

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xiii
Liste des symboles	xviii
Introduction	1
Chapitre 1 - Le photovoltaïque	5
1.1 Énergie solaire	5
1.2 Le rôle des sources renouvelables de l'énergie dans la société	7
1.3 Cellule solaire photovoltaïque	9
1.4 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire	10
1.5 Module photovoltaïque	13
1.6 Effet photovoltaïque	13
1.7 Les différentes filières photovoltaïques	14
1.7.1 Les cellules solaires de la première génération	15
1.7.2 Les cellules solaires de la deuxième génération (cellules à couche mince)	17

1.7.3 Les cellules solaires de la troisième génération	20
1.8 Conclusion.....	23
Chapitre 2 - Nanotechnologie	24
2.1 Introduction	24
2.2 Historique	25
2.3 Définition.....	26
2.4 Nanomatériaux	27
2.4.1 Propriétés magnétiques des nanomatériaux	31
2.4.2 Propriétés optiques des nanomatériaux.....	32
2.5 Domaine et applications des nanotechnologies	32
2.5.1 Industrie automobile et aéronautique.....	33
2.5.2 Nanoélectronique	33
2.5.3 Biotechnologies.....	34
2.5.4 Domaine biomédical	34
2.5.5 Secteur spatial et militaire.....	34
2.5.6 Secteur de l'énergie et de l'environnement	35
2.6 Nano matériaux utilisés dans la conversion de l'énergie	36
2.6.1 Le champ d'application des nanostructures dans le photovoltaïque.....	36

2.6.2 Ingénierie optique à base de nanostructures	41
2.7 Plasmonique	45
2.8 Conclusion.....	48
Chapitre 3 - Techniques de réalisation des cellules photovoltaïques à base de	
couches minces	50
3.1 Introduction	50
3.2 Les couches minces	51
3.2.1 Définition	51
3.2.2 But et caractéristiques des couches minces	52
3.3 Le silicium amorphe	54
3.3.1 Méthode de dépôt.....	55
3.3.2 Structure et réalisation de la cellule amorphe	57
3.3.3 Modules à multiples jonctions	57
3.4 Le silicium poly cristallin en couche mince	59
3.5 Le Tellurure de cadmium (CdTe).....	60
3.5.1 L'hétérojonction CdS-CdTe.....	62
3.5.2 Méthodes de dépôt	63
3.6 L'alliage Cuivre-Indium/Gallium-sélénum	65
3.6.1 Hétérojonction CIS-CdS	67

3.6.2 Méthode de dépôt.....	69
3.7 Conclusion.....	72
Chapitre 4 - Étude du matériau InGaN	73
4.1 Introduction	73
4.2 Historique de (InGaN).....	74
4.3 Description de (InGaN)	75
4.4 Caractéristique structurelle.....	75
4.4.1 Structure cristalline	75
4.4.2 Propriétés électriques	76
4.4.3 Propriétés optiques.....	84
4.4.4 Propriétés thermiques.....	90
4.4.5 Dopage	91
4.5 Nanostructure	93
4.6 Cellules photovoltaïques à base d'InGaN	93
4.7 Intérêt de l'InGaN pour les cellules solaires	94
4.7.1 Simple jonction	94
4.7.2 Hétérojonctions	95
4.7.3 Multi-jonctions.....	96
4.8 Rendement théorique maximum.....	98

4.9 Conclusion.....	100
Chapitre 5 - Simulations des cellules solaires à base d'InGaN.....	102
5.1 Introduction	102
5.2 Présentation du logiciel de simulation COMSOL Multiphysics	102
5.3 Design et description du modèle utilisé.....	103
5.3.1 Première partie	103
5.3.2 Deuxième partie	112
5.4 Optimisation des paramètres	117
5.4.1 Variation de l'épaisseur	118
5.4.2 Variation du dopage.....	121
5.4.3 Variation de la densité des défauts.....	122
5.4.4 Variation de la concentration d'indium	125
5.4.5 Texturation.....	126
5.5 Conclusion.....	127
Conclusion générale	129
Bibliographie (ou Références)	132
Annexe A – Organigramme du programme de simulation	139
Annexe B – Face avant COMSOL Multiphysics	140
Annexe C – Résultats obtenus par Matlab	143

Liste des tableaux

Tableau 2- 1 Données relatives aux effets quantiques dans différents semi-conducteurs.....	38
Tableau 4- 1 Paramètres structuraux des matériaux massifs Gan et InN.....	75
Tableau 4- 2 Évolution du gap de GaN et InN en fonction de la température.....	80
Tableau 4- 3 Évolution du gap de GaN et InN en fonction de la pression.....	80
Tableau 4- 4 Tableau récapitulatif des paramètres optiques des composant GaN et InN.....	88
Tableau 4- 5 Résultat de simulation de Barmner pour des cellules multi-jonction sous un spectre AM1.5.....	97
Tableau 4- 6 Résultat de simulation de Barmner pour des cellules multi-jonction sous un optimum de concentration.....	97
Tableau 5- 1 Paramètres utilisés pour le calcul des porteurs.	106

Liste des figures

Figure 1. 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil selon de la convention AM	6
Figure 1. 2 Spectres solaires selon la convention AM	7
Figure 1. 3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
Figure 1. 4 Le circuit équivalent d'une pile solaire idéale	11
Figure 1. 5 Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque	12
Figure 1. 6 Les différentes technologies photovoltaïques	15
Figure 1. 7 Répartition de la production des cellules photovoltaïques en 2011	16
Figure 1. 8 Réprésentation des différentes filières photovoltaïques	19
Figure 1. 9 Évolution des rendements record obtenus pour les différentes filières photovoltaïques	23
Figure 2. 1 Illustration des différents types de nano matériaux	29
Figure 2. 2 Illustration de micro et nano système	29
Figure 2. 3 Le marché des nanotechnologies dans l'automobile en 2015	33
Figure 2. 4 Densité d'état dans différentes configurations de confinement	37
Figure 2. 5 Evolution théorique de la largeur de bande interdite en fonction de la taille des nano-cristaux et leurs natures	39
Figure 2. 6 Démonstration du principe de nano structuration	41
Figure 2. 7 Illustration des effets de diffusion de lumière dans une couche mince texturée	43

Figure 3. 1 Structure d'une cellule à base de silicium amorphe de type PIN	55
Figure 3. 2 Module d'une cellule a jonction multiple.....	58
Figure 3. 3 Prototype de cellule CdTe classique.....	61
Figure 3. 4 Schéma des bandes dans l'hétérojonction CdS-CdTe	63
Figure 3.5 Schéma des différentes couches constituant une cellule CIGS classique.	67
Figure 3.6 Vue au microscope d'une cellule à base de CuInSe2.....	67
Figure 3. 7 Structure de bande de la cellule CIS/CdS.....	68
Figure 4. 1 Structure wurtzite pour le GaN selon difféernete directions (a) [0001], (b) [1120] et (c) [1010]	76
Figure 4. 2 Diagramme de bande GaN calculé avec la théorie de structure électronique des quasi particule.....	78
Figure 4. 3 Diagramme de bande GaN calculé avec la théorie de structure électronique des quasi particule.....	78
Figure 4. 4 Schéma de la recombinaison radiative	82
Figure 4. 5 Schéma de recombinaison Auger	83
Figure 4. 6 Schéma de la recombinaison Shokley-Read-Hall.....	83
Figure 4. 7 Indice de réfraction du GaN	85
Figure 4. 8 Schéma des chemins optique.....	86
Figure 4. 9 Les courbes de transmission et de réflexion trouvées expérimentalement pour un composant GaN de 350nm.	87
Figure 4. 10 La courbe d'absorption trouvée expérimentalement pour un composant GaN	87
Figure 4. 11 Le spectre CL pour le matériau GaN par luminescence à température ambiante mesuré à 2KeV.	89
Figure 4. 12 Structure d'une cellule solaire PIN à double hétérojonction proposé par Zeng.	95

Figure 4. 13 Caractéristiques J, V et P, V de la cellule à base d'InGaN avec contact semi-transparent	95
Figure 4. 14 Caractéristiques J, V et P, V de la cellule à base d'InGaN avec une grille	95
Figure 4. 15 Diagramme d'énergie des bandes de conduction et de valence pour InGaN	96
Figure 4. 16 Rendement d'une cellule solaire InGaN/Si a deux jonctions en fonction du gap d'InGaN selon différentes épaisseurs du silicium	96
Figure 4. 17 Gap d'énergie des principaux semi-conducteurs sous spectre solaire AM1.5	99
Figure 5. 1 Structure de la cellule PIN (GaN/InGaN/GaN)	105
Figure 5. 2 Maillage de la structure PIN (GaN/InGaN/GaN)	105
Figure 5. 3 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/InGaN/GaN) sans polarisation	108
Figure 5. 4 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/InGaN/GaN) avec polarisation	108
Figure 5. 5 Concentration des porteurs (électrons et trous) à travers la structure sans polarisation	109
Figure 5. 6 Concentration des porteurs (électrons et trous) à travers la structure avec polarisation	109
Figure 5. 7 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour différentes valeurs de tension	110
Figure 5. 8 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour une tension de 3.3V	110
Figure 5. 9 Caractéristique courant-tension de la structure PIN (GaN/ InGaN/ GaN)	111
Figure 5. 10 Structure de la cellule PIN (GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO)	113

Figure 5. 11 Maillage de la structure PIN (GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO)	113
Figure 5. 12 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO) sans polarisation.....	114
Figure 5. 13 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO) avec polarisation.	114
Figure 5. 14 Concentration des porteurs (électrons et trous) à travers la structure sans polarisation.	115
Figure 5. 15 Concentration des porteurs (électrons et trous) à travers la structure avec polarisation.....	115
Figure 5. 16 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour différentes valeurs de tension.	116
Figure 5. 17 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour différentes valeurs de tension.	116
Figure 5. 18 Caractéristique courant-tension de la structure PIN (GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO).	117
Figure 5. 19 Caractéristiques courant tension de la pour différentes épaisseurs de la couche InGaN.	118
Figure 5. 20 Densité de courant de court-circuit (Jcc) en fonction de la variation de l'épaisseur d'InGaN.....	119
Figure 5. 21 Tension de circuit ouvert (Vco) en fonction de la variation de l'épaisseur d'InGaN.....	119
Figure 5. 22 Rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur d'InGaN.	119
Figure 5. 23 Rendement de la cellule en fonction de la variation du dopage d'InGaN.....	121
Figure 5. 24 Caractéristiques courant-tension de la structure pour différent dopages d'InGaN.....	121
Figure 5. 25 Densité de courant de court-circuit en fonction de la variation de la densité de défauts dans l'InGaN.....	122
Figure 5. 26 Rendement de la cellule en fonction de la variation de défauts dans l'InGaN.....	122

Figure 5. 27 Diagrammes des niveaux d'énergie de bandes de la structure pour différentes densités de défauts dans la couche d'InGaN.....	123
Figure 5. 28 Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes densités de défauts dans l'InGaN.....	124
Figure 5. 29 Caractéristiques courant-tension de la cellule avec différentes concentration d'indium dans l'InGaN.....	125
Figure 5. 30 Caractéristiques courant-tension de la cellule avec l'ajout d'une couche antireflet.....	127

Liste des symboles

Paramètres	Définitions
a, b, c	Paramètres de mailles.
A_0	Constante.
AM_x	La masse d'air.
B_0	Constante.
$B_{radiatif}, B_{Auger}$	Constantes du matériau.
c	La vitesse de la lumière.
C_c^{OPT}	Le taux de capture optique.
d	Coefficient de pression.
D	Coefficient de diffusion.
E_0	L'amplitude du champ électromagnétique incident.
E_c	Énergie minimale de la bande de conduction.
E_F	Niveau de Fermi.
E_{ph}	La quantité d'énergie transportée par le photon.
E_{Ryd}^*	L'énergie de la liaison.
E_g	Le gap d'énergie.
E_{g0}	Le gap du semi-conducteur en volume.
E_{NBE}	Le niveau de la bande interdite.
E_{trap}	La différence d'énergie entre le niveau de fermi et le défaut.
E_v	Énergie maximale de la bande de valence.

$E(z)$	L'amplitude du champ électromagnétique à la position z.
FF	Le facteur de forme.
k	Le vecteur d'onde.
K	La constante de Boltzman.
g	Coefficient de pression.
h	La constante de Planck.
I_{cc}	Le courant de court-circuit.
I_i	L'intensité incidente.
I_m	Le courant mesuré à une puissance maximale.
I_{ph}	La densité du photo courant.
I_{obsc}	La densité de courant d'obscurité.
I_s	Le courant de saturation de la diode.
I_t	L'intensité transmise.
J	La densité de courant.
L	La longueur de diffusion.
m_0	La masse effective d'un électron de conduction.
m_e^*	La masse effective de l'électron.
m_e	La masse d'un électron dans la bande de conduction.
m_h	La masse d'un trou dans la bande de valence.
m_h^*	La masse effective du trou.
M	L'aimantation.
M_s	L'aimantation à saturation.
n	La concentration d'électron.
n_{ie}	la concentration intrinsèque d'électron.

n_i	L'indice de réfraction de la $i^{\text{ème}}$ couche.
n_0	L'indice de réfraction du milieu incident.
N	La densité volumique d'électron.
N_c	La densité d'état pour la bande de conduction.
N_{tot}	La concentration totale de défaut et du dopage.
$N_{défaut}$	La densité de défaut.
$N_{n,p}^{SRH}$	La concentration de défauts recombinants.
N_v	La densité d'état pour la bande de valence.
p	La pression.
P_i	La puissance d'éclairement sur la surface.
q	la Charge élémentaire d'électron.
R_0	La résistance initiale.
R	Le rayon de la particule.
R_{th}	La résistance thermique.
S	la surface de la cellule photovoltaïque.
T	La température.
v	La vitesse de la lumière dans le matériau.
\bar{v}	La vitesse moyenne des porteurs libres.
V_{co}	La tension du circuit ouvert.
V_m	La tension mesurée à une puissance maximale.
ω_s	La fréquence de résonance plasmon.
x	La concentration d'indium.
Z	La fonction de la hauteur.

α	Le coefficient de magnétorésistance.
α_0	Paramètre d'ajustement.
$\alpha(E)$	Le coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon.
$\alpha(\lambda)$	Le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde.
β	Constante associée à la température.
ϵ_0	La constante diélectrique du vide.
ϵ_d	La permittivité du milieu électrique.
η	Le rendement de conversion.
γ	La constante de relaxation.
λ	La longueur d'onde.
τ	Temps de vie des porteurs.
$\tau_{n,p}$	Temps de vie des électrons et des trous.
μ	La mobilité des porteurs.
σ	La section efficace de capture.
θ_i	Les angles des rayons lumineux de i milieu.

Introduction

De nos jours, l'énergie est quelque chose d'indispensable à notre quotidien, elle est l'étincelle qui permet d'accomplir toute activité humaine. Elle est aussi un facteur de développement et le pilier de l'économie moderne.

Actuellement, environ 80% d'énergie utilisée dans le monde est de source limitée et épuisable telle que l'uranium, mais beaucoup plus les gisements de combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon. Alors que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Certes, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et la croissance démographique d'une autre part. Aujourd'hui, la situation énergétique mondiale est devenue préoccupante, car la plupart des pays au monde consomment plus d'énergie qu'ils en produisent, particulièrement en Europe. Cette balance énergétique déficitaire peut être expliquée par une forte augmentation de la consommation par rapport à la production qui ne cesse de diminuer, notamment à cause de l'épuisement des gisements de pétrole.

Effectivement, les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, les réserves de ces derniers sont estimées à une cinquantaine d'années [1].

C'est pourquoi, dans ce contexte, il est impératif de trouver un autre moyen pour prendre la relève et diversifier le bouquet énergétique. Une des solutions les plus prometteuses pour le futur énergétique de l'humanité est le développement d'une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Le principal avantage de ces énergies

renouvelables est qu'elles sont de sources illimitées, en plus elles n'ont pas d'effet polluant comme le gaz à effet de serre, ce qui permet une réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO_2). Ce genre d'énergie est généralement fourni par des sources naturelles permanentes telles que le soleil, le vent, les chutes d'eau et les marées.

À cet effet, la recherche de nouvelles ressources d'énergie est devenue un sujet capital. De nombreuses recherches scientifiques ont été faites dans le but de passer des énergies de stocks à des énergies renouvelables. D'abord, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, ensuite dans le secteur des sources d'énergie de flux, telles que la production d'électricité par le vent comme les éoliens ou la transformation d'énergie solaire (le photovoltaïque).

Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque est considérée comme une solution prometteuse pour la production d'électricité. Cependant, cette technologie est largement dominée par le silicium qui souffre toujours d'un faible rendement et d'un coût relativement cher.

C'est pourquoi actuellement, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques font l'objet de nombreuses recherches afin de nous permettre une meilleure exploitation de l'énergie solaire. D'ailleurs, de nombreuses recherches se tournent vers l'utilisation de nouvelles structures (nanostructures) et des matériaux capables d'avoir un meilleur coefficient d'absorption des spectres lumineux (les nitrures) afin d'obtenir des meilleurs rendements avec un coût relativement bas.

Grâce aux nouvelles technologies utilisées et l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans le processus de fabrication des cellules photovoltaïques, les chercheurs ont réussi à obtenir une amélioration significative du rendement énergétique. En 20 ans, Les

rendements des systèmes photovoltaïques commercialisés sont passés de 5% à plus de 20% [2].

Dans ce cadre, le nitrate de gallium et d'indium présente un fort potentiel pour les applications photovoltaïques à hautes rendements grâce à son large gap. Dans un premiers temps cet alliage fut utilisé dans des applications optoélectroniques telles que les diodes lasers et les LEDs qui ont été bien établis [2].

Outre, bien que les procédés de fabrication d'une cellule solaire à base d'InGaN ne sont pas trop compliqués, le InGaN présente comme même quelques problèmes comme le désaccord de paramètre de maille entre les deux binaires GaN et InN, pour palier à ce problème nous allons jouer sur l'épaisseur de la couche active. Aussi, il est difficile d'obtenir une forte concentration en indium avec une bonne qualité structurale et morphologique. D'un autre côté, l'insertion de fines couches de GaN pour avoir une bonne caractérisation morphologique, va créer une grande différence entre les gaps des couches constituant la cellule, en plus le GaN est intrinsèquement dopé N.

L'objectif principal dans ce mémoire est d'étudier la faisabilité d'une cellule solaire avec des capteurs aux hétérojonctions (GaN/InGaN) basé sur les nanotechnologies.

Plus précisément, les principales avancées de ce travail sont la contribution à l'obtention d'une cellule solaire à base d'InGaN aux dimensions nanométriques avec un rendement optimal, l'optimisation et la détermination des paramètres critiques de la cellule dans le but d'améliorer le rendement de la cellule. Et enfin, la modélisation de la cellule avec le logiciel COMSOL multiphysics.

Dans un premier temps, on va voir la revue des énergies renouvelables avec leurs rôles dans la société, le deuxième chapitre sera consacré aux nanotechnologies afin de voir comment sont-elles censées améliorer les technologies existantes et où sont-elles employées.

Le troisième chapitre sera consacré aux différentes technologies photovoltaïques en couches minces, qui se composent de trois filières principales : la filière à base de silicium (amorphe et polycristallin), la filière à base de CdTe, et la filière à base de CIS et CIGS.

On va aussi définir quelques techniques et méthodes d'élaboration, les plus utilisées, pour la technologie des cellules photovoltaïques à base de couches minces.

Le quatrième chapitre sera réservé à l'étude du matériau InGaN à base des alliages InN et GaN. On passera en revue leurs différentes propriétés physiques, électriques et optiques pour mieux comprendre leur comportement optoélectronique afin d'optimiser leur rendement.

Dans le cinquième et dernier chapitre, on présentera la modélisation et la simulation d'une structure à hétérojonction pour une cellule solaire à base du matériau InGaN aux dimensions nanométriques avec l'utilisation des logiciels MATLAB et COMSOL Multiphysics

Chapitre 1 - Le photovoltaïque

1.1 Énergie solaire

Le soleil émet continuellement une quantité d'énergie radiante colossale dans le système solaire d'environ 5800 K. ce qui conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0.5 μm pour une puissance d'environ 60 MW/m², soit un total de, 9.5×10^{25} , sauf que la part d'énergie reçue sur la surface de la terre est d'une moyenne de 1367 watts pour chaque mètre carré de l'atmosphère pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 millions de km [3].

Cette quantité d'énergie considérable de 1367 W/m² est appelée la constante solaire. Il faut bien noter aussi que la terre reçoit une petite fraction de cette énergie car l'irradiance de ce dernier est pondérée par plusieurs facteurs à sa surface. Parmi ces facteurs on peut citer l'absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, les conditions climatiques, l'altitude et les changements de saisons. Néanmoins la quantité d'énergie totale qui atteint la surface de la terre dans une seule journée est plus importante que toute la quantité d'énergie consommée par la population mondiale pendant toute une année.

Le rayonnement solaire est constitué d'un nombre incalculable de photons transportant chacun une énergie E_{ph} donnée par la relation suivante [3]:

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où :

E_{ph} : est la quantité d'énergie transportée par le photon

λ : est la longueur d'onde

h : est la constante de Planck

c : est la vitesse de la lumière dans le vide

Sans oublier de mentionner la masse d'air (AMx) qui correspond à la perte d'énergie solaire par l'absorption atmosphérique en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith qui est donnée par :

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (1.2)$$

L'angle θ est l'angle en radian entre le rayonnement solaire et le plan horizontal de la terre.

Le rayonnement dit rayonnement de masse d'air est calculé par le rayonnement solaire au niveau de la mer dans des conditions météorologiques stables et qui est égale à 1000 W/m^2 , dans ce cas le soleil est perpendiculaire au zénith, $\theta=90^\circ$. La notation utilisée est AM1, AM0 (l'irradiance hors atmosphère). Une fois que le soleil se décline vers le bas, l'éclairement solaire arrive sur la terre avec un angle de 48° et une masse d'air de 1000 W/m^2 AM1.5. Le "1.5" est pour mentionner que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est supérieur au parcours le plus court du soleil d'une fois et demi. Le spectre AM1 est considéré comme le spectre solaire standard le plus étudié, il se compose de 45% de la lumière visible, 51% de lumière infrarouge et de 4% de la lumière ultraviolet [3, 4].

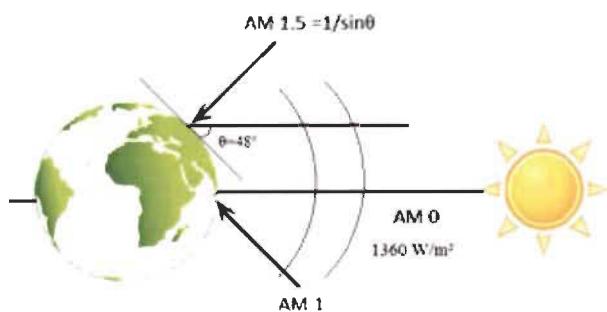


Figure 1. 1 Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil selon de la convention AM [3].

