémoire de magistère, Université Oran, 2010. ”
- [26] “ **Gorczyca, I., Svane, A. and Christensen, N.E.** Theory of point defects in GaN, AlN, and BN: Relaxation and pressure effects. *Physical Review B*. 1999, Vol. 60, 8147.”
- [27] “ Tableau périodique des éléments. *Wikipédia*. [Online] 12 19, 2011. [Cited: 12 23, 2011.] http://fr.wikipedia.org/wiki/Tableau_périodique.”
- [28] “ **Johnson, W.C., Parson, J.B. and Crew, M.C.** Nitrogen Compounds of Gallium-III. *Journal of Physical Chemistry*. 1932, Vol. 36, 2651. ”
- [29] “ **Akasaki, I., et al.** Conductivity control of GaN and fabrication of UV/blue GaN light emitting devices. *Physica B: Condensed Matter*. 1993, Vol. 185, 428.”
- [30] “ **Hovel, H.J. and Cuomo, J.J.** Electrical and Optical Properties of rf-Sputtered GaN and InN. *Applied Physics Letters*. 1972, Vol. 20, 71. ”
- [31] “ **Wu, J.** When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 106, 011101.”
- [32] “ **Yamaguchi, S., et al.** Anomalous features in the optical properties of Al_{1-x}In_xN on GaN grown by metal organic vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2000, Vol. 76, 876.”
- [33] “ **Lu, H., et al.** Effect of an AlN buffer layer on the epitaxial growth of InN by molecular-beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2001, Vol. 79, 1489. ”
- [34] “ **Nanishi, Y., Saito, Y. and Yamaguchi, T.** RF-Molecular beam epitaxy growth and properties of InN and related alloys. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 42, 2549.”
- [35] “ **Osamura, K., et al.** Fundamental absorption edge in GaN, InN and their alloys. *Solid State Communications*. 11, 1972, 617.”
- [36] “ **Liu, L. and Edgar, J.H.** Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61.”
- [37] “ **A. Dussaigne**, " Diodes électroluminescentes blanches monolithiques", thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2005.”

- [38] “ **Wright, A.F. and Nelson, J.S.** Explicit treatment of the gallium 3d electrons in GaN using the plane-wave pseudopotential method. *Physical Review B*. 1994, Vol. 50, 2159.”
- [39] “ **Morkoç, H.** Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. Vol. 1. 978-3-527-40837-5.”
- [40] “ **Clàudio de Carvalho, L., Schleife, A. and Bechstedt, F.** Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes. *Physical Review B*. 2011, Vol. 84, 195105.”
- [41] “ **Vegard, L. Z.** *Phys.* 1921, Vol. 5, 17.”
- [42] “ **Denton, A.R. and Ashcroft, N.W.** Vegard's Law. *Physical Review A*. 1991, Vol. 43, 3161.”
- [43] “ **Katsikini, M., et al.** Raman study of Mg, Si, O, and N implanted GaN. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 4389.”
- [44] “ **Axon, H.J. and Hume-Rothery, W.** *Proc. R. Soc. London A*. 1948, Vol. 1, A193. ”
- [45] “ **EL GMILI Youssef.** Etude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque. Thèse de doctorat. L'Université de Lorraine & l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah–Fes.2013”
- [46] “ **Monemar, B.** Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra. *Physical Review B*. 1974, Vol. 10, 676.”
- [47] “ **Wu, J., et al.** Temperature dependence of the fundamental band gap of InN. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 4457.”
- [48] “ **Donmez, O., et al.** High carrier concentration induced effects on the bowing parameter and the temperature dependence of the band gap of $GaxIn_{1-x}N$. *Journal of Applied Physics*. 2011, Vol. 110, 103506.”
- [49] “ **Schaff, W.J., et al.** 868, s.l. : *Physica Status Solidi B*, 2008, Vol. 245.”
- [50] “ **Chernyak, L., et al.** Electron beam induced current measurements of minority carrier diffusion lengths in gallium nitride. *Applied Physics Letters*. 1996, Vol. 69, 2531.”