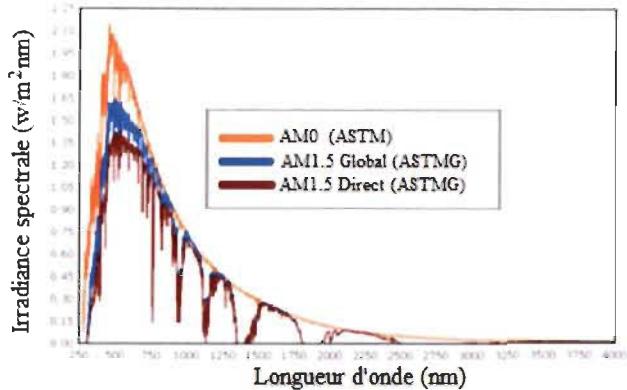


Figure 1.2 Spectres solaires selon la convention AM.

[Source NREL solar spectrum].

Normalisation

Les modules photovoltaïques sont soumis à des conditions standards de qualification qui sont :

Une température de 25°C et un spectre AM1.5 (sous un éclairement égale à 1000 W/m²)[4].

L'irradiation solaire dépend généralement de :

- L'inclinaison et le positionnement de la surface.
- La distance angulaire du lieu par rapport au soleil.
- Les conditions météorologiques.
- Le moment considéré dans la journée ainsi que la saison de l'année.
- La composition et la nature des couches nuageuses.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière [4].

1.2 Le rôle des sources renouvelables de l'énergie dans la société

Les énergies renouvelables ont un très grand impact sur l'environnement, leurs rôle ne se limite pas seulement aux risques d'épuisement des combustibles fossiles ou bien le souci

de l'approvisionnement, mais en plus, on trouve de nombreuses raisons environnementales qui pousseront au développement des énergies renouvelables parmi lesquelles on peut citer:

- La lutte sans cesse contre la pollution atmosphérique mettra en évidence les énergies peu ou pas polluantes pour l'air, comme par exemple le soleil pour l'énergie photovoltaïque, le vent pour l'énergie éolienne et la géothermie.
- Les combustibles fossiles sont responsables en grande partie dans le réchauffement progressif de la planète (effet de serre) à cause du gaz carbonique émis par leur combustion dans l'atmosphère, alors que le soleil, le vent ou la géothermie permettent d'éviter ce réchauffement ainsi que ces conséquences climatiques résultantes. Aussi, la combustion de la biomasse est considérée comme une énergie propre, du point de vue quelle représente un grand avantage dans la croissance des végétaux et cela grâce au recyclage du gaz carbonique émis lors des brûlages des végétaux.
- L'énergie nucléaire ne participe pas à l'effet de serre, mais les craintes que représente cette énergie sont beaucoup plus graves comme les risques d'explosion ou d'accident, la prolifération des armes nucléaires et le sort des déchets nucléaires.
- Le développement des cultures énergétiques (houille verte), ce qui permettra de ne pas détruire les forêts existantes, et en même temps combattra la désertification, grâce à la plantation des champs et des forêts à des fins énergétiques, éventuellement sur des terres abandonnées ou en jachère, afin de revitaliser des régions rurales en voie de désertification [5, 6].

Pour autant, il faut mentionner que certaines des énergies renouvelables causent comme même quelques dégâts environnementaux comme les déforestations dus à des usages

abusifs du bois, les inconvénients de certains barrages hydroélectriques, de certaines éoliennes ou de certaines installations solaires sans oublier le fait qu'elles occupent de très grandes surfaces, ces derniers peuvent ralentir le développement de certaines autres énergies renouvelables [6].

1.3 Cellule solaire photovoltaïque

Une cellule solaire photovoltaïque est généralement constituée d'un semi-conducteur de type n et un autre de type p. L'incidence d'un flux lumineux sur cette dernière fera apparaître une différence de potentiel grâce à la génération de porteurs de charge excitée par le flux lumineux au voisinage d'une jonction, qui fonctionne par l'absorption de ce flux lumineux. Autrement dit la cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur capable de transformer directement l'énergie solaire en énergie électrique, cette transformation d'énergie se fait via la création et le déplacement de charges électriques positives et négatives dans le matériau semi-conducteur sous l'effet de la lumière.

Cette transformation est donc basée sur :

- a. Absorption des photons grâce à l'écart entre les bandes de valence et de conduction.
Ce que représente d'ailleurs la caractéristique fondamentale des semi-conducteurs.
- b. Conversion de l'énergie photonique en énergie électrique, ce qui permet de créer les paires électron/trou.
- c. La jonction p-n ou l'hétérojonction, lorsqu'il s'agit de deux semi-conducteurs différents permet de collecter les particules générées dans le matériau [7].

Afin d'avoir ce phénomène, il faut préciser que le matériau ou les matériaux de la cellule photovoltaïque devront posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour

faciliter le passage du courant, d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie du photovoltaïque.

1.4 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Lorsque les photons incidents heurtent la surface du matériau photovoltaïque, il y'aura une création de porteurs dans les différentes zones n, p et la zone de charge d'espace. Le comportement des photo-porteurs dépendra de la région :

- Au niveau de la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge seront renvoyés par un champ électrique soit dans la zone p pour les trous ou bien dans la zone n pour les électrons. Leur accumulation permettra de créer un photo-courant de diffusion.
- Au niveau de la zone de charge, les paires électron/trou résultantes des photons incidents seront séparées par le champ électrique, d'où les électrons vont se diriger vers la région n et les trous vers la région p. Ceci permettra de créer un photo-courant de génération [8].

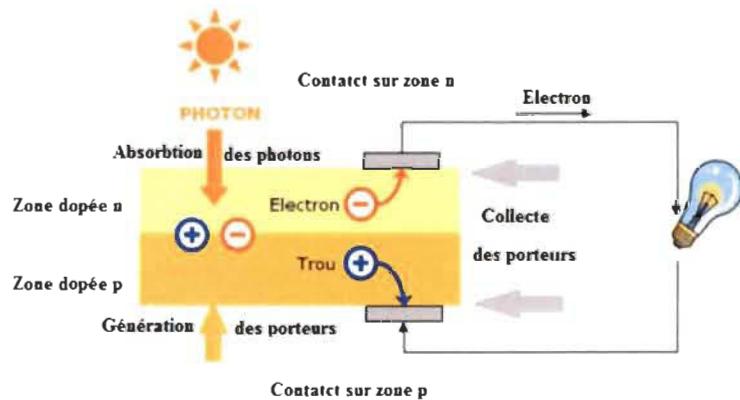


Figure 1. 3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [9].

L'association du photo-courant de diffusion et le photo-courant de génération nous donnera un photo-courant I_{ph} proportionnel à l'intensité lumineuse donnée par la relation suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (1.3)$$

Où :

I_{ph} : est la densité du photo courant générée.

I_{obsc} : est la densité de courant d'obscurité ou de diffusion.

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque idéale, elle est généralement constituée d'une source de courant reliée en parallèle avec une diode de rectification comme illustré dans le schéma équivalent ci-dessous :

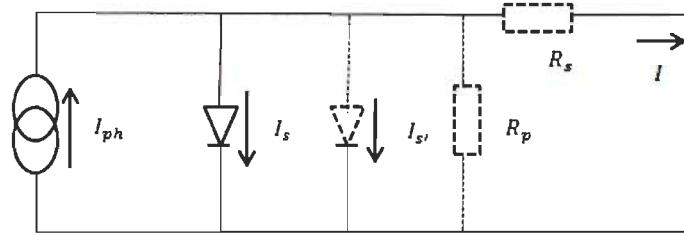


Figure 1. 4 Le circuit équivalent d'une pile solaire idéale [8].

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (1.4)$$

Avec :

I_s : Courant de saturation de la diode.

q : Charge élémentaire.

k : Constante de Boltzman.

T : Température.

Ainsi, une cellule photovoltaïque se caractérise généralement par deux courants, le premier est le courant d'éclairement et un second qui résulte de la polarisation de la diode nommée courant d'obscurité [8].

D'après les caractéristiques I-V de la cellule photovoltaïque présentée dans la figure (1.5), on déduit les paramètres électriques de la cellule photovoltaïque. Cette caractéristique a été représentée à partir du schéma équivalent illustré dans la figure (1.4) étant donné que la caractéristique d'une diode sous éclairement a la même allure que la caractéristique d'une cellule sous obscurité.

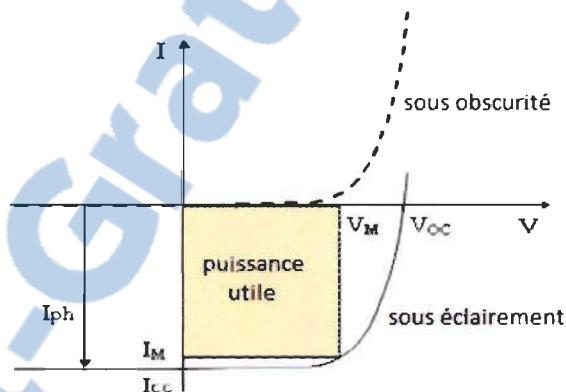


Figure 1. 5 Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque [8].

I_{cc} : Courant de court-circuit lorsque $V=0$.

V_{co} : Tension en circuit ouvert lorsque $I=0$.

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

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

η : Rendement de conversion.

FF : Facteur de forme.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (1.5)$$

Avec :

P_i : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface.

S : Surface de la cellule photovoltaïque.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (1.6)$$

1.5 Module photovoltaïque

Le photovoltaïque (PV) est définie comme la science ou la technologie qui convertie la lumière en électricité, la forme la plus courante étant l'utilisation de la lumière du soleil.

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues, et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif. Ce chapitre décrit les concepts de base de systèmes photovoltaïques et de production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

1.6 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène dû à la conversion de la lumière en électricité, ce phénomène physique a été découvert pour la première fois en 1839 par un certain français dénommé Alexandre Edmond Becquerel, ce dernier a pu observer que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière [10].

Il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité à partir de l'incidence de lumière sur une électrode en platine enduite immergée dans l'électrolyte. Cependant, les premiers dispositifs photovoltaïques à semi-conducteur ont vu le jour seulement après une quarantaine d'années, grâce à la découverte de la photoconductivité du sélénium en 1873 par Willoughby Smith. Malheureusement ces dispositifs photovoltaïques avaient un rendement très bas. Environ un siècle après, avec la découverte des jonctions PN en silicium, trois chercheurs américains, Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller ont réussi à mettre au point une cellule photovoltaïque ayant un rendement assez haut, précisément en 1954 [10].

La technologie du photovoltaïque s'est développée dans les années 50 au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. Mais c'est seulement au début des années 70 que les efforts se sont entrepris et les recherches ont été de plus en plus focalisées sur les énergies photovoltaïques, afin de les utiliser pour des applications terrestres vu leurs avantages.

1.7 Les différentes filières photovoltaïques

On utilise plusieurs technologies dans la conception d'une cellule photovoltaïque afin de mettre en œuvre l'effet photovoltaïque, beaucoup d'entre elles sont encore en phase d'expérimentation et de développement.

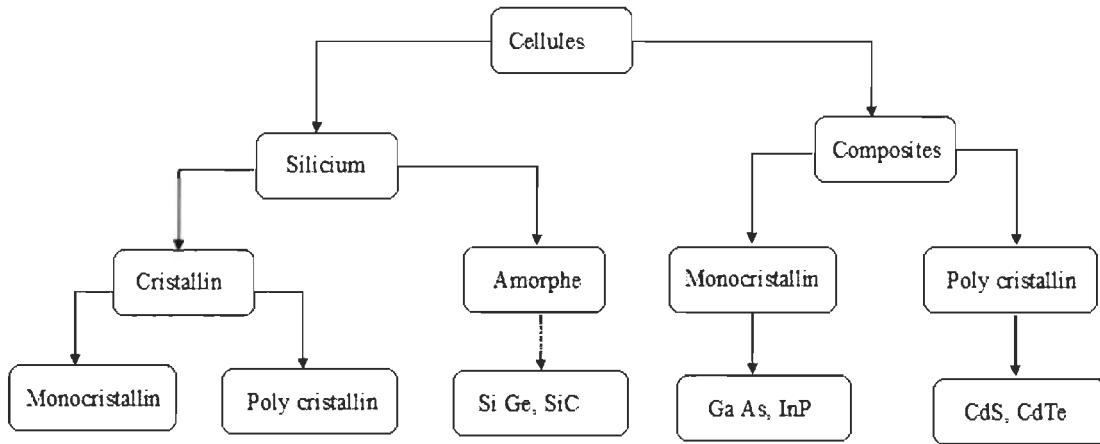


Figure 1. 6 Les différentes technologies photovoltaïques.

Les principales technologies les plus utilisées actuellement sont : le silicium cristallin avec une très grande utilisation de plus 85% de l'utilisation mondiale et les couches minces à base de Si amorphe, CIS, de CdTe [11].

1.7.1 *Les cellules solaires de la première génération*

Ce genre de cellule se caractérise par une seule jonction p-n à base de silicium sous forme cristalline constituée généralement d'un substrat en silicium massif réalisé par la technique du tirage et découpage basée sur les wafers de silicium, une technique simple, mais trop coûteuse en plus elle exige un silicium de grande pureté. La première cellule solaire a été réalisée en 1954 par les laboratoires Bell a donné un rendement de 6% qui a été amélioré à 10% par la suite [12].

La filière du silicium représente actuellement près de 90% de la production mondiale de modules comme la montre la figure (1.7), dont l'écrasante majorité à travers les filières multicristallines et monocristallines. Le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre, il représente le deuxième élément de croûte terrestre, en plus il est non toxique.

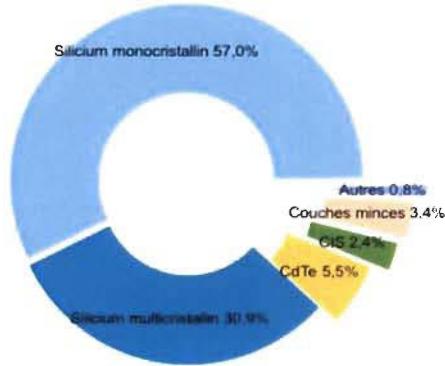


Figure 1.7 Répartition de la production des cellules photovoltaïques en 2011

[Hespul, d'après photon international 2012].

1.7.1.1 Silicium multicristallin (mc-Si)

Le silicium multicristallin (polycristallin) est produit par des techniques de croissance qui permet d'assurer une structure colonnaire avec de gros cristaux, à lui seul il occupe plus de 57% du marché mondial, il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché vu qu'il offre un rendement intéressant (11 à 15%) pour des coûts de fabrication modérés. Cependant, le matériau multicristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'une autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium, notamment du fait qu'il est constitué en grande partie des rebus de l'industrie électronique [12, 13].

1.7.1.2 Silicium monocristallin (sc-Si)

Généralement, le silicium monocristallin est obtenu par deux méthodes, le tirage CZ (Czochralski) et FZ (Float Zone) qui nous permet d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique.

Il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique avec ces excellentes qualités électroniques, environ 30 % du marché, son rendement est supérieur au silicium polycristallin (13 à 19%), mais sa fabrication est plus délicate, car elle nécessite une dépense d'énergie considérable et donc plus coûteuse [13].

1.7.2 *Les cellules solaires de la deuxième génération (cellules à couche mince)*

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

Généralement dans cette filière on utilise trois matériaux qui permettent d'avoir les meilleurs rendements qui soient, et qui sont le silicium amorphe, le tellure de cadmium ou bien le disélénium de cuivre indium [14].

1.7.2.1 **Silicium amorphe (a-Si)**

Le silicium amorphe est déposé sur une feuille de verre. D'ailleurs depuis les années 1970 les chercheurs essayent d'utiliser du silicium non cristallisé à son état amorphe, car ce dernier présente beaucoup d'avantages particulièrement, sa capacité d'absorption, son bon

fonctionnement sous faible éclairement contrairement au silicium cristallin, sa facilité à être déposé sur les grandes surfaces et sa faible consommation d'énergie. Malheureusement il s'avère que ces "couches minces" ont un rendement bien inférieur à celui des filières cristallines (6%), leur utilisation mondiale est d'à peine plus de 3%, en revanche leur coût est proportionnellement plus économique. La première filière "couche mince" a souffert d'une diminution assez rapide de ses performances au cours de temps (dégradation rapide du rendement), mais actuellement, ces problèmes sont corrigés. Leur utilisation est prioritairement limitée pour les toutes petites puissances nécessaires aux objets portables (montres, calculatrices...) et pour fabriquer des modules plus ou moins souples [13, 14].

La réalisation des couches minces se fait assez souvent à partir d'un composé de matériaux. Ces composés sont aussi appelés les chalcogénures, dans ce qui va suivre nous allons voir les deux types les plus connus qui sont : Cds-CdTe (Tellurure de Candmium) et CIS (Sélénium de Cuivre Indium).

1.7.2.2 Cellule à base de tellurure de candmium

Jusqu'à présent, la cellule à base de CdTe (Tellurure de Candmium) est considéré comme l'approche la plus prometteuse pour le photovoltaïque terrestre, du fait de ses propriétés optiques optimales. Elle se caractérise par une bande interdite directe de 1,45 eV parfaitement adaptée au spectre solaire, en outre son très grand coefficient absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2 μm , néanmoins les problèmes d'environnement associé à l'utilisation du candmium ont largement freiné les tentatives de développement dans cette filière [14, 15].

1.7.2.3 Cellule à base de sélénium de cuivre indium

Doté d'un coefficient d'absorption 100 à 1000 fois plus grand que celui du silicium cristallin, une épaisseur de 1,5-2 μm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire. Le matériau CIS (Sélénium de Cuivre Indium) et aussi considéré comme un des plus prometteurs. Ce composé de type I-III-VI et de structure chalcopyrite, présente un rendement théorique des plus élevés parmi les couches minces qui se situe autour de 25%, avec à un plus cher coût de fabrication, cependant il a une faible bande interdite (1,02 eV) comparé au cadmium.

Aussi, les travaux sur les cellules solaires à base de CIS se font désormais sur des alliages quaternaires Cu(InGa)Se₂ (CIGS). Qui ont récemment atteint des rendements record de 18.8% en laboratoire. En outre, avec des alliages d'InGaN on aura une bande interdite plus large que celle de CIS grâce à l'introduction du Ga, qui se substitue partiellement à In [15-17].

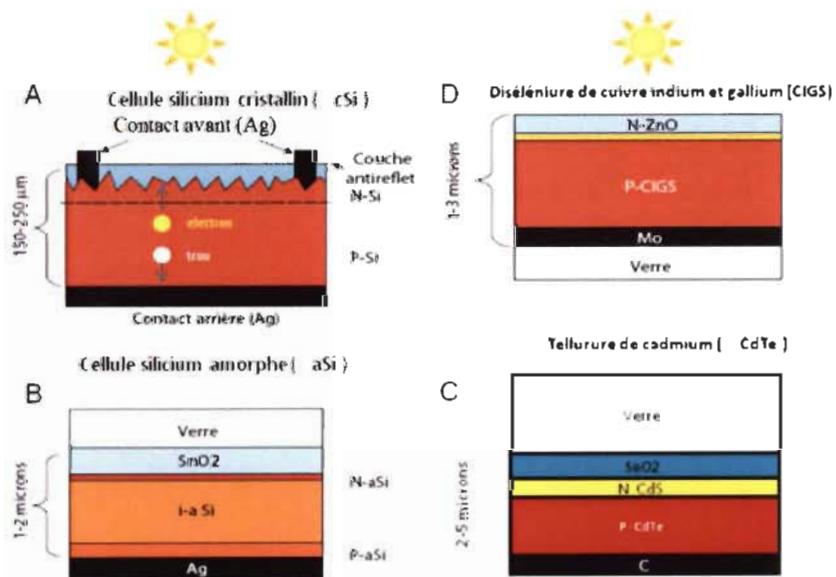


Figure 1. 8 Réprésentation des différentes filières photovoltaïques [16].

1.7.3 *Les cellules solaires de la troisième génération*

Cette troisième génération de cellule solaire est encore au stade de la recherche. Cependant, leur développement est très actif et motivé par les applications spatiales vu qu'elles visent principalement à obtenir le plus haut rendement jamais obtenu auparavant, mais en plus à minimiser les inconvénients et les obstacles rencontrés dans les générations précédentes telles que coût de fabrication très élevé, la disponibilité des matériaux ou bien leurs toxicités. Ce genre de cellule aux perspectives très prometteuses offre bel et bien la possibilité de répondre à ces problématiques dans un avenir proche [18].

Afin d'atteindre ce but, les chercheurs ont proposé plusieurs concepts pour la réalisation de la cellule du futur dont on va citer les plus intéressantes comme les cellules multijonctions, les cellules à concentration, les cellules nanocristallines à colorant et les cellules organiques [14].

1.7.3.1 **Cellules III-V multi jonctions**

Les cellules multijonctions de type III-V sont conçues à partir de plusieurs cellules superposées ayant des bandes d'énergie différentes afin d'absorber le maximum du spectre solaire et ainsi avoir le plus haut rendement possible. En effet l'utilisation d'un empilement à base de différents composés de type III-V permet une absorption optimale du spectre solaire vu que ces composés sont dotés d'une caractéristique remarquable, qui réside dans leur grand gap modulable, de cette façon la cellule multijonctions va pouvoir absorber le spectre solaire pour différentes longueurs d'ondes grâce au divers composés dans l'empilement (sous cellule). La cellule mère qui est constituée de sous cellules en série est obtenue par une technique d'épitaxie [14, 18].

Ces cellules se sont rapidement considérées comme la meilleure des solutions avec un rendement record qui atteint les 40% sous lumière concentrée en laboratoire, cependant pour le moment ce genre de cellule est dédié seulement aux applications spatiales à cause du coût de fabrication très élevé [14].

1.7.3.2 Cellules nanocristallines à colorant (cellules de Grätzel)

Appelé aussi cellules de Grätzel par rapport à leur inventeur Michael Grätzel, ces cellules sont composés d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Généralement, on utilise l'oxyde titane pour son large gap de 3.2 eV, avec un électrolyte liquide dans lequel l'oxyde semi-conducteur est noyé et un colorant organique qui sert d'absorbeur de photon. Ce type de cellules ont un principe de fonctionnement totalement différent des autres cellules, une fois que le colorant gagne assez d'énergie grâce au photon absorbé ce dernier va émettre un électron à l'électrode en platine de la bande de conduction d'oxyde semi-conducteur qui va régénérer par la suite le colorant oxydé [14, 18].

Les cellules nanocristallines se caractérisent par leur longue durée de vie et leurs stabilités au fil des années, en plus leur simple fabrication qui ne nécessite pas de grandes installations comme il est le cas pour les cellules inorganiques. Actuellement, ce genre de cellules représente les meilleurs rendements dans la catégorie des cellules solaires de troisième génération avec un rendement en laboratoire de 10.4%, obtenu par la société Sharp. D'ailleurs elles seront les premières cellules de troisième génération à être commercialisées dans un futur proche. Cependant, comme pour toutes les cellules solaires celles-là aussi présentent un inconvénient au niveau de l'électrolyte liquide, il s'agit des fuites. Les chercheurs ont remplacé cet électrolyte liquide par un solide. Malheureusement, ça n'a pas donné d'aussi bons résultats que sur sa première forme [18].

1.7.3.3 Cellules photovoltaïques organiques

Les matériaux organiques ont des propriétés optoélectroniques remarquables qui peuvent être d'une grande utilité pour les applications photovoltaïques, à cet effet les cellules organiques ont fait un sujet de recherche d'un ordre très important. Ce genre de cellule se compose d'une couche active, constituée à son tour de plusieurs couches de polymères très fines superposées ou bien d'un réseau interprété polymère-molécule. Cette couche active est prise en sandwich entre deux couches conductrices, généralement l'une de ces deux couches est transparente d'une épaisseur ne dépassant pas les 10nm [13].

Ces cellules ont un principe de fonctionnement basé sur le transfert photo-induit d'électron d'un polymère à un autre où un joue le rôle de donneur et l'autre d'accepteur. Ces charges seront transportées vers les cathodes métalliques par la suite. Au début le rendement de conversion de ces cellules était trop bas environ 1%, après l'an 2000 le rendement a sauté au 4% grâce aux travaux de J.Xue. Puis il a été encore amélioré par une équipe de chercheurs à l'Université du Nouveau-Mexique qui ont obtenu un rendement de 5.2%, pour arriver enfin à un rendement record pour ces cellules organiques qui est de 7.9% par SOLARMER. Ce rendement très bas est expliqué par plusieurs facteurs comme la taille du gap, la dégradation des matériaux, la recombinaison des porteurs et l'irradiation lumineuse. Cependant, les recherches se poursuivent afin de mettre un terme à ces obstacles et augmenter l'efficacité de ces cellules, dont on peut citer la théorie qui propose de développer des cellules hybrides [14, 19].

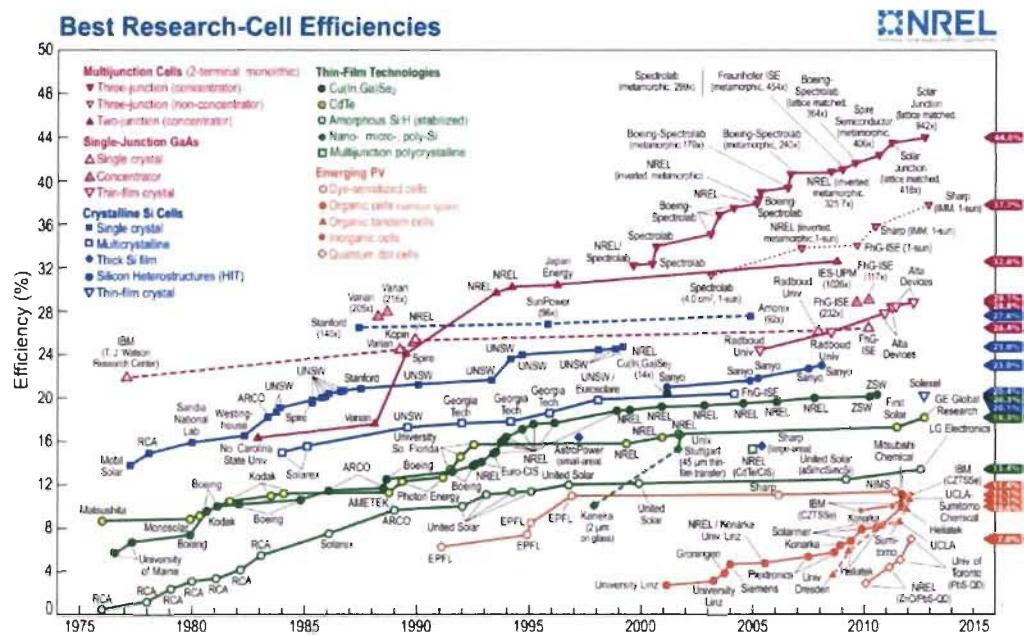


Figure 1.9 Évolution des rendements record obtenus pour les différentes filières

photovoltaïques [source NREL].

1.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté l'état d'art de la technologie photovoltaïque en commençant par quelques notions sur l'énergie solaire, le spectre solaire ainsi que le rôle de ces énergies renouvelables, puis nous avons fait une étude détaillée de la cellule solaire en passant par tous les axes nécessaires pour la compréhension de cette technologie comme sa structure, son principe de fonctionnement avec ces équations physiques qui définissent ces paramètres, nous avons également parlé des modules photovoltaïques et effet photovoltaïque. Enfin, nous avons parlé de toutes les filières et les technologies existantes dans le domaine du photovoltaïque en décrivant les catégories et les types des cellules (1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} génération) afin de cerner cette technologie du photovoltaïque.

Chapitre 2 - Nanotechnologie

2.1 Introduction

Nanotechnologies, un simple mot, mais avec un énorme potentiel et un avenir très prometteur pour la science selon les chercheurs et les scientifiques.

Ces dernières années, le nano monde préoccupe les chercheurs dans les entreprises et même de plus en plus le grand public, car la découverte des nanotechnologies fut présentée comme la solution idéale aux nombreux problèmes connus dans le monde comme l'épuisement des ressources d'énergie, les pollutions, le changement climatique et la pénurie d'eau.

Les nanotechnologies sont considérées comme de puissants outils qui permettent d'envisager de nouvelles façons d'exploiter et stocker l'énergie.

À une échelle nanométrique, on trouve une très grande modification au niveau des propriétés physiques de la matière, principalement les énergies caractéristiques des niveaux électroniques, les modes de vibrations des atomes ainsi que leurs interactions avec les photons. Théoriquement l'utilisation des nanostructures dans le domaine du photovoltaïque offre un potentiel de rendement énergétique beaucoup plus élevé que celui du photovoltaïque standard à base de silicium [20]. En partant du principe «plus la dimension de ces nano-objets diminue par rapport au matériau massif, plus l'écart entre leurs propriétés physiques devient plus important». Cette structuration va donc pouvoir ouvrir

plus de possibilités dans le processus de conversion photovoltaïque, grâce aux propriétés nouvelles qui caractérisent ces nanostructures.

Ces nanostructures ont des faibles coûts de fabrication, ce qui les rend encore plus intéressant, car le coût de fabrication était toujours considéré comme un inconvénient majeur pour ces systèmes [21, 22].

2.2 Historique

Le rêve de l'infiniment petit et des nanotechnologies fut naitre en 1959 par le célèbre physicien américain Richard Feynman lors de son discours visionnaire intitulée «There's Plenty of Room at the Bottom» présenté devant l'American Physical Society. Il présenta un ensemble de choses, qui selon lui, seront facilement réalisables dans un futur pas lointain en spéculant toutes les possibilités que la miniaturisation, les technologies de l'information et la physique peuvent offrir et lança le défi d'aller au cœur de la matière pour la transformer, molécule par molécule en manipulant les atomes un a un. Cependant, ces possibilités n'ont pas pu être examinées à cette époque et restèrent de simples prédictions qui enthousiasmaient les chercheurs et les scientifiques. C'était seulement en 1974 que le terme «nanotechnologie» fut évoqué pour la première fois par Norio Tanigushi, puis il a fallu six ans de plus pour que ce terme soit popularisé et vulgarisé par Éric Drexler à travers son livre sur la manufacture moléculaire. Ce dernier a beaucoup contribué au cours des années à susciter la découverte des nanotechnologies. Sauf que rien de cela ne pouvait être concrétisé avant l'arrivée du microscope à effet tunnel qui a été inventé par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer en 1981 [21].

En 1991, les nanotubes de carbone ont été découverts par S. Iijima. Ce qui a permis la naissance de la nanoscience en 1996, qui a été considérée au début comme une science-fiction car ces applications n'étaient pas encore reconnues au public, jusqu'à 1998 où est créé le Interagency Working Group on Nanotechnologie (IWGN) et qui deviendra juste après le National Nanotechnology Initiative (NNI).

Et voilà qu'après une quarantaine d'années, d'immenses progrès ont été réalisés en science et en ingénierie et qui ont toutefois pu répondre à certaines questions scientifiques grâce à la nanotechnologie [23].

2.3 Définition

Le terme nanotechnologie signifie toute conception, fabrication et utilisation de structures d'une dimension inférieure à 100 nanomètres (milliardième de mètre 10^{-9}). Mais selon la national nanotechnology initiative au états unis (U.S.A), les nanotechnologies font référence à la recherche et à la mise au point de matières au niveau atomique et moléculaire dans un intervalle allant de 1 à 100 nm, afin de pouvoir étudier et connaître les phénomènes au niveau de la molécule, atome par atome, ainsi créer des structures ayant des propriétés fondamentalement nouvelles à cause de leurs tailles [23].

D'après le Royal society au royaume uni (U.K), il y'a une distinction entre les nanosciences et les nanotechnologies et trouve que les nanotechnologies couvrent seulement la conception, la mise au point et la production de structures et dispositifs à l'échelle nanométrique. Alors que l'étude et la manipulation des particules au niveau nanométrique sont définies plutôt par le terme «nanosciences» [23, 24].

La nanoscience est donc définie comme étant le domaine qui porte sur l'étude des phénomènes à une échelle nanométrique.

Les nanotechnologies ont pour objectifs d'élaborer de nouveaux dispositifs et matériaux plus petits et plus performants grâce aux avantages de leurs propriétés nouvelles, que ce soit physique ou chimique et visent aussi à fabriquer des systèmes et des appareils avec de nouvelles propriétés et de nouvelles fonctions.

La constitution à l'échelle nanométrique va aider améliorer les performances grâce à de nombreux facteur : la réduction des dimensions de la particules, une amplification des interfaces et des surfaces spécifiques, une multiplication des interactions entre matériaux, un effet de confinement [24].

2.4 Nanomatériaux

Vu la complexité de la structuration des nanomatériaux, les scientifiques ont établi quelques classifications pour mieux les étudier et qui sont basées généralement sur leurs structures, leurs géométries et leurs dimensions.

Les nanomatériaux sont des matériaux avec des structures qui contiennent au minimum une dimension qui est égale ou inférieure à 100 nm. Cela dit, ils sont classés selon leur dimensionnalité comme suit:

a) NANO-0 : On dit nanomatériaux de dimension 0, quand tous les axes ou bien les trois dimensions de la particule ont environ la même longueur et sont de l'ordre du nanomètre. Ce genre de nanomatériaux est obtenu par une phase vapeur sursaturée par exemple : Agrégats, amas, nanoparticules, cristallites quantiques, nano cristaux, nano phases, poudres ultrafines, milieux hautement dispersés...

b) NANO-1 : Pour les nanomatériaux de dimension 1; on parle de nanotubes, nano fils lorsqu'on a deux axes de l'ordre du nanomètre précisément d'un nanomètre à quelques dizaines de nanomètres, mais pas le troisième, car il doit être plus important de 500 à 10000 nanomètres afin de former une structure allongée. On peut citer par exemple les nanotubes de carbones (NTC) généralement constitués de plusieurs tubes concentriques, les nanomatériaux de cette dimension sont assez souvent utilisés pour la transmission des signaux électrique.

c) NANO-2 : Dans cette catégorie de nanomatériaux de dimension 2 on trouve les couches ultrafines réalisé par un dépôt d'agrégats ou d'atomes dans ce cas les particules possèdent seulement une seule dimension de l'ordre du nanomètre par exemple : Couches minces, revêtements et membranes submicroniques nano structurés, nano-argiles exfoliées (nano clays), les multicouches font aussi partie de cette catégorie même si leurs compositions chimiques peuvent être différentes des couches simples. Ces couches minces peuvent être homogène ou bien constituer de nano blocs, ces dernières sont généralement préparées par différentes techniques telles que l'épitaxie par jet moléculaire, l'électrodéposition qu'on va voir en détail dans le prochain chapitre.

d) NANO-3 : Les matériaux nano structurés en volume ou nano phasés ont généralement une forme compacte, ils sont constitués de grain monophasé ou polyphasé ayant une taille de l'ordre de 1 nanomètre à 100 nanomètres, leurs structures intrinsèques nanométriques leurs donnent des propriétés physiques particulières et d'excellentes propriétés magnétiques telles qu'une forte perméabilité et une bonne aimantation. On peut citer par exemple: Poly cristaux à grains submicroniques, matériaux nano structurés,

revêtements et membranes épaisses nano structurés, solides nano organisés, nano céramiques, nano composites...[25, 26].

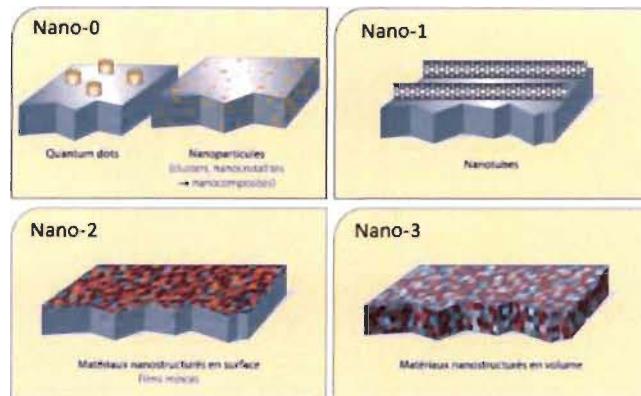


Figure 2. 1 Illustration des différents types de nano matériaux [26].

Avec ces éléments de base on peut construire de microsystèmes et des nano systèmes qui correspondent à des systèmes intelligents multifonctionnels miniaturisés avec des fonctions de détection, d'actionnement et de traitement.

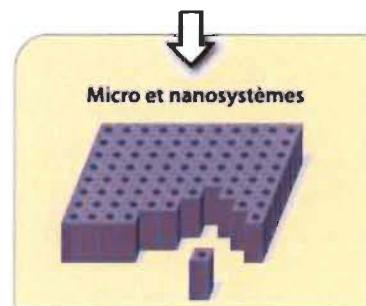


Figure 2. 2 Illustration de micro et nano système [26].

L'épaisseur de l'échantillon déposé joue un rôle important dans les propriétés électriques des nanomatériaux, car une épaisseur très réduite va donner des grains non

percolés et par la suite une très faible conductivité. Cependant, si la taille des grains est de l'ordre du nanomètre de nouvelles propriétés électrique apparaissent telles que :

- La magnétorésistance : Ce phénomène résulte de la variation de la résistance électrique sous l'application d'un champ magnétique. En effet l'introduction d'un champ magnétique graduel va provoquer un alignement continu des moments, dû au couplage magnétique entre les couches ferromagnétiques en fonction de l'épaisseur de ces dernières, qui va entraîner par la suite une grande réduction de la résistance mesurée aux couches d'après la loi [27]:

$$R = R_0 \left(1 - \alpha \frac{M^2}{M_s^2} \right) \quad (2.1)$$

Où :

M : Aimantation.

M_s : Aimantation à saturation.

α : Coefficient de magnétorésistance.

R_0 : Résistance initiale.

- Les super réseaux semi-conducteurs se constituent de plusieurs couches dotées d'épaisseur de l'ordre du nanomètre et ayant de différentes largeurs de bandes d'énergies (gap). En effet dans ces super réseaux il y aura une quantification d'énergie grâce à l'apparition des puits de potentiels quasi infinis qui vont inciter la propagation des ondes électromagnétiques [25, 27].

2.4.1 Propriétés magnétiques des nanomatériaux

Les propriétés magnétiques des matériaux dépendent de la dimension des grains cristallins. L'utilisation des nanomatériaux a permis d'avoir de nouvelles propriétés magnétiques qu'on ne trouvait pas avec des matériaux classiques. Nous pouvons voir les applications des nanostructures magnétiques dans différents domaines :

- Le domaine médical : Grâce aux nanoparticules magnétiques, il est désormais possible de faire une manipulation à distance par champ magnétique, car les particules ferrimagnétiques permettent d'allumer ou éteindre le moment magnétique effectif du champ magnétique. Sans oublier que la petite taille des nanoparticules offre à son tour d'autres avantages tels que la possibilité de se transporter dans les vaisseaux, les tissus et même les cellules en toute sécurité, car les forces magnétiques existantes dans les nanoparticules sont considérablement faibles et ne détruisant pas les tissus vivants. D'ailleurs, elles sont utilisées comme agents de contraste en IRM [27].
- Le domaine de l'enregistrement magnétique dans le domaine du stockage sur une interface magnétique tel que les disques durs par exemple a atteint une densité surfacique phénoménale qui franchit le cap des 10 Gigabits par centimètre carré grâce à l'utilisation des nanotechnologies. Grâce aux nanostructures et la possibilité de contrôler leurs structures à l'échelle nanométrique, on peut désormais contrôler la polarisation en spin du courant puisque cette dernière diffuse sur une longueur de l'ordre du nanomètre et ainsi contrôler les propriétés électriques à partir du champ magnétique et vice-versa. Récemment on a découvert une autre propriété remarquable, cette propriété

permet de commander l'aimantation de la couche magnétique grâce au courant polarisé en spin [27].

2.4.2 *Propriétés optiques des nanomatériaux*

Les propriétés optiques pour n'importe quel matériau sont définies par l'interaction de la lumière avec la matière. Cependant, parmi les propriétés optiques les plus intéressantes dans les nanomatériaux on trouve :

- ❖ La photoluminescence qui résulte de la recombinaison des paires électron-trou. Ainsi ce phénomène va créer une émission de lumière dans le visible. Mais ce qui la rend intéressante dans les nanomatériaux, c'est que cette dernière est déplacée vers les hautes fréquences. Les semi-conducteur de type III-V sont les plus adéquats pour cette propriété surtout pour la fabrication des diodes à émission de lumière.
- ❖ La zone d'absorption de l'ultraviolet se réfère à la bande interdite des isolants. Pour les nanomatériaux, les pics d'absorption sont aussi déplacés vers les hautes fréquences, ce qui est très intéressant pour applications photovoltaïques dans le filtrage des rayons solaires [26, 28].

2.5 **Domaine et applications des nanotechnologies**

Les nanotechnologies font l'objet de nombreuses recherches dans le monde, même si au début les recherches dans le domaine de la nanotechnologie étaient focalisées dans seulement quelques domaines. Aujourd'hui, le monde nano a pris beaucoup d'expansion et ses applications sont émergentes que ce soit dans les domaines de l'industrie automobile,

aéronautique et spatiale, de l'électronique, de la pharmaceutique et des biotechnologies, de l'énergie et de l'environnement.

2.5.1 *Industrie automobile et aéronautique*

Les nanotechnologies ont contribué dans le développement de ce domaine grâce aux matériaux utilisés maintenant pour la fabrication des véhicules et qui sont plus renforcés par des nanoparticules et plus légers automatiquement, des pneus plus résistants et recyclables, des plastiques ininflammables et beaucoup moins chers.

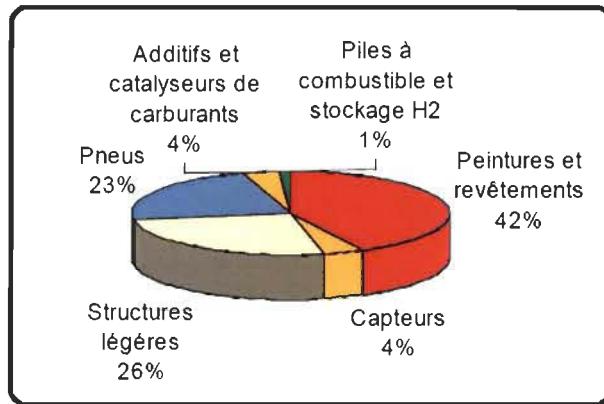


Figure 2. 3 Le marché des nanotechnologies dans l'automobile en 2015 [29].

2.5.2 *Nanoélectronique*

Ce domaine est celui qui a été le plus exposé à la nanotechnologie et qui a subi un immense développement, que ce soit par la miniaturisation ou par l'invention d'outil et concerne tout ce qui a un rapport avec l'électronique ou l'informatique comme des ordinateurs, cellulaires, cartes mémoires ou des cartes à puce utilisant des points quantiques ou des nano couches, des écrans plats grâce à l'évolution des transistors, des systèmes de surveillance miniaturisés, des nouvelles machines ou appareils dans tous les domaines des

technologies et des communications avec des capacités d'enregistrement et des vitesses de traitement beaucoup plus rapides et moins coûteuses [26].

2.5.3 *Biotechnologies*

La nanotechnologie a aussi joué un grand rôle dans ce domaine, car elle nous a permis d'étudier la structure des composants moléculaires fondamentaux de la vie comme les protéinées, les acides, les vitamines, les lipides, etc..., et ainsi fabriquer de nouveaux médicaments et des produits chimiques ou pharmaceutiques basés sur des nanostructures. Les nanotechnologies ont aussi sollicité le domaine de la chimie biomimétique [26, 29].

2.5.4 *Domaine biomédical*

Ce domaine est considéré comme le domaine le plus prometteur pour les nanotechnologies vu toutes les révolutions connues ces dernières années dans ce domaine. Grâce à la nano-exploration et le nano-diagnostic en raison de la capacité d'agir à l'échelle des nanostructures, des matériaux nanométriques pourraient être injectés à des endroits précis du corps humain pour le diagnostic. Il est aussi possible de caractériser les propriétés physiques et chimiques des cellules. Les nanotechnologies permettront aussi la génération des tissus ou des organes humains et aussi la création de prothèses plus résistantes, compatibles et plus fiables avec une meilleure longévité, mais aussi de pouvoir guérir quelques maladies comme le cancer grâce aux nano-aimants utilisés à cet effet [29, 30].

2.5.5 *Secteur spatial et militaire*

Dans ce domaine, on trouve une grande utilisation des nanotechnologies et ça va forcément croître de plus en plus dans les années à venir surtout pour alléger et miniaturiser de nouveaux matériaux, ce qui permettra d'avoir des engins spatiaux plus légers. Les

nanotechnologies permettront aussi de faire des améliorations au niveau de l'armement en améliorant de différents missiles par exemple ou en renforçant les blindages, le passage à l'échelle nano pourrait aussi aider à créer des nano machines très petites et très efficaces comme les robots, les capteurs et les détecteurs [29].

2.5.6 Secteur de l'énergie et de l'environnement

Les nanotechnologies sont considérées comme la solution à tous les problèmes rencontrés dans le domaine de l'énergie et aussi de l'environnement, l'arrivée de ces derniers a changé la mise et a ouvert de nouveaux horizons surtout pour les énergies renouvelables, les nanotechnologies permettront une production, un stockage, une conversion et une gestion plus efficace de l'énergie et plus écologique avec de nouveaux types de batteries ou des installations photosynthèses, une utilisation de l'hydrogène comme combustible propre grâce à des nanotubes de carbone. Ce qui a permis à son tour de réduire les sources de pollution et de trouver de nouvelles opportunités pour le recyclage ou encore des membranes sélectives qui peuvent filtrer les contaminants avec des pièges nano structurés pour enlever les polluants.