- [51] “ Caractéristique d'une diode selon La temperature. Semi-Conducteurs – Diode en Température -1 Plate-Forme matière condensée et cristallographie (Mcc) --- C.E.S.I.R.E. Université J.Fourier Grenoble ”
- [52] “**Yacine Maarouf**. Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco. mémoire de Magister en Electronique. 2013.”
- [53] “ **Bremner, S.P., Levy, M.Y. and Honsberg, C.B.** Analysis of Tandem Solar Cell Efficiencies Under AM1.5G Spectrum Using a Rapid Flux Calculation Method. Progress in photovoltaics: Research and Applications. 2008, Vol. 16, 225.
- [54] “**Maruskas, H.P. and Tietjen, J.J.** The preparation and properties of vapor-deposited single crystalline GaN. *Applied Physical Letters*. 1969, Vol. 15, 327.
- [55] “**Liu, L. and Edgar, J.H.** Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61.”
- [56] “ **MTI Corporation**. Crystals substrates: A-Z. [Online] [Cited: 11 16, 2011.] <http://www.mtixtl.com/crystalssubstratesa-z.aspx>.”
- [57] “**Walukiewicz, W.** Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors. *Physica B*. 2011, Vols. 302-303, 123-134.”
- [58] “**Walukiewicz, W.** 1257, s.l. : J. Vac. Sci. Technol. B, 1988, Vol. 6.”
- [59] “**Barton, J. and Guillemet, C.** Le Verre, Science et Technologie. s.l. : EDP Sciences, 2005. ISBN 2- 86883-789-1.”
- [60] “**Vurgaftman, I. and Meyer, J.R.** Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 3675.”
- [61] “**Katsikini, M., et al.** Raman study of Mg, Si, O, and N implanted GaN. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 4389.”
- [62] “**Koide, N., et al.** Doping of GaN with Si and properties of blue m/i/n/n+ GaN LED with Si-doped n+layer by MOVPE. *Journal of Crystal Growth*. 1991, Vol. 115, 639.”
- [63] “**Wu, J.** When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 106, 011101.”
- [64] “**Janotti, A. and Van de Walle, C.G.** *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 92, 032104.”

- [65] “**Hageman, P.R., et al.** N-type doping of wurtzite GaN with germanium grown with plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*. 2004, Vol. 267, 123.”
- [66] “**Walukiewicz, W.** Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors. *Physica B*. 2011, Vols. 302-303, 123-134.”
- [67] “**Jones, R.E. and al., et.** *Physical Review Letters*. 2006, Vol. 96, 125505.”
- [68] “**Wang, X. and al., et.** *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 92, 132108.
- [69] “**Ager, J.W. and al., et.** *Physica Status Solidi B*. 2008, Vol. 245, 873.”
- [70] “**Haus, E., et al.** Mg doping of GaN layers grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2000, Vol. 76, 718.”
- [71] “**Muller, D.A.** Structure and bonding at the atomic scale by scanning transmission electron microscopy. *Nature Materials*. 2009, Vol. 8, p. 263.”
- [72] “**Wu, J., et al.** Superior radiation resistance of In_{1-x}Ga_xN alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 6477.”
- [73] “**Yang, C., et al.** Photovoltaic effects in InGaN structures with p–n junctions. *Physica Status Solidi A*. 2007, Vol. 204, 4288.”
- [74] “Effect of phase separation on performance of III-V nitride solar cells. **Jani, O., et al.** Milan, Italy :Papier présenté à la 22ème conférence européenne de l'énergie solaire photovoltaïque., 2007.”
- [75] “**Zeng, S.W., et al.** Substantial photo-response of InGaN p–i–n homojunction solar cells. *Semiconductor Science and Technology*. 2009, Vol. 24, 055009.”
- [76] “**Chen, X., et al.** Growth, fabrication, and characterization of InGaN solar cells. *Physica Status Solidi A*. 2008, Vol. 205, 1103.”
- [77] “**Neufeld, C.J., et al.** High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 93, 143502.”
- [78] “**Matioli, E., et al.** High internal and external quantum efficiency InGaN/GaN solar cells. *Applied Physics Letters*. 2011, Vol. 98, 021102.”
- [79] “**Lang, J.R., et al.** High external quantum efficiency and fill-factor InGaN/GaN heterojunction solar cells grown by NH₃-based molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2011, Vol. 98, 131115.”