Tandis qu'avec l'accélération des recherches sur les nanotechnologies cette technologie a envahi quasiment tous les domaines sans exception, car on la trouve aussi dans le secteur manufacturier, l'ingénierie de précisions pour la production de nouvelles générations d'instrument, amélioration de la productivité en agriculture, le génie civil et la construction et même dans le textile [29, 31].

2.6 Nano matériaux utilisés dans la conversion de l'énergie

2.6.1 *Le champ d'application des nanostructures dans le photovoltaïque*

L'introduction de nanostructure dans une cellule solaire offre plusieurs avantages :

- Possibilité de dépasser une seule jonction et avoir un meilleur rendement énergétique.
- Capacité à surmonter certaines limites trouvées en pratique dans les matériaux existants liées à l'accord des mailles.
- Fabrication des dispositifs à un faible coût grâce à l'auto assemblages.

C'est pourquoi on accorde un grand intérêt à l'utilisation de cette approche qui permet d'apporter une grande amélioration que ça soit dans le rendement élevé ou le faible coût de fabrication [32].

2.6.1.1 Effets de taille quantique

Principe :

Dans une nanostructure les propriétés physiques sont très différentes de celle d'un matériau massif. En particulier, la réduction de la taille des cristaux semi-conducteurs à des grandeurs nanométriques produit un confinement quantique, car les électrons à ce niveau ne se comportent pas comme des particules, mais plutôt comme des ondes ce qui permet de localiser ces derniers sans trop affecter les niveaux d'énergies d'après le principe d'incertitude de Heisenberg.

Si on réduit, les dimensions des cristaux semi-conducteurs une fois ensuite une deuxième puis une troisième fois on obtiendra respectivement des films, des fils et des boîtes comme illustré dans la figure ci-dessous [32] :

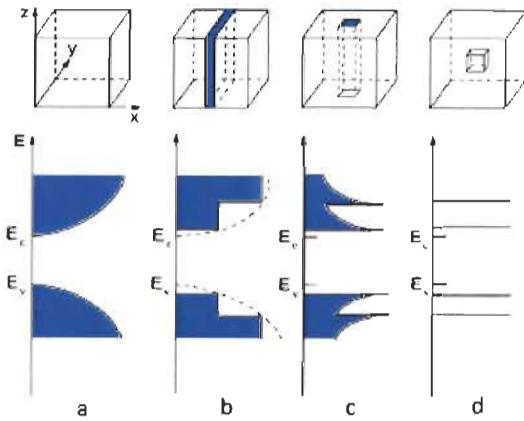


Figure 2.4 Densité d'état dans différentes configurations de confinement

[U.Serincan, 2004].

- (a) Matériaux massifs.
- (b) Film quantique.
- (c) Fil quantique.
- (d) Boîte quantique.

Sachant que les densités d'états quantiques et les dispersions d'énergie sont en fonction du vecteur d'onde ($K=2\pi/\lambda$).

E_c devient de plus en plus étroit avec les confinements des électrons. On remarque aussi que dans les boîtes quantiques l'énergie varie de manière discontinue, d'ailleurs c'est cette propriété qui fait leur intérêt principal pour la réalisation de plusieurs applications dont le photovoltaïque.

D'après la figure (2.4b), on peut voir clairement que la miniaturisation de la taille des cristaux semi-conducteurs induit la discrétisation de l'énergie, l'opportunité de cette miniaturisation permet de moduler la largeur de la bande interdite E_g en fonction de la taille du nano-cristal obtenu. En jouant sur la largeur de la bande interdite nous permettra de

générer plus de porteurs et ainsi absorber plus de photons ce qui est impossible dans un matériau massif [32].

À l'échelle nanométrique, les matériaux peuvent prendre différentes formes ou structures, mais dans le cas sphérique le gap est défini comme suit [32]:

$$E_{min} = \frac{k^2\pi^2}{2R^2} \left[\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right] - \frac{1.8q^2}{E_{g0}R} - 0.25E_{Ryd}^* \quad (2.2)$$

R : Rayon de la particule.

m_e^* : Masse effective de l'électron.

m_h^* : Masse effective du trou.

E_{Ryd}^* : L'énergie de la liaison en meV.

$k = \frac{h}{2\pi}$: h est la constante de Planck.

E_{g0} : Gap du semi-conducteur en volume.

Afin de voir les effets de confinement quantique, on va donner un exemple pour différent semi-conducteurs courant dans le tableau suivant :

Tableau 2- 1 Données relatives aux effets quantiques dans différents semi-conducteurs [32].

Semi-conducteur	Gap en volume (ev)	Masse effective des électrons	Masse effective des trous	Constante diélectrique relative
CdSe	1.8	0.13	0.45	10.1
CdS	2.5	0.21	0.68	9.4
GaAs	1.5	0.067	0.082	13.2
InSb	0.17	0.014	0.42	17.3
ZnS	3.6	0.34	1.76	8.9

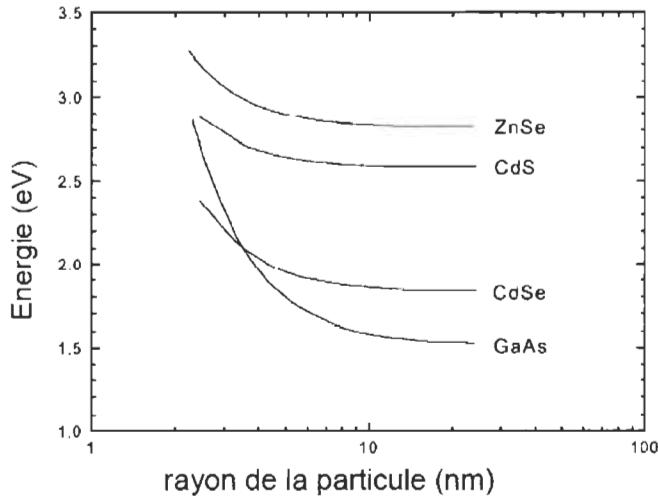


Figure 2.5 Évolution théorique de la largeur de bande interdite en fonction de la taille des nano-cristaux et leurs natures [32].

D'après cette étude théorique on peut constater que les effets quantiques font considérablement augmenter la valeur du gap, ce qui nous donne un immense avantage sur les semi-conducteurs massifs en exploitant cette propriété afin d'adapter un gap selon les besoins. En plus, cette possibilité d'ingénierie de la bande interdite n'affecte pas la composition chimique du matériau.

2.6.1.2 Effets de confinement géométrique

Principe :

L'absorption de la lumière dans un matériau est démontrée par la relation suivante [32] :

$$\phi(x) = \phi(x)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2.3)$$

Où $\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde λ .

Cette relation lie le flux entrant au flux dans du matériau, sachant que l'absorption de la lumière se fait généralement dans le domaine du visible sur quelques dixièmes de microns

pour la majorité des matériaux dotés d'une grande capacité d'absorption comme le cas des semi-conducteurs composés à gap direct, mais dans le cas des matériaux moins absorbants comme le silicium a gap indirect. L'absorption de la lumière se fait sur plusieurs dizaines de microns.

Une bonne absorption est due à une bonne collecte de porteurs photo générés grâce à une plus faible profondeur d'absorption par rapport à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires et une conductivité en volume assez élevé. Généralement dans un matériau photovoltaïque classique, on trouve que la longueur de diffusion est plus faible que l'épaisseur d'absorption optique, ce qui réduit les propriétés du matériau malgré que ce dernier possède une bonne capacité d'absorption. Pour certains cas on peut faire contourner cet inconvénient en ajoutant une zone intrinsèque où le champ électrique n'est pas nul ce qui donne une plus grande probabilité de recombinaison des porteurs dans cette zone, en particulier le cas pour le silicium amorphe de type p-i-n [32].

D'ailleurs, c'est à cause de cette contrainte qu'on donne aujourd'hui un grand intérêt pour l'utilisation des nanostructures.

L'idée est de nano structurer l'espace entre des zones de type n et des zones de type p en divisant le volume d'absorption en domaines actifs où la zone d'absorption est d'épaisseur inférieure à la longueur de diffusion ainsi avoir la possibilité de collecter les paires électron-trou comme illustré dans la figure (2.6). Ce concept est appelé «jonction interpénétrée» ou «bulk heterjunction», il a été introduit pour la première fois en 1991 dans des cellules photo électrochimiques [32].

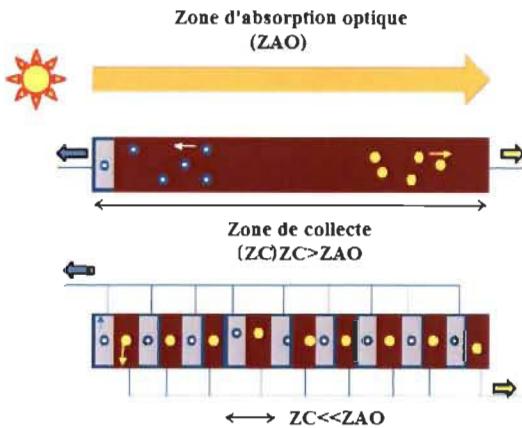


Figure 2. 6 Démonstration du principe de nano structuration [32].

Cette nano structuration de l'espace entre les zones n et p a pour principe d'exploiter les propriétés photovoltaïques de matériaux dont la longueur de diffusion qui consiste à la collecte des paires électron-trou est inférieure à la zone d'absorption optique [32].

2.6.2 *Ingénierie optique à base de nanostructures*

2.6.2.1 **Texturation de la matière**

Dans les matériaux à base de nanostructure la zone active et de plus en plus fine. Cela dit, il faut s'assurer que cette réduction de zone ne devient pas un inconvénient qui causera des pertes optiques ce qui signifiera une diminution du rendement. Afin d'éviter cet obstacle, il faudra aussi améliorer la gestion de la partie optique pour que les systèmes permettent le confinement de rayonnement dans ces zones très minces. La méthode la plus utilisée de nos jours est celle de la photonique, cette stratégie de confinement optique sur des couches minces dans les cellules photovoltaïques :

- Minimise les pertes par réflexion.

- Augmente le parcours optique dans la zone active grâce à la texturation des surfaces.
- Optimise les effets de confinement en raison de l'utilisation des séparateurs optiques diélectriques.

Sauf que cette méthode a été élaborée pour des couches minces de l'ordre micrométrique, mais pour des épaisseurs en nanomètre, il faudra employer de nouvelles stratégies afin de pouvoir maîtriser le confinement optique dans ces couches [32].

2.6.2.2 Confinement optique par champ électromagnétique

La dissipation d'énergie lumineuse $Q(z, \lambda)$ est en fonction de la longueur d'onde λ et la position verticale z dans la cellule comme illustré dans l'équation [32]:

$$Q(z, \lambda) = \alpha(\lambda) n_i / n_0 |E(z)/E_0|^2 \quad (2.4)$$

Où :

$\alpha(\lambda)$: Coefficient d'extinction.

n_i : Indice de réfraction de la $i^{\text{ème}}$ couche.

n_0 : Indice de réfraction du milieu incident.

E_0 : Amplitude du champ électromagnétique incident.

$E(z)$: Amplitude du champ électromagnétique à la position z .

Pour obtenir une conversion énergétique optimale, il faut passer par la modélisation du champ électromagnétique et ainsi une optimisation des cellules solaires. Deux études, une à l'Université d'Allemagne et l'autre à l'Université de Californie ont pu démontrer qu'en ajustant le champ électromagnétique dans la couche active de la cellule on peut obtenir un

photo courant plus élevé et donc une meilleure absorption optique ce qui veut dire un meilleur rendement [32].

2.6.2.3 Diffusion de la lumière par texturation des interfaces

La texturation des interfaces a pour but d'augmenter le parcours optique dans la couche absorbante, ce qui est fait naturellement dans les couches minces a contacts avant et arrière rugueux. La rugosité est définie par la fonction $\eta(x, y)$ comme illustré dans la figure ci-dessous, cette dernière peut avoir des modulations aléatoires et aussi périodiques.

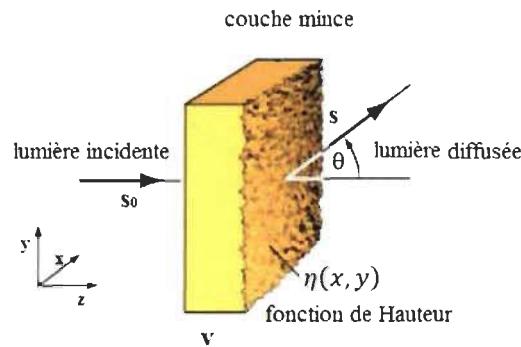


Figure 2. 7 Illustration des effets de diffusion de lumière dans une couche mince

texturée [32].

L'intensité diffusée est donnée généralement par la relation théorique suivante [32]:

$$I(\lambda, \theta) = \frac{A_{opt}}{A} \cos \theta \left| \frac{F}{r} \iint Z e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \right|^2 \quad (2.5)$$

Où :

Z : Fonction de hauteur.

K : Vecteur d'onde.

$$Z = \frac{1}{ik_z} [1 - \exp(-ik_z \eta(x, y))] \quad (2.6)$$

La maîtrise de la texturation fait l'objet de nombreuses recherches, mais pour obtenir une diffusion optimale de la lumière sur différentes longueurs d'ondes la texture la plus adaptée ou la plus efficace est la texturation hiérarchique dans nombreux domaines de fréquences spatiales [32, 33].

2.6.2.4 Réseaux de diffraction

L'utilisation des réseaux de diffraction est une technique qui consiste à diffracter la lumière incidente dans de grands angles sur des cellules solaires à couche mince afin de piéger cette dernière dans le matériau, soit pour avoir le spectre de la lumière sous forme d'une onde guidée et ainsi améliorer le couplage optique dans ces cellules. La configuration de diffraction dépend de la période du réseau par rapport au spectre d'onde incidente [34].

Des études ont été menées là-dessus par le CEA Saclay en France et aussi par l'équipe de Dong-Yu Kim au Heeger center for advanced Materials en Corée afin d'optimiser l'efficacité de conversion des cellules solaires organiques, les résultats obtenus ont démontré une amélioration d'absorption à certaines longueurs d'ondes grâce à cette technique [35].

2.6.2.5 Cristaux photoniques

L'idée dans ce concept est basée sur les cristaux photoniques. Soit des structures qui permettent de manipuler ou contrôler les propriétés de propagation du flux lumineux grâce à leur indice de réfraction qui varie périodiquement dans l'espace.

Pour cette approche il faut avoir une cellule nano structuré à jonction où sa couche active est constituée d'un réseau de nano fils P3HT insérés dans une matrice de PCBM, ainsi

obtenir un réseau semblable à une structure photonique qui a pour avantage d'augmenter le couplage de la lumière et aussi la collecte des charges dans le matériau grâce au nano fils.

Le principe dans un cristal photonique est tout à fait similaire à celui des guides d'ondes, c'est-à-dire que le champ électromagnétique vérifie l'équation de propagation d'Helmotz et présente des propriétés de périodicités en donnant une discréétisation des modes, appelé mode de Bloch.

La réalisation expérimentale de ces structures à cristaux photoniques a été faite récemment à l'Université de la Caroline du Nord et a démontré non seulement une certaine amélioration au niveau des performances électriques de la cellule, mais aussi une amélioration d'absorption optique ce qui a donné un accroissement du rendement dû à la nano structuration de la cellule bien sûr. Cependant, ces résultats restent encore insatisfaisants, mais ils ont comme même permis d'ouvrir une voie de recherche qui paraît assez prometteuse [36, 37].

2.7 Plasmonique

L'effet plasmon

Ce phénomène est décrit par l'interaction résonante d'une onde électromagnétique incidente avec les électrons de conduction des atomes

On peut classer les plasmons en deux types :

- Les plasmons de surface délocalisés : ils se propagent sur les surfaces planes.
- Les plasmons de surface localisés : sont des excitations de nuage d'électron qui se propagent à l'intérieur de structure nanométrique et qui sont utilisés dans les cellules solaires de 3ème génération [38].

Sachant que lorsque les ondes électromagnétiques se propagent sur une interface, ils créent une excitation des électrons à partir des ondes électromagnétiques existantes à la surface du métal selon la théorie de Maxwell. Pour trouver la fréquence de résonance des plasmons, soit la fréquence d'oscillation collective des charges électrique, on introduit tout d'abord la fréquence plasma ω_p , s'exprime [38]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{\varepsilon_0 m_0}} \quad (2.7)$$

Avec :

m_0 : La masse effective d'un électron de conduction.

ε_0 : La constante diélectrique du vide.

N : La densité volumique d'électron.

q : La charge d'électron.

Généralement on utilise cette fréquence pour calculer la valeur de la permittivité ε_m [38].

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega - i\omega\gamma} \quad (2.8)$$

γ est la constante de relaxation, si on prend ε_1 la partie réelle de la permittivité et ε_2 la partie imaginaire on aura :

$$\varepsilon_1(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_2(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2\gamma}{\omega^3} \quad (2.10)$$

En considérant que les nanoparticules sont très inférieures de taille à la longueur d'onde incidente, on peut appliquer le modèle de Mie qui consiste à résoudre les équations de

maxwell. La résolution des équations nous donne le coefficient d'extinction de Mie qui s'écrit par l'expression suivante [38]:

$$k(\omega) = \frac{9N\omega V \varepsilon_d(\omega)^{3/2}}{c} \frac{\varepsilon_2(\omega)}{[\varepsilon_1(\omega) + 2\varepsilon_d(\omega)]^2 + \varepsilon_2(\omega)^2} \quad (2.11)$$

Avec :

V: Le volume de la nano bille.

c: La célérité de la lumière dans le vide.

ε_d : La permittivité complexe du milieu diélectrique environnant.

Le coefficient d'extinction $k(\omega)$ est la valeur de la perte d'énergie d'un rayonnement électromagnétique, il est donc équivalent à un coefficient d'absorption et peut être considéré comme la part de l'énergie incidente, d'après l'équation précédente la valeur maximale de k est obtenue lorsque :

$$[\varepsilon_1(\omega) + 2\varepsilon_d(\omega)]^2 + \varepsilon_2(\omega)^2 = 0 \quad (2.12)$$

D'où :

$|\varepsilon_1(\omega)| \gg \varepsilon_2(\omega)$, la condition de résonance devient :

$$\varepsilon_1(\omega) = -2\varepsilon_d(\omega) \quad (2.13)$$

On déduit donc théoriquement la fréquence de résonance plasmon ω_s qui est :

$$\omega_s = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + 2\varepsilon_d}} \quad (2.14)$$

La largeur de la résonance plasmon est inversement proportionnelle à la taille des particules [38].

Les applications de la plasmonique sur des cellules solaires on fait l'objet de plusieurs recherches menées récemment sur différent types de cellules dont on peut citer les travaux effectués sur des cellules organiques et qui ont permis de coupler des plasmon localisés qui a conduit à une augmentation significative du champ électromagnétique [39].

D'ailleurs les mesures expérimentales ont montré une augmentation de 50% de l'absorption lumineuse dans une couche active de 50 nm, il y'a eu aussi des travaux sur des cellules au silicium à couches minces qui ont pu aussi démontrer une amélioration remarquable par rapport à une cellule classique. Il y'a eu notamment des travaux très intéressants réalisés au Laboratoire de Phonique et Nanostructure du CNRS sur des cellules ultramince de Ga As de 25 nm d'épaisseur, les résultats obtenus ont montré une augmentation considérable de l'absorption optique dans le proche infrarouge [40].

2.8 Conclusion

Les nanotechnologies possèdent un fort potentiel et promettent une grande révolution à la technologie. En outre, grâce à la miniaturisation de la taille d'un objet à l'échelle nanométrique qui peut modifier les propriétés de ce dernier et même d'obtenir des meilleurs que celle de l'objet original. La richesse de leurs propriétés a permis à la science une révolution inégalée dans de nombreuses applications dans différents domaines. Cependant, les nanotechnologies sont toujours de l'actualité et représentent un grand intérêt pour la communauté scientifique et industrielle.

Ce deuxième chapitre a été consacré aux nanotechnologies ainsi que leurs domaines d'applications en général, puis on est allé voir en détail l'élément essentiel dans les nanotechnologies et qui réside dans les nanomatériaux. D'abord, on a commencé par

présenter les nanomatériaux et leurs classifications selon les scientifiques, en suite, on a évoqué leur principale qualité à travers leurs propriétés électriques, magnétiques et optiques. En particulier nous avons vu l'utilisation de ces nanomatériaux dans la conversion de l'énergie et les avantages qu'ils offrent aux cellules solaires, grâce à leurs propriétés et cela à travers l'effet de la taille quantique et celui du confinement géométrique ou optique, on a aussi abordé quelques techniques et concept pour les applications photovoltaïques basés sur cette technologie.

Chapitre 3 - Techniques de réalisation des cellules photovoltaïques à base de couches minces

3.1 Introduction

Vu la croissance de la demande industrielle de matériaux en couche mince. En plus, actuellement, on trouve de nombreuses techniques pour la réalisation des matériaux en couches minces. Cela revient à l'évolution technologique des machines ainsi que la variété des méthodes de dépôt des matériaux en couche mince. La filière du silicium en couche mince est considérée comme la filière historique, elle fut découverte dans les années soixante dix et développée en France par un certain Lionel Solomon. Cette filière a été longtemps utilisée dans le domaine du photovoltaïque, malheureusement son rendement est de seulement 6 à 8% n'empêche qu'elle représente encore 5% de la production photovoltaïque actuelle. Elle assez souvent utilisée dans des petites applications comme les calculatrices [41].

La production des matériaux en couche mince a vu une grande expansion dans les types de matériaux et ne fait qu'augmenter. Maintenant, on utilise des : isolants, semi-conducteurs, supraconducteurs, polymères...et leurs applications se sont propagées sur plusieurs domaines comme : microélectronique, mécanique, optique, chimie biomédicale...

Tout ça grâce au développement des techniques d'analyse de surface et à la précision du contrôle des paramètres. D'ailleurs, c'est ce qui a le plus contribuer au développement industriel de ces matériaux [41].

3.2 Les couches minces

3.2.1 *Définition*

La définition la plus répandue d'une couche mince est un revêtement, ou plus précisément c'est une mise en forme d'un matériau dont la dimension ou l'épaisseur a été fortement réduite, et qui peut varier de quelque angström à une dizaine de micromètres. Cette fine couche sera déposée sur un autre matériau, appelé généralement « substrat » [42, 43].

Le but de la couche mince est de donner des propriétés nouvelles à la surface de l'élément avec l'avantage de garder des propriétés massives du substrat, cette perturbation des propriétés physiques est due à la faible distance entre les deux surfaces limites (quasi bidimensionnelle) [44].

Grâce aux couches minces la conductivité électrique peut être maîtrisée de façon précise ainsi que la réflexion optique ce qui rend l'application des couches minces dans le photovoltaïque vraiment intéressante, car ces deux propriétés sont fondamentales pour obtenir un meilleur rendement.

Il est évident que l'effet de bidimensionnelle est inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche c'est-à-dire que cet effet sera important chaque fois que l'épaisseur sera de plus en plus faible.

En revanche, cet effet de bidimensionnelle perd tout son importance si l'épaisseur de la couche dépassera un seuil connu et le matériau retrouvera ces propriétés normales celles du matériau massif [44].

3.2.2 *But et caractéristiques des couches minces*

Une des raisons pour laquelle la technologie des couches minces est considérée comme un très grand atout dans le photovoltaïque, revient essentiellement à la simplicité des technologies mise en œuvre pour la réalisation de ces derniers, et surtout à leur utilisation économique en rapport avec leurs propriétés physiques (peu coûteuse).

Sans oublier la vaste gamme de matériaux utilisés pour la production de ces couches minces comme les alliages en tout sorte, les métaux, les polymères, les composés réfractaires et intermétalliques.

La seconde raison essentielle est leurs caractéristiques de rester solidaire au support sur le quelle elle est réalisée, et cela peu importe la méthode du dépôt ou la procédure de réalisation, généralement même après séparation des deux composants, car le support a une très grande influence sur les propriétés structurales de la couche déposée, par conséquent il est très nécessaire de prendre en considération ce fait majeur lors de la conception. Ce qui nous amène à conclure qu'une couche mince d'un matériau pourra avoir des propriétés physiques sensiblement différents à un substrat monocristallin de silicium ou bien un isolant amorphe. Une couche mince est donc anisotrope par construction [28, 44].

Les cellules photovoltaïques à base de couches minces sont considérées comme des cellules de deuxième génération vu qu'elles font suite aux cellules en silicium cristallin classiques. L'utilisation de cette technologie de couche mince ou Thin-film en anglais, a un grand intérêt pour le photovoltaïque, car elle nécessite beaucoup moins de matériaux pour la fabrication d'une cellule contrairement aux cellules classiques ce qui la rend intéressante et prometteuse, car on a besoin que de quelques microns d'épaisseur de matériaux

photosensible pour pouvoir absorber l'essentiel du rayonnement solaire, en plus les méthodes de fabrications sont beaucoup moins coûteuses.

Aujourd’hui, on utilise trois des technologies les plus développées dans la réalisation des couches mince qui sont : le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et le disélénium de Cuivre Indium (CIS).

Cependant la technologie du silicium amorphe est la plus utilisée dans le marché du photovoltaïque avec un taux de plus de 4.7% par contre, on trouve que le Tellure de Cadmium occupe seulement 1.6% du marché tandis que le disélénium de Cuivre Indium ne dépasse pas les 0.5% du marché vu qu’elle vient récemment d’apparaître sur le marché commercial et cela depuis le développement de l’hétérojonction sulfure de Cuivre Cadmium (CuS/CdS), qui fut le premier système photovoltaïque en couche mince développé [14].

Parmi les nombreux avantages que les couches minces offrent à la technologie du photovoltaïque, on peut citer :

- Elles ont des forts coefficients d’absorption vue leur gap qui est proche de l’idéal grâce à leur bande interdite directe.
- Elles sont stables chimiquement et thermiquement.
- Elles sont très économiques puisqu’on aura besoin que de quelques micromètres d’épaisseur pour une absorption totale de la lumière incidente. Par conséquent, elles permettent aussi l’utilisation des matériaux rares ou coûteux.
- De nombreuses techniques de fabrication avec une variété de méthode de dépôt et qui nécessite un minimum de temps ce qui réduit relativement le coût de fabrication.

- Leurs flexibilités à être déposé sur plusieurs supports verre, substrat léger...ce qui les rendent intéressantes pour de nombreuses applications.

À voir tous ces avantages que les couches minces pourraient offrir au photovoltaïque, cette technologie de couche mince paraît prometteuse et permet d'apporter les solutions à de nombreux problèmes rencontrés dans les cellules photovoltaïques standard telles que :

- ❖ Les interfaces défectueuses (entre les mailles des matériaux).
- ❖ Les matériaux inhomogènes et leurs compositions désordonnées.
- ❖ L'instabilité des films ainsi que la toxicité de certains composants [45].

3.3 Le silicium amorphe

Le (a-Si) a été le premier matériau couche mince sur le marché sauf qu'au début il n'était pas appliqué dans le domaine du photovoltaïque, mais plutôt réservé à des petites consommations pour des produits telles que les montres ou les calculatrices. Par ailleurs, les cellules à base de silicium amorphe sont généralement constituées d'une fine couche de silicium de quelques micromètres déposée sur un support synthétique en verre, ces couches de quelques micromètres sont non seulement assez suffisantes pour absorber le rayonnement essentiel pour la conversion, mais en plus elles ont l'avantage de mieux réagir à la lumière ce qui leurs permettent d'avoir de meilleures performances [46].

L'inconvénient majeur pour cette technologie est que le rendement de conversion est limité par la structure amorphe à cause du taux de recombinaison élevée, mais suite à la découverte de la possibilité de doper ce matériau, Carlson et Wronski ont démontré que le Silicium amorphe a de très intéressantes propriétés optoélectroniques et ont obtenu des rendements de 2%, qui ont été améliorés par la suite à 5%. Les résultats obtenus ont

provoqué un grand intérêt pour la recherche non seulement dans les piles solaires à base de Silicium amorphe, mais aussi dans différentes applications [47].

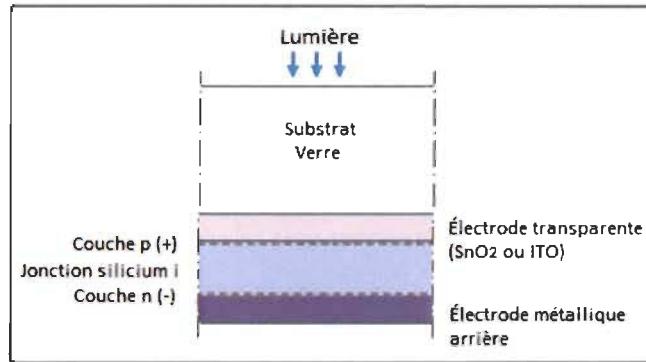


Figure 3. 1 Structure d'une cellule à base de silicium amorphe de type PIN [47].

Actuellement, leurs rendements sont de l'ordre de 5 à 10% avec une production de courant relativement bonne, cependant, le rendement obtenu par cette technologie est toujours considéré comme insatisfaisant et peu stable, c'est pourquoi les recherches menées aujourd'hui se focalisent sur la stabilité des cellules et l'amélioration de leurs performances, par ailleurs, pour avoir une meilleure stabilité il faut pouvoir réduire la quantité d'hydrogène qui a un grand impact dans la détermination des propriétés optoélectroniques de ces matériaux. Mais cela est faisable seulement à une faible vitesse de dépôt. La méthode qui semble la plus qualifiée pour cette réalisation est une méthode développée en laboratoires et qui consiste au dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma à très haute fréquence (VHFPE-CVD) [48].

3.3.1 Méthode de dépôt

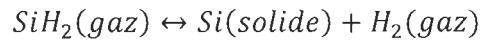
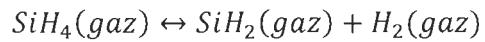
On trouve plusieurs méthodes de dépôt de silicium en couche mince dont on peut citer l'évaporation thermique, la pulvérisation cathodique et les méthodes basées sur l'épitaxie, par contre les plus utilisées sont celles de type CVD c'est-à-dire les techniques basées sur la

décomposition chimique en phase gazeuse, en bref le terme «CVD» veut dire toute technique de dépôt de film à partir de la décomposition des substances en phase gazeuse [47].

Cependant, la plus simple méthode pour obtenir du silicium amorphe en couche mince est la méthode du dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radio fréquence ou (PECVD) Plasma-Enhanced Chemical Vapor déposition, la synthèse de cette méthode est de déposer des couches de silicium amorphe sur des surfaces pouvant aller jusqu'à quatre mètres à basse température allant de 100°C à 300°C carrés avec une vitesse proche du nanomètre/minute.

Les gaz utilisés dans cette technique sont généralement le silane (SiH_4), l'hydrogène, le diborane (B_2H_6) et la phosphine (PH_3).

Dans cette technique, il y'a un champ électrique alternatif d'une fréquence de 13.56 MHz qui permet d'avoir le gaz réactif ionisé via la formation d'un plasma due Au champ électrique. Où la dissociation du silane dans le plasma se donne comme suit:



Les produits résultants sont des ions d'hydrures de silicium et le matériau obtenu est hydrogéné, car ce dernier ne se diffuse pas [14].

De nombreuses recherches ont démontré que l'ajout de Germane (GeH_4) ou du méthane au silane a permis d'obtenir des alliages avec des gaps variant de 1 à 2.2 eV, ce qui est intéressant pour la réalisation des cellules multi spectrales [49].

3.3.2 *Structure et réalisation de la cellule amorphe*

La cellule amorphe a une structure de type p-i-n ou bien n-i-p qui se diffère de la structure p-n ou n-p trouvé dans les cellules cristallines par la couche intrinsèque i.

Cette cellule est réalisée, en premier lieu par le dépôt de la couche fenêtre de type p d'une dizaine de nanomètres sur l'oxyde conducteur transparent (TCO), le choix de ce dernier est généralement lié aux propriétés physiques et optoélectroniques des couches n et p, mais l'idéal et d'avoir un TCO avec une grande transparence optique et une faible résistance afin d'avoir moins de pertes résultantes du photo courant d'absorption dans la couche n. Ensuite, le dépôt d'une couche intrinsèque ne dépassant pas 300 nm de silicium amorphe hydrogéné qui constitue la région absorbeur de la cellule, après vient le dépôt de la couche de type n. Les couches p et n vont créer le champ électrique, ces derniers ont pour but de collecter les porteurs photo générés dans la couche intrinsèque.

Enfin, on dépose une couche métallique qui va être le contact électrique avec la couche n, cela se fait soit par pulvérisation cathodique ou évaporation thermique [47, 49].

Afin d'obtenir de meilleures performances pour des cellules en Silicium amorphe, l'idée suggérée par les chercheurs est de superposer les jonctions grâce des architectures double et triple jonction dans une même cellule avec un gap légèrement différent pour pouvoir absorber une plus grande quantité du rayonnement solaire [47].

3.3.3 *Modules à multiples jonctions*

Les recherches menées dans le but de minimiser la dégradation des cellules sous la lumière ont fini par aboutir en donnant une nouvelle architecture au dispositif, il s'agit des cellules à jonction multiples; en effet on double ou on triple le nombre des jonctions en

utilisant des matériaux à gap différents tout en réduisant l'épaisseur des couches utilisées.

Non seulement cette architecture a permis de trouver la solution à un inconvénient majeur, mais en plus elle la particularité d'avoir un rendement quantique étendu dans le rouge. Cependant, on trouve des complications lors de réalisation de ce dispositif comme avoir de forte recombinaison entre les mailles des matériaux afin d'éviter des interfaces défectueuses et aussi un bon appariement des courants vu que les cellules sont empilées en séries [47].

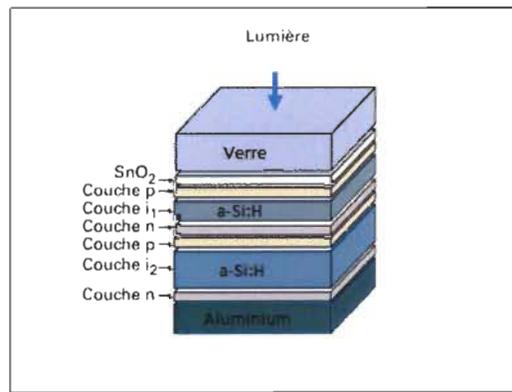


Figure 3. 2 Module d'une cellule à jonction multiple [47].

En utilisant cette architecture de modules à jonctions multiples «Solares Millennia» a réussi à obtenir un rendement stables de 6.95% sur une surface de 8052 cm^2 , les épaisseurs optimales pour la jonction tandem était de 60nm pour la couche i_1 et 300 nm pour la couche i_2 [47].

Le rendement le plus élevé dans la technologie du silicium amorphe a été réalisé en laboratoire par United Solar qui a été de 13%, obtenu par une cellule à triple jonction de petite surface, mais malgré le faible rendement obtenu on donne toujours beaucoup d'importance à cette filière de silicium amorphe dû à son faible coût de fabrication [50].

L'amélioration de ces performances ainsi que la réduction du coût de silicium ont fait qu'actuellement cette technologie domine l'industrie du photovoltaïque en couche mince.

3.4 Le silicium poly cristallin en couche mince

Les cellules solaires à base de silicium est la technologie la plus ancienne et la plus répondué dans le domaine du photovoltaïque vu la disponibilité du silicium. Cependant, les rendements obtenus par des cellules solaires à base de silicium microcristallin avec des grains ayant une taille inférieure à 1 mm étaient insuffisants et considérés comme faibles environ 10%, d'ailleurs c'est pourquoi les recherches se sont dirigées vers un autre type de silicium nommé silicium poly cristallin. L'utilisation de ce dernier a permis d'obtenir un rendement de l'ordre de 15% [50].

C'est seulement en 1998, après le succès d'Astropower lors de sa réalisation d'une fabrication pilote de cellule en couche mince déposée sur un substrat de céramique (procédé silicon film) a donné un rendement de 16.6% que le silicium poly cristallin a fait l'objet de nombreuses recherches en Europe et aux états unis [51].

Cette technologie se base sur le dépôt d'une couche mince de poly cristallin d'une épaisseur allant de 10 à 40 μm sur un substrat de silicium, de céramique ou de métal.

Les cellules solaires à couche mince à base de silicium poly cristallin ont généralement des couches actives très minces allant de 2 à 5 μm ce qui implique moins de matériaux lors de la réalisation et par conséquent un faible coût, par ailleurs le poly cristallin peut être déposé sur des substrats de céramique ou de métal beaucoup plus économique.

Ce genre de cellules est réalisé par des procédés à température très élevée comme le dépôt à vapeur chimique (CVD) en phase liquide épitaxie (LPE) et Zone de fusion de cristallisation (ZMR) [50, 52].

D'autre part, il est évident que la température de procédé de dépôt à une très grande influence sur le contrôle de cristallinité du matériau utilisé, d'ailleurs il est même recommandé d'utiliser la température maximale supportée par le substrat lors du dépôt.

Cependant, les techniques les plus utilisées pour la réalisation de ce genre de cellule à haute température sont le dépôt chimique en phase vapeur (VCD) et la croissance par épitaxie en phase liquide (LPE) à cause de leurs utilisations sur un vaste choix de substrat, toutefois le choix de substrat à un rôle fondamental dans les performances de la cellule dépendamment aux propriétés de ce dernier et aussi dans la détermination de la qualité cristallographique de la couche poly cristalline déposée. En outre, les impuretés du substrat affectent la taille des grains du silicium pendant le procédé de dépôt à haute température [52].

3.5 Le Tellure de cadmium (CdTe)

L'avantage de ce matériau se démarque dans sa forte absorption grâce à son grand coefficient d'absorption, qui est capable d'absorber plus que 80% des photons incidents sur une couche de quelques micromètres seulement, ce matériau est aussi doté d'un gap de 1.45 eV qu'on peut considérer comme idéal, en plus il est stable chimiquement. Cette technologie est considérée comme assez développées pour l'industrie, mais son développement est plutôt limité à cause de deux inconvénients rencontrés dont le premier est la grande résistance électrique des films CdTe de type P ce qui affecte directement le

rendement dû aux pertes résistives résultantes, le deuxième inconvénient est la toxicité de cadmium vu qu'il est un métal polluant. Néanmoins, cette technologie de tellure de cadmium CdTe occupe la majorité du 1% restant et devrait connaître une grande croissance commerciale à l'avenir particulièrement pour les batteries au cadmium utilisant l'hétérojonction tellure de cadmium(CdS) [53].

Dans la figure ci-dessous un prototype de cellule CdTe est illustré afin de connaître les différentes couches constituant une cellule CdTe classique.

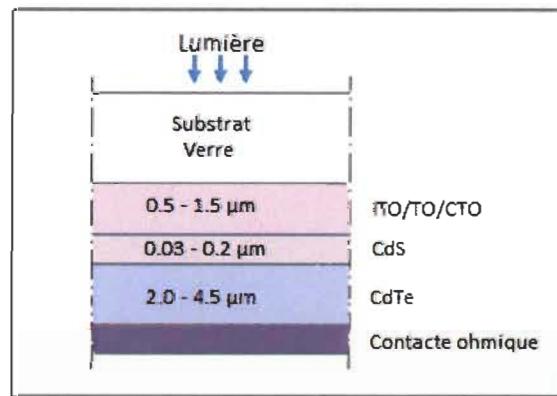


Figure 3. 3 Prototype de cellule CdTe classique [47].

En 1964 fut la découverte des premières jonctions CdTe/CdS/ SnO_2 /Verre en couches minces, huit ans après, le premier module CdS/CdTe est apparu sur le marché, pendant plusieurs années après son apparition, ce dernier était considéré comme une approche prometteuse et la solution tant attendue pour le photovoltaïque. CdTe avait le profil du matériau idéal pour les cellules en couches minces pour les raisons qu'on a déjà cité ci-dessus et qui sont :

- Le grand coefficient d'absorption qui permet l'utilisation des matériaux impurs.
- La valeur idéale du gap $E_g=1.45\text{eV}$.

- Sa simple réalisation vu les nombreuses méthodes de dépôt existantes [47, 53, 54].

3.5.1 *L'hétérojonction CdS-CdTe*

L'hétérojonction se fait grâce à la couche de CdS de type n qui a une bande interdite de 2.4 eV, cette dernière joue le rôle d'une fenêtre d'entrée de la lumière et donne l'hétérojonction CdS-CdTe à la fois grâce à son gap très élevé [54].

L'épaisseur de la couche fenêtre est généralement de l'ordre du dixième de micromètres.

Le procédé de fabrication se fait sous une haute température qui dépasse les 400C, une fois au-dessus de 450C le composé condense et devient un solide stable, dans ce genre de procédé les films sont de type P dû à un manque de Cd. Les mêmes techniques sont utilisées dans le dépôt de CdS et CdTe. La phase finale consiste à la formation de l'électrode arrière.

Une fois exposée à la lumière, les porteurs commencent à se générer dans la zone de charge d'espace du CdTe de type P et ainsi la collecte des porteurs se fera par le champ non par la diffusion.

La couche CdS est considérée comme une couche morte vu que le CdS dopé n'a presque pas de zone de charge d'espace ainsi que la durée de vie des porteurs est très limitée. D'ailleurs c'est pourquoi il est préférable de réduire l'épaisseur de la couche CdS au maximum afin de minimiser les pertes d'absorption optique [47].

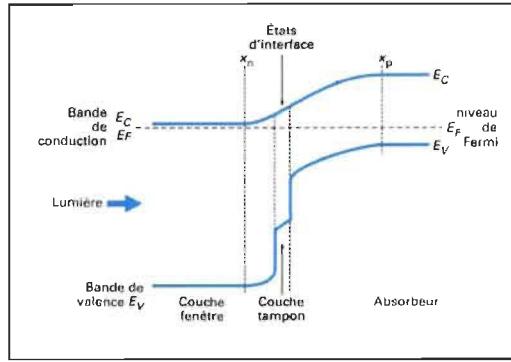


Figure 3. 4 Schéma des bandes dans l'hétérojonction CdS-CdTe [47].

3.5.2 Méthodes de dépôt

De nombreuses recherches ont été menées sur la formation de la couche absorbante en CdTe, vu que cette filière était considérée comme la filière qui représentait l'approche la plus prometteuse pour les cellules photovoltaïques de nouvelle génération, de là on trouve plusieurs méthodes de dépôt. Parmi ces méthodes, on va citer les techniques envisagées pour avoir une bonne cristallinité ainsi qu'une grande mobilité d'électron, ces techniques sont : Dépôt Chimique en Phase de Vapeur (CVD); Dépôt Physique en Phase de Vapeur (PVD); Condensation/sublimation (S); Sublimation en Espace Clos (CSS); Sérigraphie (SP); Électrodéposition (ED) et Vaporisation Chimique (CS), toutes ces méthodes ont la particularité d'avoir une vitesse de dépôt très élevée et bien sûr une qualité raisonnable. Cependant, les méthodes CCS ont les plus grandes vitesses de dépôt qui atteignent $1\mu\text{m/s}$ (First Solar) [55].

3.5.2.1 Technique de sérigraphie

Cette méthode se distingue des autres par son extrême simplicité, la procédure de fabrication passe par trois étapes essentielles :

- En premier lieu, on prend une couche d'Ag-In déposée généralement sur un support de verre, après avoir fait la sérigraphie de cette couche, on va prendre une pâte de CdS et la faire cuire à 690°C sous atmosphère d'azote puis on fait une autre sérigraphie .
- L'étape suivante est de prendre une pâte de CdTe et la faire à 620°C seulement, mais toujours sous atmosphère d'azote, une fois la pâte prête on fait la sérigraphie.
- La dernière étape consiste à faire la sérigraphie d'une pâte de carbone ensuite on appliquera une autre sérigraphie sur une couche d'Ag cuite pour former la grille positive face arrière.

Les cellules réalisées par cette méthode ont donné un rendement de 8.9% sur une surface de 1200 cm^2 , ce qui est jugé relativement bon par rapport à la simplicité de la méthode utilisée [47, 55].

3.5.2.2 Technique d'électrodéposition

Cette technique est beaucoup plus compliquée que la précédente, premièrement on dépose par CVD un verre recouvert d'oxyde d'étain (SnO_2) en très grande série. Une couche de CdS est déposée chimiquement par CBD avec de l'ammoniaque qui complexe les ions Cd^{2+} et de la thio-urée comme source des ions soufre dont l'épaisseur optimale est approximativement 80 nm.

Généralement, les paramètres du dépôt pour cette méthode sont faciles à contrôler contrairement à la couche de CdTe qui représente l'absorbeur et qui est la partie la plus compliquée, la plus lente et la plus difficile dans cette procédure, c'est une voie électrochimique contenant les ions Cd^{2+} et $HTeO_2^+$ qui a besoin d'une injection de courant

d'une longue durée et de façon homogène sur toute la couche suivie d'un recuit à 400°C.

Y'a plusieurs façons d'obtenir le contact ohmique, mais elles ont toutes le même principe d'enrichir la couche en Te. On utilise le Cu suivi par un dépôt de Ni ou bien on peut utiliser le carbone suivi par une évaporation d'Al et de Ni. On utilise des rayures laser pour faire les interconnexions des cellules. Les cellules obtenues par cette méthode ont plutôt une durée de vie plutôt limitée, après avoir effectué des tests on a remarqué certaine dégradation de la résistance série et qui a affecté à son tour le rendement énergétique [43, 47].

3.6 L'alliage Cuivre-Indium/Gallium-sélénium

Cette technologie de Cu(In,Ga)Se et aussi notée CIGS n'est que récemment apparue sur le marché commercial doté de plusieurs avantages et qualités dont les excellentes propriétés d'absorption, mais ce qui rend cette technologie de couche mince encore plus intéressante c'est plutôt sa particularité d'être stable sous rayonnement. Néanmoins, on trouve comme même un petit problème vu que l'indium est un matériau rare dans la nature, ce qui peut rendre le coût de ce dernier extrêmement cher, ou bien poser des problèmes d'approvisionnement. N'empêche, la technologie des couches minces à base de Disélénium de Cuivre Indium CuInSe (CIS) et Cu(In,Ga)Se₂(CIGS) est considérée comme une des plus efficaces et des plus prometteuses pour la production des modules en films minces [56].