- [80] “**Tsai, C.-L., et al.** Substrate-free large gap InGaN solar cells with bottom reflector. *Solid State Electronics*. 2010, Vol. 54, 541.”
- [81] “**Zheng, X., et al.** High-quality InGaN/GaN heterojunctions and their photovoltaic effects. *Applied Physics Letters*. 2008, Vol. 93, 261108.”
- [82] “**Fujiyama, Y., et al.** GaInN/GaN p-i-n light-emitting solar cells. *Physica Status Solidi C*. 2010, Vol. 7, 2382.”
- [83] “**Kuwahara, Y., et al.** Nitride-based light-emitting solar cell. *Physica Status Solidi C*. 2010, Vol. 7, 1807.”
- [84] “**Farrell, R.M., et al.** High quantum efficiency InGaN/GaN multiple quantum well solar cells with spectral response extending out to 520 nm. *Applied Physics Letters*. 2011, Vol. 98, 201107.”
- [85] “**Jeng, M.J., Lee, Y.L. and Chang, L.B.** Temperature dependences of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ multiple quantum well solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009, Vol. 42, 105101.”
- [86] “**Lai, K.Y., et al.** Effect of indium fluctuation on the photovoltaic characteristics of InGaN/GaN multiple quantum well solar cells. *Applied Physics Letters*. 2010, Vol. 96, 081103.”
- [87] “**Asgari, A. and Khalili, Kh.** Temperature dependence of InGaN/GaN multiple quantum well based high efficiency solar cell. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011, Vol. 95, 3124–3129.”
- [88] “**Dahal, R., et al.** InGaN/GaN multiple quantum well concentrator solar cells. *Applied Physics Letters*. 2010, Vol. 97, 073115.”
- [89] “**O. Jani.** Effect of phase separation on performance of III-V nitride solar cells. *Papier présenté à la 22ème conférence européenne de l’énergie solaire photovoltaïque, 2007.*”
- [90] “**C. J. Neufeld, N. G. Toledo, S. C. Cruz, M. Iza, S. P. DenBaars,** and U. K. Mishra. High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap. *Applied Physics Letters*, 93(14) :143502, 2008.”
- [91] “**Binh-Tinh Tran, Edward-Yi Chang, Hai-Dang Trinh, Ching-Ting Lee, Kartika Chandra Sahoo, Kung-Liang Lin, Man-Chi Huang, Hung-Wei Yu, Tien-Tung Luong, Chen-Chen Chung, and Chi-Lang Nguyen.** Fabrication and characterization of n $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ /p Si solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 102(0) :208 – 211, 2012.”

- [92] “**S. W. Zeng, B. P. Zhang, J. W. Sun, J. F. Cai, C. Chen, and J. Z. Yu.** Substantial photoresponse of InGaN p-i-n homojunction solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 24 :055009, 2009.”
- [93] “**X.-M. Cai, S.-W. Zeng, and B.-P. Zhang.** Favourable photovoltaic effects in InGaN pin homojunction solar cell. *Electronics Letters*, 45(24) :1266 – 1267, 2009.”
- [94] “**Md. Rafiqul Islam, Md. Rejvi Kaysir, Md. Jahirul Islam, A. Hashimoto, and A. Yamamoto.** MOVPE Growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \leq 0.4$) and Fabrication of Homojunction Solar Cells. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(2) :128 – 136, 2013.”
- [95] “**A. Niemegeers and M. Burgelman,** "Effects of the Au/CdTe back contact on I(V) and C(V) characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells", *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, N°6 (1997), pp.2881-2886.”
- [96] “**M. Burgelman, P. Nollet and S. Degrave,** "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", *Thin Solid Films.*, 362-361(2000), pp.527-532.”
- [97] “**S. Khelifi et A. Belghachi,** Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d’une Cellule Solaire GaAs. *Rev. Energ. Ren.* Vol.7 (2004)13-21, Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semiconducteurs, Centre Universitaire de Béchar”
- [98] “**W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman,** *Solar Energy* 80 (2006) 78–88.
- [99] “**P. Singh, S.N. Singh, M. Lal, M. Husain,** *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 1611–1616.”
- [100] “**J. Krustok, R. Josepson, M. Danilson, D Meissner,** *Solar Energy* (2009), doi:10.1016/j.solener.2009.09.011.”
- [101] “**Salaheddine BENSALÉM.** Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires. Mémoire de magister en physique. université Ferhat Abbas - setif. 2011”
- [102] **Zhang.X et J.Li,** "Simulation of $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}$ single-junction solar cell", *J. of phys.D:Appl.Phys.*40,7335-7338 (2007). ”
- [103] “**X. Shen, S. Lin,** " Simulation of the InGaN-based tandem solar cell", *Photovoltaic cell and module Technologies II*, proc. of SPIE Vol.7045,70450, 2008. ”