Un des plus grands intérêts que ce genre de cellule peut offrir est la possibilité de pouvoir adapter le gap énergétique du matériau et cela en ajustant le rapport atomique In/Ga afin d'obtenir une absorption optimale du spectre solaire. En outre, l'élargissement de la bande interdite donné par l'utilisation de l'alliage CuInSe₂ et CuGaSe₂ peut ainsi faire varier le gap de 1.02 eV à 1.68 eV respectivement [54].

Actuellement, la technologie CIGS présente le meilleur rendement jamais obtenu auparavant par une cellule photovoltaïque à base de couches minces, c'est-à-dire un rendement qui peut dépasser les 20%, les meilleurs rendements obtenus en laboratoires qui furent publiés atteignent 19.2% avec une stabilité record de plus de 10 ans [57].

Les modules solaires de Cu(In,Ga)Se₂ sont apparus pour la première fois sur le marché en 1998. Cependant, cette réussite a été obtenue après de nombreuses recherches, tout a commencé avec Hahn en 1953 par la découverte du CulnSe, mais c'est seulement en 1974 que ce matériau a été utilisé comme un matériau photovoltaïque, alors qu'il a fallu attendre jusqu'à 1984 pour avoir un rendement de plus de 10% obtenu par Boeing Corps, qui a été amélioré par la suite par Arco Solaire pour atteindre un rendement de 14.1% en 1987, pour atterrir à la fin dans les industries solaires de Siemens ou Shell Solar qui ont entamé la production industrielle [53].

Le Disélénure de Cuivre Indium/Galium (CIGS) est généralement constitué d'un empilement de couches minces, d'abord on a une première couche de Mo qui constitue le contact arrière suivi d'une couche absorbante de type P de CIGS enveloppée par une très fine couche de CdS ou de ZnS de type N, d'où est la jonction active du matériau, cette dernière est recouverte par une couche transparente TCO ou ZnO et qui assure la liaison électrique, le tout déposé sur un substrat de verre ou de polymère comme on peut le voir illustré sur les deux figures ci-dessous.

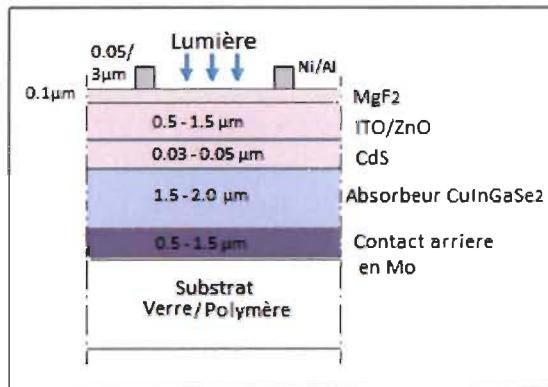


Figure 3.5 Schéma des différentes couches constituant une cellule CIGS classique [47].

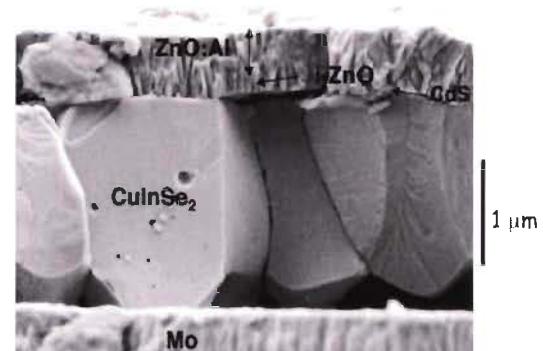


Figure 3.6 Vue au microscope d'une cellule à base de CuInSe₂ [56].

Les cellules CIS sont réalisées à partir d'un matériau composé de type I-III-VI et de structure chalcopyrite, ils sont plus efficaces que les cellules CdTe, mais beaucoup plus complexes à fabriqué, ils représentent environ 0.5% du marché mondial.

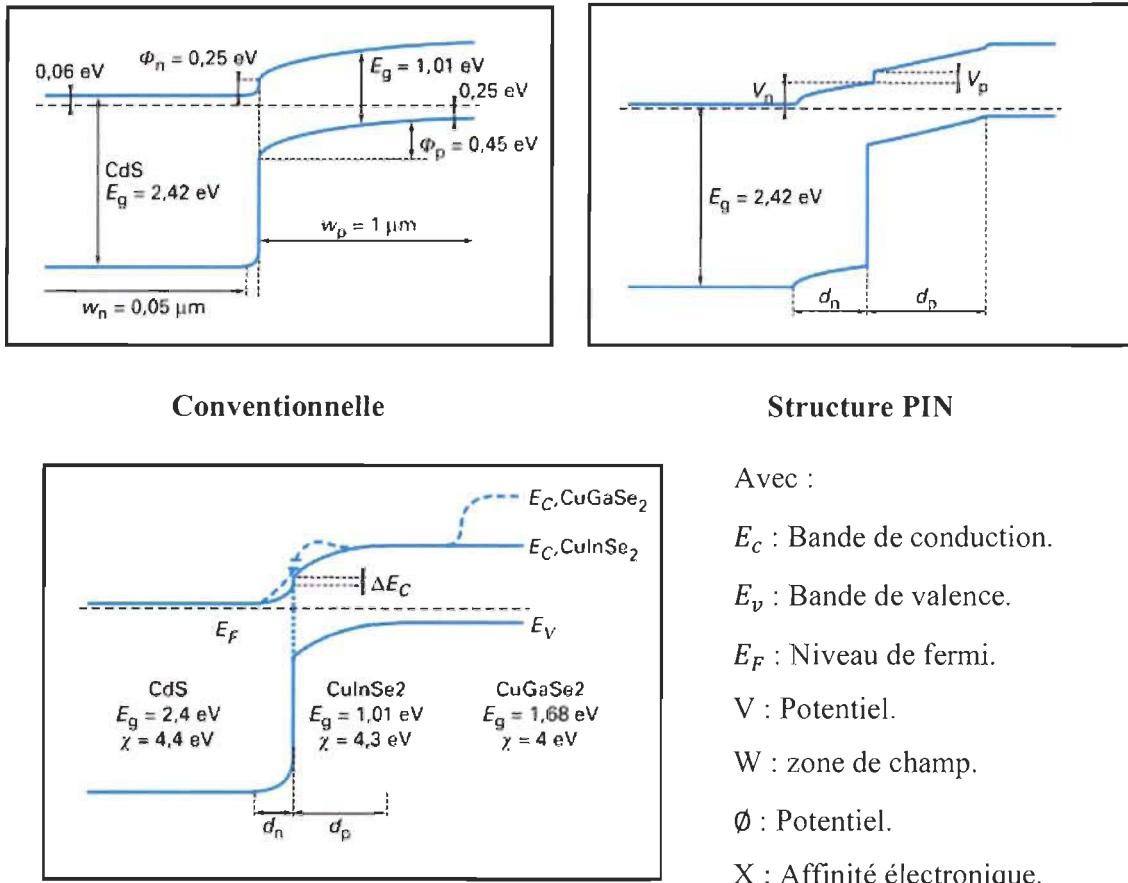
Cependant le rendement obtenu par cette technologie reste toujours insatisfaisant et peu stable, c'est pourquoi les recherches menées aujourd'hui se focalisent sur la stabilité des cellules et l'amélioration de leurs performances. Les nombreuses recherches effectuées avaient pour but d'avoir une meilleure stabilité en réduisant la quantité d'hydrogène qui a un grand impact dans la détermination des propriétés optoélectroniques de ces matériaux [56].

3.6.1 Hétérojonction CIS-CdS

Le rendement théorique de l'hétérojonction n-CdS-p CuInSe₂ est de 25% approximativement. Cependant, les rendements obtenus aux laboratoires se situent autour de 15%, mais au cours des dernières années les chercheurs ont pu accomplir des progrès considérables en partant de l'idée d'un certain chercheur qui a utilisé du verre ordinaire

contenant du sodium, ce dernier a trouvé des meilleurs rendements. D'ailleurs, après cette découverte plusieurs laboratoires ont confirmés l'influence bénéfique du sodium contenu dans le verre sur les propriétés électroniques du CIS ainsi que sur sa morphologie [47].

Les améliorations obtenues sont au niveau de l'élargissement de la bande interdite du fait d'utiliser l'alliage du type CuGaSe₂ et CuInSe₂, tandis que le coefficient d'absorption est à peu près le même que celui du Silicium cristallin $E_g=1.02\text{ eV}$, mais il est beaucoup plus fort dans la gamme 1.1eV à 2.6eV, ce qui donne une épaisseur d'absorption de 1 à 2 μm [58].



Conventionnelle

Structure PIN

Avec :

 E_c : Bande de conduction. E_v : Bande de valence. E_F : Niveau de fermi.

V : Potentiel.

W : zone de champ.

 \emptyset : Potentiel.

X : Affinité électronique.

Cellule modifiée par addition par CuGaSe

Figure 3.7 Structure de bande de la cellule CIS/CdS [47].

La figure ci-dessus représente différentes structures de bandes.

À présent, la majorité des problèmes qui sont liés à la production ou bien au changement d'échelle ont été corrigés et les rendements obtenus sur des grands modules atteignent les 14% [47].

Le meilleur rendement obtenu aux laboratoires est de 19.2% avec une cellule chalcopyrites ternaires de type Cu(Ga,In)Se2 au NREL [57].

3.6.2 *Méthode de dépôt*

Il existe plusieurs méthodes de dépôt pour le CIS, dont on va citer: la co-évaporation des trois éléments; la pulvérisation cathodique de cibles prés déposées; la sélénisation de films; l'irradiation laser d'un empilement de films; la sérigraphie; la technique de pulvérisation par spray et l'électrochimie.

3.6.2.1 **Co-évaporation**

Les meilleurs rendements atteints sont obtenus par cette méthode de Co-évaporation, le principe de cette méthode est basé sur l'évaporation thermique simultanée des composants Cu, In, Ga et Se, ces éléments sont chauffés à différents degrés le Cu à 1360°C, l'In à 900°C, Ga à 990°C et le Se à 320°C déposés sur un substrat de verre ordinaire exigeant lors du dépôt une température de 550°C dans une première phase puis une température de 450°C dans la deuxième phase du processus.

Le dispositif expérimental est équipé de cinq sources d'évaporation, dont trois pour le cuivre, l'indium et le gallium, les deux sources restantes sont pour le silicium. Ces deux sources-là sont constituées d'un creuset en céramique enrobé dans un filament en

tungstène. Le système est muni d'un spectromètre d'absorption atomique afin de contrôler le taux de chaque source. La composition du matériau correspond à son taux d'évaporation.

Par ailleurs, le processus le plus utilisé dans cette technique de Co-évaporation est celui de trois étapes; contrairement au premier la composition des trois éléments l'In, Ga et Se se fait à des températures relativement basses, complété par le dépôt de deux couches de CdS afin d'obtenir une composition riche en In [47, 59].

3.6.2.2 Sélénisation

Cette technique de sélénisation est très utilisée, d'ailleurs c'est avec cette technique-là que les premiers modules photovoltaïques à grande surface ont été réalisés. Ce procédé est basé sur deux phases essentielles d'abord la séparation du dépôt puis la formation du composé en passant par deux différentes étapes.

L'absorbeur est réalisé par la sélénisation des précurseurs métallique dans le H_2Se , suivi d'un recuit des couches empilées sous atmosphère de Sélénum.

L'avantage de cette méthode tient au fait qu'elle a supériorité du dépôt des matériaux sur des grandes surfaces.

Aujourd'hui, les cellules solaires les plus commercialiser dans le monde sont réalisées à base de $Cu(In,Ga)Se$, en utilisant un procédé de sélénisation amélioré par la société «Shell solar Industries» [43, 47].

3.6.2.3 Pulvérisation réactive par spray

Il se trouve que cette méthode est vraiment simple à réaliser, car la structure est la même que la précédente avec des nouvelles sources; le chlorure d'indium, le chlorure cuivreux et

la diméthylsélénio-urée, d'abord le dépôt de deux couches de CuInSe₂ en suite les deux couches de CdS, malheureusement cette technique fut abandonnée vu qu'elle n'a pas donné des résultats concrets, le meilleur rendement obtenu atteignait à peine les 4% [47].

3.6.2.4 Dépôt électrolytique

Dans ce procédé d'électrolytique on garde la même structure de cellule que celle utilisée dans la méthode de Co-évaporation. La seule différence entre les deux méthodes est que l'absorbeur est réalisé à partir d'une combinaison issue d'un dépôt électrolytique, qui va être recuit par la suite sous pression de sélénium.

Des matériaux ayant un gap allant de 1 à 1.6 eV ont été réalisés à base de cette technique, leurs rendements théoriques ont atteint les 11.3%. Cependant, en pratique le meilleur rendement obtenu était seulement de 6% [43, 47].

3.6.2.5 L'Épitaxie par Jets Moléculaires

Cette technique consiste à déposer les couches par épitaxie sur un substrat bien chauffé sous ultravide, c'est à dire on obtient des flux atomiques par la vaporisation d'un matériau comme le gallium par exemple puis on prend sa vapeur et la déposer sur un substrat. Le déroulement sous ultra vide ou bien à très basse pression a pour objectifs d'éviter toute sorte de contamination entre les espèces réactives, trouvées dans des cellules Knudsen et d'éventuel gaz résiduel, la très basse pression permet aussi le contrôle à l'échelle atomique. La croissance de ces couches minces très complexe se fera couche après couche sous une basse température qui ne dépassera pas 900°C, contrairement aux précédentes techniques qui nécessitaient une haute température. Cependant, cette méthode à une faible vitesse de croissance de 2 $\mu\text{m}/\text{h}$ max [56, 60].

3.7 Conclusion

Ce troisième chapitre a été réservé à la technologie photovoltaïque en couche mince.

D'abord, on a parlé de l'intérêt de cette technologie pour les applications photovoltaïques.

Après, on a cité les trois principales filières constituants cette technologie qui sont à base de : Silicium, Tellurure de cadmium et l'alliage Cuivre-Indium/Gallium-sélénium, ainsi que les différentes méthodes et techniques élaborées pour la réalisation de ces couches minces comme l'évaporation, pulvérisation, l'épitaxie, sérigraphie,...etc.

On a aussi évoqué le principe et les caractéristiques d'une hétérojonction pour ces couches minces, afin de mieux comprendre le rôle de cette dernière dans l'obtention d'un bon rendement énergétique, vu qu'elle a un rôle capital à minimiser les pertes optiques et électriques qui nous permettent ainsi d'avoir un meilleur rendement. Dans le chapitre qui va suivre on va faire une étude sur le matériau ou l'alliage InGaN avec lequel on va créer notre modèle de cellule solaire à base de cette technologie de couches minces pour faire notre simulation qui sera présentait au dernier chapitre.

Chapitre 4 - Étude du matériau InGaN

4.1 Introduction

Les nombreuses recherches menées sur les matériaux semi-conducteurs pendant plusieurs années, ont été largement récompensées par la découverte de structure à couches semi-conductrices très minces avec de meilleures propriétés physiques et optiques. L'arrivée de ces fines couches a révolutionné plusieurs domaines technologiques comme l'électronique et l'optoélectronique.

Les matériaux semi-conducteurs les plus connus sont le Silicium (Si) et le germanium (Ge) qui sont des semi-conducteurs monoatomiques, car ils sont composés d'un seul atome identique. Nous avons aussi des alliages semi-conducteurs comme le nitrate de gallium (GaN). Ce dernier est composé de deux atomes différents, ce qui fait de lui un matériau semi-conducteur de structure (III-V) à cause de la répartition des deux éléments dans le tableau périodique des éléments, c'est-à-dire Ga est un élément de la colonne (III) et N de la colonne (V) du tableau périodique [61].

Dans la dernière décennie on accordait une très grande importance aux matériaux semi-conducteurs de la famille (III-V) vu leurs propriétés et leurs potentiels pour les cellules solaires. Particulièrement, l'InGaN qui fait partie de cette famille des matériaux semi-conducteurs. Ce derniers a été fortement étudié spécifiquement pour son gap modulable qui peut couvrir la majorité du spectre solaire, ainsi obtenir le plus haut rendement possible pour un coût vraiment raisonnable [61].

Par ailleurs, nous avons déjà vu dans les chapitres précédents que les meilleurs rendements pour les cellules photovoltaïques obtenus jusqu'à aujourd'hui sont à base de matériaux ayant une structure (III-V). De ce fait nous allons présenter dans ce quatrième chapitre l'alliage InGaN (Nitrate de Gallium-Indium) en passant par une étude de ces caractéristiques et ces propriétés ainsi qu'un état d'art sur ce dernier avec les concepts des cellules solaires à hétérojonction.

4.2 Historique de (InGaN)

Le GaN fut utilisé pour la première fois par un certain Warren. B Johnson en 1932 lors de son étude sur la structure cristalline du GaN sous des conditions normales. Mais c'est seulement à la fin des années 80 quand on a commencé à réellement l'utiliser pour des diodes électroluminescentes et des détecteurs dans l'ultraviolet [62].

Par contre l'InN fut utilisé pour la première fois en 1972 dans un procédé de pulvérisation radiofréquence. Malheureusement, les résultats obtenus ont montré que ce matériau avait une mobilité électronique très réduite. D'un autre côté, ce matériau avait l'avantage d'avoir un très grand seuil d'absorption de 1.9 eV qui lui permet d'avoir une grande absorption dans l'infrarouge. Bizarrement ce dernier n'avait pas une émission lumineuse proportionnelle à son gap d'énergie contrairement au matériau GaN [63]. Cependant, l'utilisation de la technique de dépôt chimique en phase vapeur a permis de produire des couches de InGaN et AlInN améliorés au niveau de la luminescence. Mais c'est seulement une fois quand on a utilisé la technique d'épitaxie par jet moléculaire qu'on a réussi à obtenir une meilleure qualité cristalline. En outre, il a fallu attendre plusieurs années pour obtenir des films de haute qualité disposant d'un gap d'énergie qui couvre quasiment tout le spectre solaire par Oussama et al, en 2002 [64].

Actuellement, ce genre de matériau est devenu un sujet de recherche de haute importance.

4.3 Description de (InGaN)

Le nitrate de gallium indium est formé à partir de l'association de deux éléments faisant partie de la colonne III du tableau de Mendeleïev avec un troisième élément de la colonne V c'est-à-dire gallium (Ga), l'indium (In) et l'azote (N), on trouve aussi d'autres alliages comme AlGaN le nitrate de gallium aluminium ou nitrate de Bore (BN), etc.

Ces matériaux sont divisés en deux différentes familles soit zinc-blinde ou bien wurtzite selon leur structure cristallographique [65].

4.4 Caractéristique structurelle

4.4.1 *Structure cristalline*

On trouve deux structures différentes; la structure zinc blinde en phase cubique ou bien la structure wurtzite en phase hexagonale. La structure wurtzite est considérée comme la structure des nitrures vu qu'elle est la phase stable dans des conditions ambiantes. Cette dernière est repartie en deux sous réseaux hexagonaux, un pour les atomes du gallium et l'autre pour ceux de l'azote. Cette structure est caractérisée par un paramètre a qui définit la largeur entre deux liaisons, un paramètre c qui définit la hauteur de la maille et un paramètre interne u donné par le rapport a/c .

Tableau 4- 1 Paramètres structuraux des matériaux massifs Gan et InN [66].

Matériau	a (Å°)	c (Å°)	u
GaN	3.189	5.185	0.376
InN	3.54	5.707	0.377

Cette structure est représentée dans la figure (4.1) où le Gallium est représenté par les grandes sphères et l'azote par les petites.

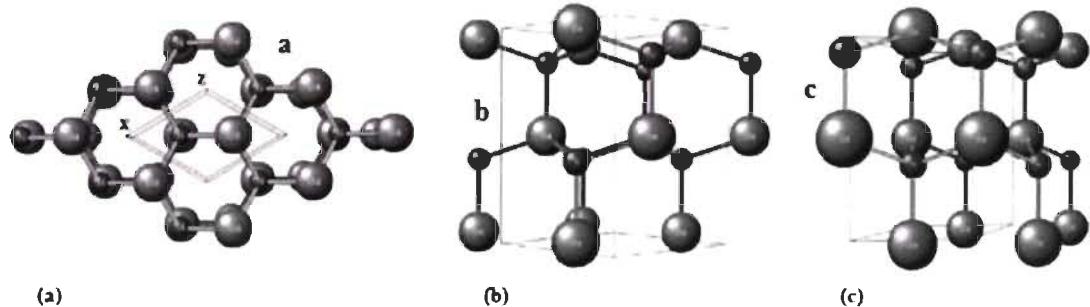


Figure 4. 1 Structure wurtzite pour le GaN selon différentes directions (a) [0001], (b) [1120] et (c) [1010] [65].

Cependant, même si la structure wurtzite est la plus utilisée, il se trouve que la structure zinc-blinde présente des propriétés électriques et optiques plus intéressantes telles qu'une plus forte mobilité ou un meilleur gain optique, mais la production très complexe de cette structure a beaucoup réduit l'utilisation de cette dernière [65].

4.4.2 Propriétés électriques

Les propriétés électriques de n'importe quel matériau sont dues à la différence d'énergie trouvée entre la bande de conduction et la bande de valence. Ces dernières sont composées à leur tour de deux niveaux énergétiques continus qui dépendent des différents niveaux électroniques des atomes, autrement dit la densité d'état du matériau qui varie par rapport aux caractéristiques du matériau et du facteur de température.

La densité d'état de l'alliage InGaN pour la bande de conduction et la bande de valence est donnée par les équations suivantes [67]:

$$N_c = [0.9x + (1 - x) * 2.3] * 10^{18} [cm^{-3}] \quad (4.1)$$

$$N_v = [5.3x + (1 - x) * 1.8] * 10^{19} [cm^{-3}] \quad (4.2)$$

Où : x est la concentration d'indium.

4.4.2.1 Gap d'énergie interdite dans les nitrures

Le gap d'énergie interdite des nitrures est la caractéristique la plus intéressante dans cette famille de semi-conducteur, d'ailleurs c'est la principale raison pour laquelle les recherches sont focalisées là-dessus. Leur gap d'énergie interdite direct les rends uniques dans leurs genres en leurs permettant de couvrir la majorité du spectre solaire, en allant du proche ultraviolet à l'infrarouge, ce qui est vraiment prometteur pour des applications photovoltaïques ou bien de LEDs grâce à la quasi-conversion ou l'émission de lumière.

Le GaN a un gap direct de 3.39eV à la température de 300K et une bande de valence divisée en trois niveaux d'énergies créés par les interactions spin-orbites (E_{so}) et le champ électrique cristallin (E_{cr}). Ce qui est le même cas pour l'InN qui présente lui aussi une bande de valence divisée en trois branches d'énergies avec un gap direct de 0.79 eV à une température de 300K. Ce qui est proche de la valeur recommandée par Vurgaftman et Mayer qui est de 0.78 eV, calculée à 0K [68, 69]. Les diagrammes de bande théorique pour GaN et InN sont illustrés dans les deux figures (4.2) et (4.3) respectivement.

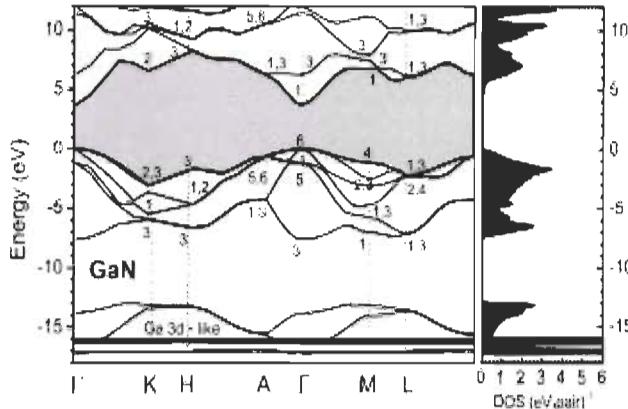


Figure 4.2 Diagramme de bande GaN

calculé avec la théorie de structure électronique des quasi-particules [70].

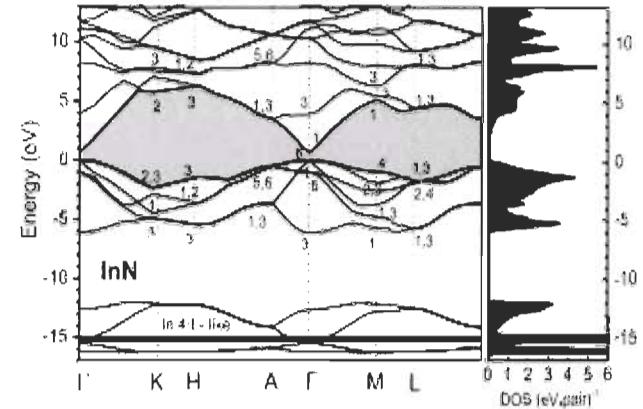


Figure 4.3 Diagramme de bande InN

calculé avec la théorie de structure électronique des quasi-particules [70].

Où les densités d'états du GaN et InN sont représentés par les parties droites et les bandes d'énergies interdites par les parties grises. Les nombres représentent les points de haute symétrie en utilisant la notation de Rashba avec les maximums des bandes de valences prisent comme la référence des énergies [70].

4.4.2.2 Expression du gap des matériaux $In_xGa_{1-x}N$

Le gap d'énergie de l'InGaN est calculé en évaluant les paramètres des composées GaN et InN selon la loi de Vegard [68]. Cette loi empirique relie les valeurs des propriétés des mailles de l'alliage à celle des valeurs des propriétés de ses composants. Cette dernière est définie par l'équation :

$$Eg_{InGaN} = x * Eg_{InN} + (1 - x) * Eg_{GaN} \quad (4.3)$$

Cependant, les chercheurs ont démontré qu'il y'a une certaine déviation entre les valeurs trouvées expérimentalement et celles de la théorie à cause de différents facteurs tel que la

taille, le volume, le gap ou la différence électrochimique des éléments constituants l'alliage.

Ainsi l'équation de Vegard s'écrira sous la nouvelle forme suivante :

$$Eg_{InGaN} = x * Eg_{InN} + (1 - x) * Eg_{GaN} - b * x * (1 - x) \quad (4.4)$$

D'où b est une constante introduite dans l'équation afin d'apporter une adéquation avec l'expérimentation appelée paramètre de courbure (en eV) [70].

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

Eg_{InGaN} : Gap d'énergie de l'alliage (eV).

Eg_{GaN} : Gap d'énergie du nitrure de gallium (eV).

Eg_{InN} : Gap d'énergie du nitrure d'indium (eV).

Tandis que le gap d'énergie interdite dépend généralement de plusieurs facteurs physiques comme la température et la pression, donc il est nécessaire de mentionner son évolution en fonction de la température, qui est donnée par l'expression de Varshni suivante [71]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (4.5)$$

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

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

β : Constante associée à la température (K).

Lors du dépôt de cet alliage sur un autre substrat par la technique d'épitaxie, les paramètres de ce dernier vont influencer l'évolution du gap de l'alliage utilisé à cause du changement créé sur la structure de la couche épitaxie. Cela est dû à une différence de coefficient d'expansion qui va entraîner une dépendance du gap en fonction de la pression, exprimé par l'équation [72]:

$$E_g(P) = E_g(0)gP + dP^2 \quad (4.6)$$

Où :

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

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

P : Pression (Kbar).

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

Tableau 4- 2 Évolution du gap de GaN et InN en fonction de la température [73].

	Matériaux	α (eV.K $^{-1}$)	β (K)	$E_g(0K)$ (eV)	$E_g(300K)$ (eV)
Vurgaftman	GaN	0.909	830	3.51	3.44
Mayer	InN	0.245	624	0.78	0.75
Bourgov	GaN	0.77	600	3.47	3.39
Wu	InN	0.41	454	0.69	0.64

Tableau 4- 3 Évolution du gap de GaN et InN en fonction de la pression [73].

	Matériaux	g (eV/kbar)	d (eV/kbar)	$E_g(0)$ (eV)	$E_g(3)$ (eV)
Morkoç	GaN	4.2	-1.8×10^{-2}	3.44	3.52
Wei et Zunger	InN	2.1	0	0.75	0.77

4.4.2.3 La longueur de diffusion

La longueur de diffusion des porteurs, autrement dit la durée de vie des porteurs minoritaires dans le matériau, sert à optimiser les procédés de fabrication des composants

électroniques spécialement dans le domaine du photovoltaïque. Physiquement, elle est décrite comme la distance moyenne du parcours de diffusion des porteurs dans le matériau avant sa recombinaison avec un porteur majoritaire. Elle est exprimée par l'équation [74] :

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (4.7)$$

Avec :

τ : Temps de vie des porteurs (s)

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

Où:

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad (4.8)$$

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

4.4.2.4 Mécanisme de recombinaison

Le mécanisme de recombinaison électro-trou peut se faire généralement de trois différentes façons, soit par transition de bande à bande de façon radiative (transition directe), soit de façon non radiative (transition indirectes) par la recombinaison Auger ou bien par la recombinaison assistée par piège, appelé aussi recombinaison Shokley-Read-Hall. Le taux de recombinaison est donné par [74, 75]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{défaut}} + \frac{1}{\tau_{radiatif}} + \frac{1}{\tau_{auger}} = \sigma \bar{v} N_{défaut} + B_{radiatif} n + B_{Auger} n^2 \quad (4.9)$$

Où :

σ : Section efficace de capture (cm^2).

\bar{v} : Vitesse moyenne des porteurs libres ($cm \cdot s^{-1}$).

n : Densité d'électrons libres (cm^{-3}).

$N_{défaut}$: Densité de défaut (cm^{-3}).

$B_{radiatif}, B_{Auger}$: Constante du matériau ($cm^3 \cdot s^{-1}$, $cm^6 \cdot s^{-1}$).

4.4.2.4.1 Recombinaison radiative

Ce phénomène résulte du passage d'un électron entre les deux bandes à partir de la bande de conduction vers la bande de valence qui causera une émission de photon dont l'énergie créée par ce dernier représentera l'énergie du gap du composant comme illustré sur la figure (4.4) [75].

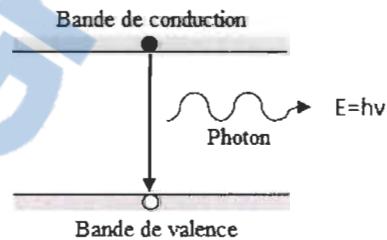


Figure 4. 4 Schéma de la recombinaison radiative [75].

4.4.2.4.2 Recombinaison Auger

Ce phénomène se réalise lorsqu'il y'aura un transfert d'énergie cinétique entre deux électrons ce qui va inciter l'électron qui a reçu l'énergie transférée à aller se recombiner avec un trou qui causera par la suite l'émission d'un photon avec une énergie $h=Ev$ [75].

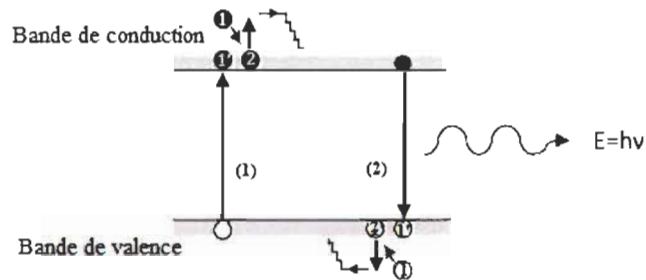


Figure 4. 5 Schéma de recombinaison Auger [75].

4.4.2.4.3 Recombinaison Shokley-Read-Hall

Ce phénomène est aussi appelé recombinaison à travers les défauts des bandes. Ce genre de mécanisme ne se produit pas dans des matériaux totalement purs, mais plutôt dans des matériaux possédant des défauts comme les nitrures ou des matériaux dopés. Ce processus se réalise par l'intermédiaire d'un défaut dans la structure ou d'impureté dans le matériau en passant par deux étapes. D'abord, l'électron ou le trou se trouve piégé par un niveau d'énergie dans une région interdite créée par le défaut dans le gap. Ensuite le trou ou bien l'électron dans le cas inverse va se déplacer vers ce même niveau d'énergie où se fait la recombinaison. Il se peut que l'électron ou bien le trou va être réémis vers la bande de conduction au lieu d'occuper le défaut, ce qui va empêcher la recombinaison bien sûr. Cela est dû au niveaux d'énergies qui sont très importants dans la réalisation de cette dernière [75, 76].

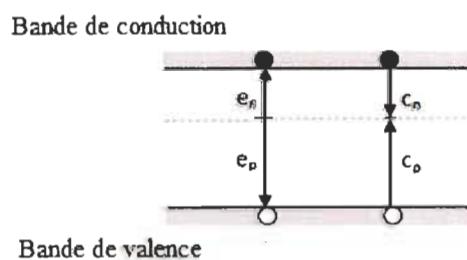


Figure 4. 6 Schéma de la recombinaison Shokley-Read-Hall [75].

4.4.3 Propriétés optiques

Lorsqu'on parle de propriétés optiques pour n'importe quel matériau, on fait référence à son indice de réfraction ainsi que son coefficient d'absorption optique.

4.4.3.1 Indice de réfraction

La lumière se propage selon l'indice de réfraction le plus fort. Cette propriété est fondamentale pour gérer la propagation de la lumière dans un composant qui se constitue de plusieurs matériaux.

L'indice de réfraction est aussi un facteur de grande influence pour les applications photovoltaïques, car il nous permet d'augmenter l'efficacité d'absorption d'une cellule solaire et obtenir un meilleur rendement par conséquent. Ce dernier est défini par le rapport [77, 78] :

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.10)$$

Avec :

c : la vitesse de la lumière dans le vide.

v : la vitesse de la lumière dans le matériau.

L'indice de réfraction des nitrides GaN et InN est estimé approximativement à 2.3 et 2.9 respectivement dans l'infrarouge [77, 78].

La vitesse de la lumière dans le matériau dépend généralement de la longueur d'onde.

Un exemple de GaN, réalisé par Barkeret et Ilegems pour des longueurs d'onde allant de 0.35 à 10 μm , est illustré dans la figure (4.7) [79].

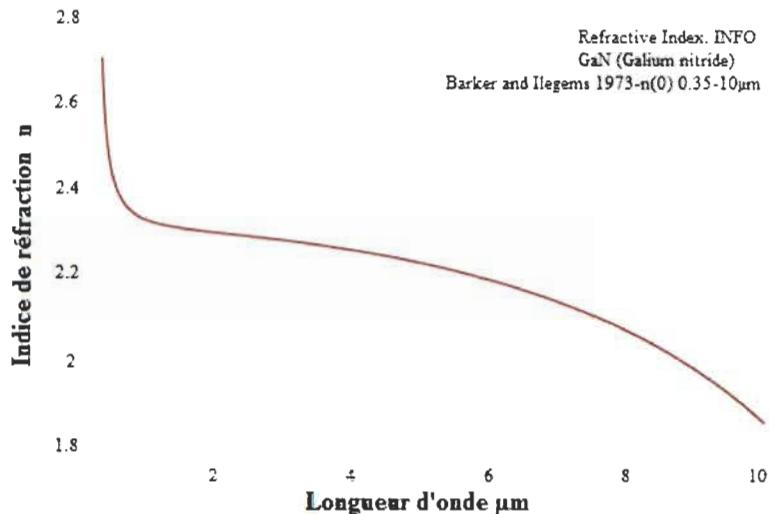


Figure 4. 7 Indice de réfraction du GaN [79].

On peut voir clairement que l'indice de réfraction est inversement proportionnel à la longueur d'onde.

Les chercheurs ont aussi démontré une relation entre l'indice de réfraction et l'énergie d'un photon absorbé par le matériau sous l'expression [80]:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.11)$$

En se basant sur cette relation, les chercheurs ont conclu que l'indice de réfraction se caractérise lui aussi par un paramètre de courbure comme le gap d'énergie interdite [80].

L'indice de réfraction est aussi important pour le calcul des coefficients d'absorption selon la loi de Snell-Descartes [80]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4.12)$$

Où :

n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux.

θ_1 et θ_2 sont les angles des rayons lumineux.

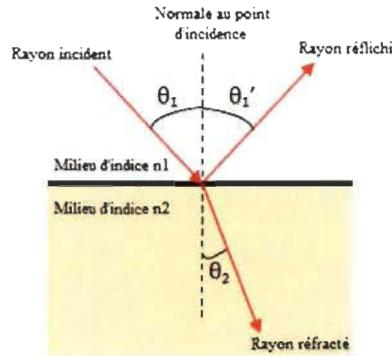


Figure 4. 8 Schéma des chemins optiques [75].

4.4.3.2 Gap d'absorption

Le coefficient d'absorption a aussi une grande importance spécialement pour les cellules solaires, car ce dernier est responsable de la quantité de photons absorbés et par conséquent la quantité de porteurs produits. En d'autre terme, c'est la quantité de lumière absorbée [81].

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

$$I_t(\lambda) = I_i(\lambda) * \exp \alpha(\lambda) d \quad (4.13)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (4.14)$$

Où :

I_i : Intensité incidente.

I_t : Intensité transmise.

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

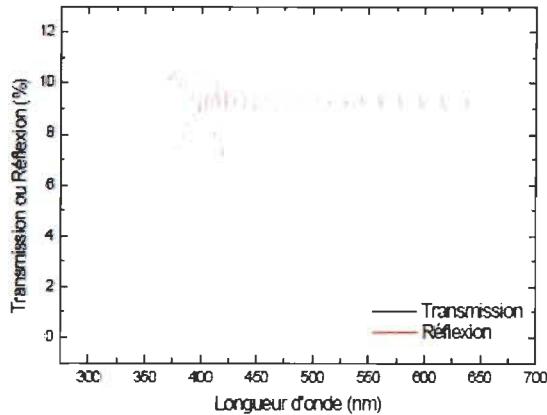


Figure 4.9 Les courbes de transmission et de réflexion trouvées expérimentalement pour un composant GaN de 350 nm [75].

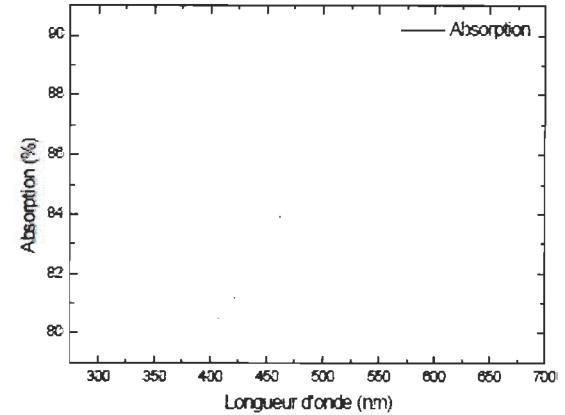


Figure 4.10 La courbe d'absorption trouvée expérimentalement pour un composant GaN de 350 nm [75].

Les figures (4.9) et (4.10) représentent les courbes de transmission, de réflexion et d'absorption trouvées expérimentalement pour un composant GaN de 350 nm [75].

Le coefficient d'absorption peut aussi être exprimé en fonction de l'énergie des photons selon l'équation [75]:

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E - E_g}}{E} \quad (4.15)$$

Avec :

$\alpha(E)$: Coefficient d'absorption en fonction de l'énergie des photons (eV).

α_0 : Paramètre d'ajustement ($eV^{1/2}/cm^{-1}$).

Par ailleurs, plusieurs auteurs ont déterminé un coefficient d'absorption pour le GaN et le InN égal à $10^5 cm^{-1}$ et $5 \times 10^4 cm^{-1}$ respectivement [82, 83].

Tableau 4- 4 Tableau récapitulatif des paramètres optiques des composants GaN et InN [82, 83].

Matériau	Indice de réfraction (s.d)	Constantes diélectriques statiques (s.d)	Constantes diélectriques à haute fréquence (s.d)	Coefficient d'absorption (cm^{-1})
GaN	2.3	10.4	5.8	10^5
		9.5	5.35	
InN	2.9	14.4	8.4	5.10^4
		13.4		

D'après les études menées sur ces éléments nitrures-III, l'alliage InGaN est un très bon absorbant de lumières grâce à ces propriétés optiques. D'ailleurs, il est un meilleur choix que le silicium ou tout autre matériau semi-conducteur pour la réalisation d'une cellule solaire à couche mince, car il suffit de 100 nm de cet alliage pour absorbé la totalité d'un spectre, ayant une longueur d'onde de 500 nm contrairement au silicium cristallin qui aura besoin de 1000 nm pour absorbé environ 90 % de ce spectre [81].

4.4.3.3 Gap d'émission

On peut obtenir le gap d'émission d'un matériau par deux différentes façons, soit par la photoluminescence (PL), ou bien par la cathodoluminescence (CL).

Chaque matériau est caractérisé par un gap d'émission, ce dernier peut nous permettre d'avoir des informations sur la qualité du matériau voulu, que ce soit au niveau de ces propriétés optiques, structurales ou morphologiques [75].

La courbe illustrée dans la figure (4.11) représente le spectre CL (cathodoluminescence) pour le matériau GaN réalisé par luminescence à température ambiante. D'où on peut voir

clairement un grand pic d'émission à une valeur de longueur d'onde égale à 362 nm, qui divise la courbe en deux parties non symétriques.

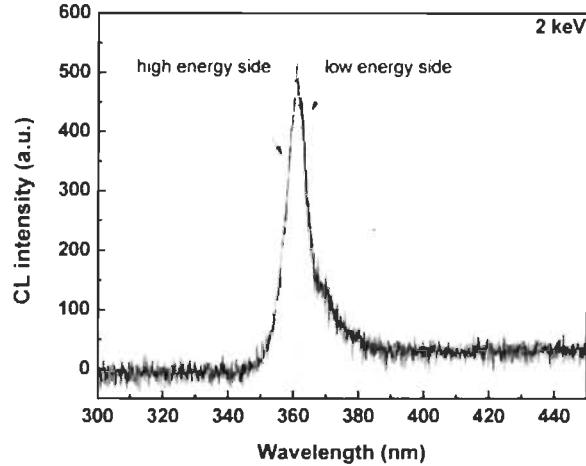


Figure 4. 11 Le spectre CL pour le matériau GaN par luminescence à température ambiante mesurée à 2KeV [81].

Dans la première partie, à des longueurs d'ondes inférieures à la valeur du pic, on a une haute énergie du spectre décrivant l'émission et qui peut être exprimée selon l'équation de Maxwell sous la forme [81]:

$$E_{NBE} = A_0 * \exp - \left(\frac{E - E_g}{KT} \right) \quad (4.16)$$

Où:

K: est la constante de Boltzmann et A_0 est une constante.

Avec : $K=8.617 \times 10^{-1} \text{ (eV. } K^{-1})$.

Dans la deuxième partie, pour des longueurs d'onde supérieure à la valeur du pic, on a une basse énergie décrivant l'inhomogénéité au niveau de la bande interdite due généralement aux impuretés, qui peut être exprimé par l'équation [81]:

$$E_{NBE} = B_0 * \sqrt{E - E_g} * \exp - \left(\frac{E - E_g}{KT} \right) \quad (4.17)$$

Avec B_0 constante.

Généralement, la position du gap se réfère par le point d'infexion qui se trouve dans la partie basse énergie. Mais dans le cas des nitrures, on peut désigner le maximum du pic comme position du gap vu que la différence entre ce dernier et le point d'infexion tend vers zéro à cause de l'intensité d'émission.

Par ailleurs, la variation du gap d'émission pour l'alliage InGaN est donnée dans de nombreuses références par la relation [84]:

$$\Delta E_{NBE} = 1.56x - 0.6244x^2 \quad (4.18)$$

4.4.4 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques sont généralement regroupées dans la conductivité thermique et l'expansion thermique.

4.4.4.1 Conductivité thermique

La conductivité électrique représente le comportement d'un matériau pendant le transfert d'une quantité d'énergie thermique. Cette dernière est donnée par la relation [85]:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \quad (4.19)$$

Où : R_{th} est la résistance thermique.

4.4.4.2 Expansion thermique

Ce phénomène est créé lors de la contraction ou bien la dilatation due à un changement de température dans un plan cristallin, cette expansion au niveau d'un réseau cristallin est caractérisée par un coefficient d'expansion thermique donné sous la forme [73]:

$$\alpha_a = \frac{\Delta a}{a \cdot \Delta T} \quad \text{et} \quad \alpha_c = \frac{\Delta c}{c \cdot \Delta T} \quad (4.20)$$

Où :

Δa et Δc : est la variation des paramètres des mailles (\AA).

ΔT : est la variation de température (K).

Le coefficient d'expansion thermique dépend de plusieurs facteurs comme l'impureté ou la concentration de charges libres dans le composant. D'une autre part, la différence entre les coefficients d'absorption des matériaux qui composent l'alliage peuvent créer des défauts qui entraîneront une dégradation au niveau des performances de l'alliage [73].

4.4.5 Dopage

Le dopage a pour but d'augmenter la quantité d'électrons ou bien de trous dans un matériau en introduisant dans ce dernier des atomes d'une autre nature qui vont se substituer aux atomes originaux, ainsi introduire les porteurs libres. Le rôle du dopage consiste à modifier les caractéristiques du matériau comme par exemple contrôler la conductivité électrique du matériau à travers la création d'une jonction.

Généralement, le dopage se fait de trois différentes manières; le dopage par diffusion, le dopage par implantation ionique et le dopage par transmutation nucléaire. Cependant, pour

des composants semi-conducteurs réalisés par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur le dopage par diffusion est la technique la plus utilisée et la plus adéquate.

Il existe deux sortes de dopage, si on augmente la densité d'électrons dans ce cas il s'agit d'un dopage de type N, qui se caractérise avec une conduction électrique par les électrons. Dans l'autre cas, on aura un dopage de type P dont la conduction électrique est favorisée par les trous [75, 86].

4.4.5.1 Dopage de type N

Ce type de dopage présente un excès d'électrons donc il sera chargé négativement.

Les composants de structure V-III sont naturellement de type N car ils ont plus d'électrons, ce qui facilite ce type de dopage. En outre, on utilise plusieurs dopants de type N pour ces matériaux comme l'hydrogène, l'oxygène, le germanium ou le silicium. Mais le plus souvent est le silicium avec une concentration de l'ordre de 10^{18} cm^{-3} , vu sa grande efficacité [86, 87].

4.4.5.2 Dopage de type P

Ce type de dopage présente un excès de trous donc il sera positivement chargé.

Contrairement au dopage de type N, ce dopage est beaucoup plus compliqué à réaliser vu que les nitrures sont intrinsèquement de type N, donc il faut d'abord créer un équilibre entre les électrons et les trous dans le matériau pour pouvoir créer par la suite un excès de trous. En outre, le magnésium est le dopant de type P le plus utilisé pour le dopage des nitrures avec une concentration allant de 10^{18} à $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [88, 89].

La concentration très élevée du dopant va créer une dispersion des porteurs et ainsi réduire leur mobilité [87].

4.5 Nanostructure

Dans la réalisation des nanostructures à base des nitrures on utilise des nano fils ou des puits quantiques. Ces nanostructures se distinguent des couches minces par leurs singularités à pouvoir modifier les propriétés d'un matériau en se basant sur le principe de quantification des niveaux d'énergie. Ce dernier consiste à augmenter le gap d'énergie en minimisant la taille de la structure. Sans oublier leurs meilleures qualités cristallines vues que ces structures ont peu de défauts [90].

Des recherches effectuées par Kuykendall sur l'alliage InGaN, ont démontré que cette structure peut atteindre toutes les émissions qui se situent entre le proche ultraviolet et le proche infrarouge grâce à la morphologie des nano fils et leurs faibles densités en défaut [91].

4.6 Cellules photovoltaïques à base d'InGaN

L'idée d'utiliser l'alliage InGaN dans la fabrication des cellules solaire revient à J.Wu lors de son étude intitulée «superior radiation resistance of InGaN alloys : full-solar-spectrum photovoltaic material» system en 2003, en exposant la particularité d'InGaN à avoir un gap modulable et une résistance aux radiations. Depuis, plusieurs recherches se focalisaient sur ce genre de matériau [92].

L'utilisation de l'alliage InGaN dans la fabrication des cellules photovoltaïques montre un fort potentiel. D'ailleurs, les recherches théoriques menées dans ce cadre ont donné des résultats très convaincants que ce soit pour des cellules multijonctions, hétérojonction ou

homojonction. Dans ce qui va suivre, nous allons voir l'intérêt de cet alliage pour les cellules solaires à travers la démonstration des résultats obtenus par de nombreuses recherches.

4.7 Intérêt de l'InGaN pour les cellules solaires

4.7.1 Simple jonction

Durant les années 2008 et 2009, plusieurs recherches ont été menées sur des cellules photovoltaïques à homojonction à base d'InGaN, ces recherches visaient spécialement à obtenir des meilleurs rendements expérimentaux. Du fait que ces derniers ne correspondaient pas aux rendements théoriques à cause de plusieurs facteurs comme la complexité d'introduire l'indium avec le GaN, la concentration très élevée d'électron dans le GaN ou la formation d'un contact ohmique entre le GaN de type p et le métal. Cependant, des recherches faites par Chen, X et Cai, I. M sur les caractéristiques courant-tension d'une cellule homojonction à base de l'InGaN par rapport à la concentration d'indium [94, 95], ont démontré que les meilleurs rendements étaient obtenus avec une faible concentration d'indium, mais ces résultats n'étaient pas satisfaisants puisque la qualité cristalline de cet alliage posait toujours un problème. Une autre étude a été réalisée par S. W. Zeng sur une cellule homojonction à base d'InGaN dans le but de contourner le problème de la formation du contact ohmique a rapportait des résultats plutôt satisfaisants, les résultats obtenus sont illustrés dans les figures (4.13) et (4.14) [93-95].

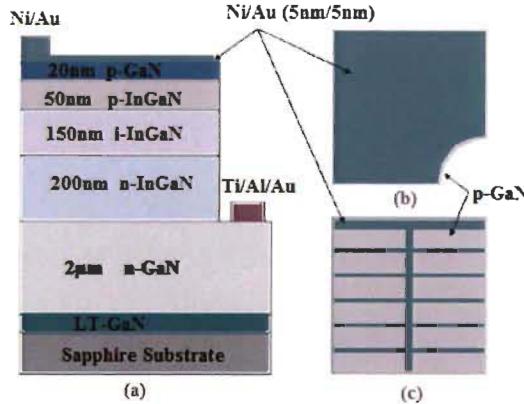


Figure 4.12 Structure d'une cellule solaire PIN à double hétérojonction proposé par Zeng [93].

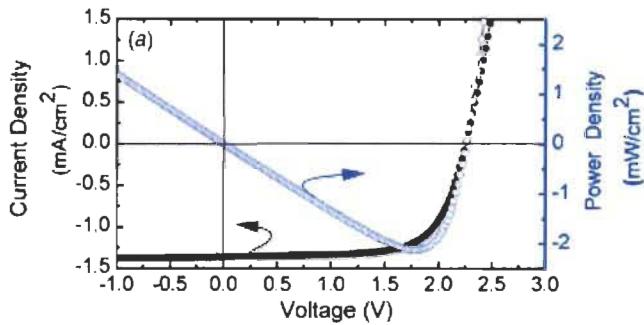


Figure 4.13 Caractéristiques J , V et P , V de la cellule à base d'InGaN avec contact semi-transparent [93].

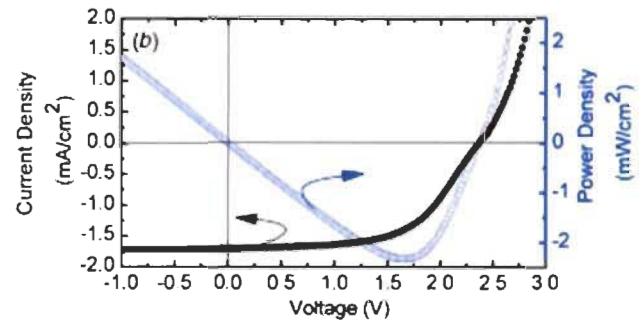


Figure 4.14 Caractéristiques J , V et P , V de la cellule à base d'InGaN avec une grille [93].

4.7.2 Hétérojonctions

D'autre recherche ont été effectués par un certain Kurtz sur des cellules à hétérojonctions à base de l'alliage InGaN/Si, les résultats théoriques obtenus par l'auteur ont démontré un rendement assez convainquant de 39% avec les gaps respectifs de 1.1 et 1.75 eV dont le gap d'InGaN a été obtenu avec 50% d'indium. Ce qui permet en plus d'avoir une jonction ohmique de faible résistance due à la superposition du bas de la bande de conduction d'InGaN avec le haut de la bande de valence du Si, comme il a été rapporté par L.Hsu et W. Walukiewicz [96-98].

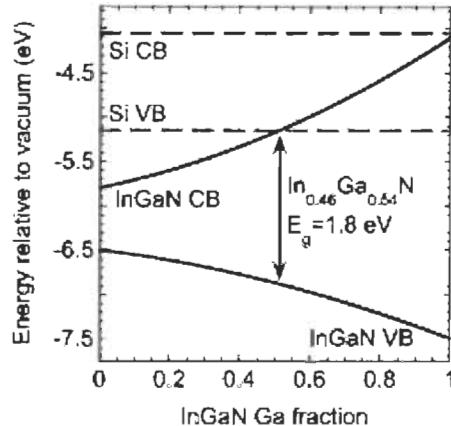


Figure 4.15 Diagramme d'énergie des bandes de conduction et de valence pour InGaN [98].

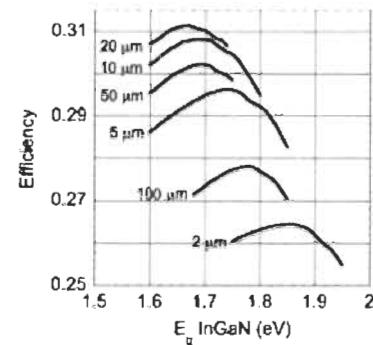


Figure 4.16 Rendement d'une cellule solaire InGaN/Si à deux jonctions en fonction du gap d'InGaN selon différentes épaisseurs du silicium [98].

Notamment, des études menées par R. Dahal en 2010 dans le but d'améliorer la qualité cristalline de ce matériau, qui proposait une nouvelle structure de cellule hétérojonction InGaN/GaN à multi puits quantiques déposés entre deux couches de GaN de type N et P en tant que couches actives. Cette structure est illustrée dans la figure (4.12) [99].

Par ailleurs, des études sur l'impact de nanoparticules sur la surface de la structure ont également été menées par I. M. Pryce en 2010 [100]. Sans oublier de mentionner que la difficulté du dopage P pour l'InGaN a fait l'objet de plusieurs études dont on peut citer celle rapportée par J. J. Xue, où il a proposé une diode Schottky Au/Pt/i-InGaN/i-GaN [101].

4.7.3 Multi-jonctions

Les cellules solaires multi-jonctions ont pour avantage d'absorber le maximum possible du spectre solaire pour avoir des meilleurs rendements. Ces cellules sont conçues de plusieurs jonctions P-N ayant des différents gaps d'énergies afin d'atteindre une absorption optimale.

Cependant, l'inconvénient majeur de ce genre de cellules se résume dans le fait qu'une partie du courant généré par la cellule se dissipe par les connexions en séries des sous-cellules, tandis que l'utilisation du même matériau pour toutes les sous-cellules permettra de produire la même densité du courant et ainsi minimiser au maximum les pertes. C'est de là qui vient le grand intérêt pour l'alliage InGaN vu qu'il possède un gap largement modulable [102].

Tableau 4- 5 Résultats de simulation de Barmner pour des cellules multi-jonctions sous un spectre AM1.5 [103].

E_{g1}	E_{g1}	E_{g3}	E_{g4}	E_{g5}	E_{g6}	E_{g7}	Rendement (%)
1.34							33.68
0.94	1.60						45.71
0.94	1.37	1.90					51.58
0.71	1.11	1.49	2.00				55.31
0.70	1.01	1.33	1.67	2.14			57.61
0.69	0.96	1.20	1.47	1.79	2.24		59.41
0.69	0.93	1.14	1.37	1.60	1.90	2.33	60.78

Tableau 4- 6 Résultats de simulation de Barmner pour des cellules multi-jonctions sous un optimum de concentration [103].

E_{g1}	E_{g1}	E_{g3}	E_{g4}	E_{g5}	E_{g6}	E_{g7}	Rendement (%)
1.14							40.74
0.76	1.54						55.47
0.60	1.14	1.82					63.15
0.49	0.93	1.38	2.01				67.85
0.44	0.81	1.17	1.58	2.18			71.02
0.38	0.71	1.01	1.33	1.72	2.30		73.33
0.37	0.66	0.92	1.18	1.48	1.85	2.42	75.09

Les tableaux (4-5) et (4-6) résume les rendements théoriques obtenus lors d'une recherche menée sur une cellule solaire à multi-jonctions se composant de sept sous-cellules à base d'InGaN d'abord sous un spectre AM1.5, en suite sous un optimum de concentration.

Les résultats, obtenus par les auteurs sous un spectre AM1.5, montre que pour une cellule à une seule jonction avec un gap de 1.34 eV, on obtient un rendement de 33.68% et un rendement de 45.71%, pour une cellule à double jonction avec les gaps 0.94 et 1.60 eV. Tandis que pour une cellule à sept jonctions on a le plus haut rendement de 60.78%. Dans le deuxième cas, sous un optimum de concentration, on a les mêmes résultats, mais avec des meilleurs rendements qui atteignent les 75% pour les cellules à sept jonctions.

D'après les résultats obtenus par les chercheurs, on peut confirmer qu'avec une cellule multi-jonctions on obtiendra un meilleur rendement, seulement la fabrication de ce genre de structure reste très limitée vu sa complexité et son coût élevé [103].

4.8 Rendement théorique maximum

On peut déterminer le rendement théorique maximum d'une cellule solaire à partir du spectre solaire ainsi que le courant de cette cellule. En prenant considération des pertes causées, soit par le gap d'énergie qui pourra mener à une absorption incomplète des photons, ou bien ces pertes peuvent aussi être causées par la thermalisation c'est-à-dire l'excès d'énergie des photons [75].

Cependant, afin d'obtenir un rendement optimal pour une cellule solaire, il est très important de bien choisir le matériau le plus adapté au rayonnement. D'autre part, on a vu précédemment que l'énergie solaire optimale est obtenue avec un gap d'énergie allant de 1.5 à 2.5eV soit entre 500 et 700 nm. Dans la figure ci-dessous on trouve une représentation

qui montre le recouvrement du spectre solaire AM1.5 par le gap de différents semi-conducteurs. Toutefois, les semi-conducteurs peuvent accéder à des longueurs d'ondes ayant une énergie au-dessus de leurs gaps.

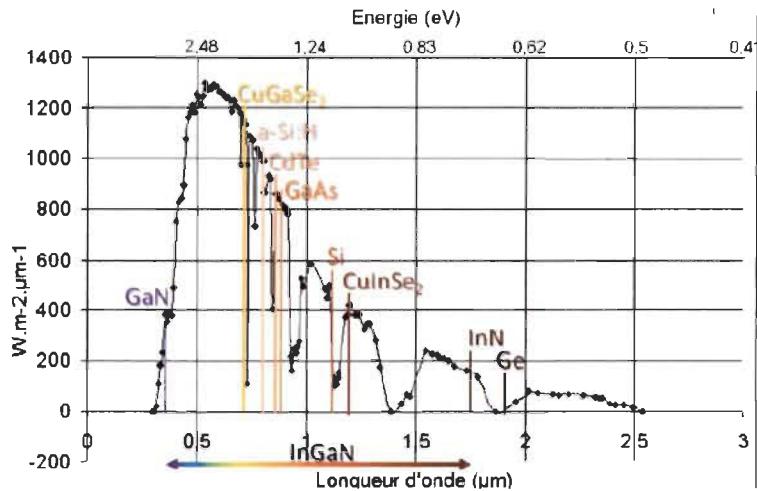


Figure 4. 17 Gap d'énergie des principaux semi-conducteurs sous spectre solaire AM1.5

[75].

D'après cette courbe, on peut constater que plusieurs semi-conducteurs ont des gaps d'énergie qui se situent entre 500 et 700 nm tels que l'alliage CIGS, GaAs, CdTe ou le silicium amorphe, ce qui rend ces matériaux très intéressants pour les conversions photovoltaïques. Mais ces derniers sont plus adéquat pour des structures à simple jonction, En outre, on voit que l'InGaN se distingue de tous les autres par son large gap. Effectivement, l'InGaN couvre les longueurs d'ondes possédant le maximum d'énergie solaire, en plus il est un choix idéal pour les structures à multi-jonctions [75].

4.9 Conclusion

Les nitrures ont vu le jour dans les années 90, mais leurs utilisations est très vaste et ne se résume pas seulement aux applications photovoltaïques. Elles couvrent différents domaines technologiques comme l'optoélectronique par exemple, où elles furent principalement étudiées dans des applications de diodes laser et LEDs vue leurs caractéristiques particulières. Comme le fait d'avoir un grand gap modulable, une couverture spectrale quasi-totale, une résistante aux températures très élevées et aussi une forte puissance. Elles sont aussi utilisées dans le domaine de l'électronique dans la fabrication des transistors pour leurs hautes performances en puissance, du fait qu'elles sont dotées d'une grande tension de claquage. On les trouve également dans des applications en télécommunication comme les fibres optiques en raison de leur importante longueur d'onde.

Par ailleurs, ces nitrures peuvent avoir une grande expansion sur d'autres domaines. Tels que la chimie dans la fabrication de capteurs chimiques, grâce au changement rapide de leurs concentrations selon le milieu détecté. Enfin, la particularité de l'InN à avoir des émissions de l'ordre du Téra hertz, pourra même lui ouvrir la voie vers des applications dans le domaine de la biologie ou la médecine [68, 102].

Dans ce quatrième chapitre nous avons fait une étude générale sur les composants ayant une structure V-III appelés aussi les nitrures. Plus particulièrement, l'alliage InGaN qui se constitue des deux composants In et GaN. En abordant leurs principales caractéristiques et propriétés physiques essentielles pour entamer notre cinquième et dernier chapitre de ce mémoire, qui se résume à la modélisation et simulation d'une cellule solaire à base de ce composant (InGaN) aux dimensions nanométriques.

L'étude détaillée portée sur les propriétés structurales, électriques, optiques ou thermiques du matériau, nous a non seulement aidé à connaitre d'avantage les caractéristiques qui rendaient ce dernier aussi intéressant qu'il soit (son large et modulable gap direct qui lui permet ainsi une couverture quasi-totale du spectre solaire). Mais aussi à connaitre ses points faibles et ses défauts (grande densité de défauts, forte concentration en électron).

Enfin, afin de mieux comprendre les enjeux de ce matériau au niveau d'une cellule solaire, on a également évoqué quelques recherches portées sur des cellules photovoltaïques à base d'InGaN qui montrent l'intérêt d'utiliser ce matériau dans de telles applications.

Chapitre 5 - Simulations des cellules solaires à base d'InGaN

5.1 Introduction

Après avoir passé en revue tous les axes essentiels pour l'étude d'une cellule photovoltaïque en couche mince à base de matériaux ayant des dimensions de l'ordre du nanomètre, nous allons pouvoir procéder dans ce cinquième et dernier chapitre à la modélisation et simulation de notre modèle sous les environnements COMSOL multiphysics et Matlab. Mais avant cela, on va d'abord faire une petite présentation du logiciel utilisé (COMSOL multiphysics).

5.2 Présentation du logiciel de simulation COMSOL Multiphysics

COMSOL multiphysics est un logiciel de simulation numérique capable de simuler quasiment tous les phénomènes physiques et de nombreuses applications en ingénierie. Doté d'une interface graphique, le COMSOL Desktop® qui dispose de plusieurs interfaces physiques spécifiées pour les applications fréquentes, mais aussi de modules supplémentaires spécialement conçus pour atteindre d'autres applications plus particulières, que ce soit des applications électriques, mécaniques ou bien chimiques. Il est notamment possible d'intégrer d'autres modules afin d'assurer une plus large variation d'application. Certains de ces modules ont aussi le rôle de connecter ce dernier à d'autres logiciels tel que Matlab, Excel, AutoCAD...etc.) [104, 105].

Ce logiciel basé sur la méthode des éléments finis, est apparu pour la première fois en 1986. Ce dernier a été conçu par des étudiants de l'institut royal de technologie à Stockholm en

Suède. Connu auparavant sous le nom de FEMLAB, c'est seulement en 1998 que la première version de COMSOL est apparue [104, 105].

La modélisation d'un système sous COMSOL multiphysics passe généralement par cinq étapes essentielles. On commence d'abord par définir la géométrie de notre système ou composant, puis on va introduire les propriétés correspondantes. Ensuite, on procédera au maillage c'est-à-dire la simplification de notre système, en définissant les caractéristiques de son environnement ou son milieu (repères, dimensions volumes...etc.). Après, on va déterminer la physique ou les physiques du système. Et enfin, dans la dernière étape on va résoudre et afficher les résultats obtenus.

COMSOL muliphysics nous permet également d'introduire nos propres systèmes d'équations. Sans oublier que ce logiciel est aussi compatible avec n'importe quelle plateforme (Windows, Mac, Linux) [104, 105].

5.3 Design et description du modèle utilisé

5.3.1 Première partie

Le modèle choisi pour notre étude est une cellule solaire à hétérojonction à base d'alliage InGaN/GaN, ayant une structure PIN et semblables à ceux proposés dans la littérature [93]. Telle qu'elle est schématisée sur la figure (5.1) à l'aide du simulateur numérique COMSOL, où la couche supérieure GaN-p est quasi transparente, afin de permettre une absorption du rayonnement dans la région intrinsèque. L'épaisseur de cette couche est de 100 nm pour avoir une bonne extraction des porteurs par l'intermédiaire du contacte électrique, où cette dernière est intrinsèquement dopée p. Par conséquent, on va introduire à la couche inférieure un dopage de type n. La couche InGaN intrinsèque a pour objectif de

maximiser l'absorption dans région, car cette dernière peut absorber 90% de la lumière incidente.

Les matériaux utilisés dans la simulation de notre modèle ainsi que leurs paramètres semi-conducteurs sont déjà défini dans la bibliothèque du COMSOL, sous la rubrique des matériaux dans le module «semi-conducteur». Cependant, l'alliage InGaN ne figure pas, de ce fait on a pris le matériau GaN possédant la structure wurtzite, puis on a introduit les paramètres de ce dernier (tirés de la littérature) voir annexe. Par ailleurs les paramètres du GaN sont déjà fixés selon la littérature par ses paramètres n et k , son affinité électronique ainsi que son gap. Cependant, le temps de vie Shockley-Read-Hall des électrons et des trous est réglé à 1.70×10^{-9} s et 0.65×10^{-9} s respectivement, le coefficient de mobilité à 1.5 et le coefficient de capture optique à $1.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour les deux matériaux utilisés (GaN, InGaN).

Afin d'obtenir un rendement élevé, nous allons utiliser une concentration d'indium de 55%. La figure ci-dessous représente la modélisation de notre structure, c'est-à-dire GaN-P/ $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ – P/ $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ – I/ $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ – N/GaN-N avec les épaisseurs de 40 nm pour le GaN et 100 nm pour la couche d'InGaN intrinsèque.

Afin d'obtenir une grande mobilité d'électrons dans l'alliage, nous avons aussi effectué un dopage N de 10^{15} dans la couche d'InGaN-I, un dopage de 10^{18} a été également effectué dans les couches GaN.

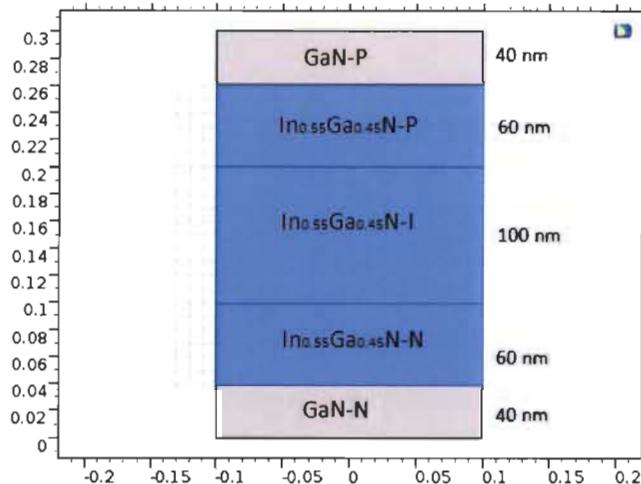


Figure 5.1 Structure de la cellule PIN

(GaN/InGaN/GaN) [109, MIMOUNE].

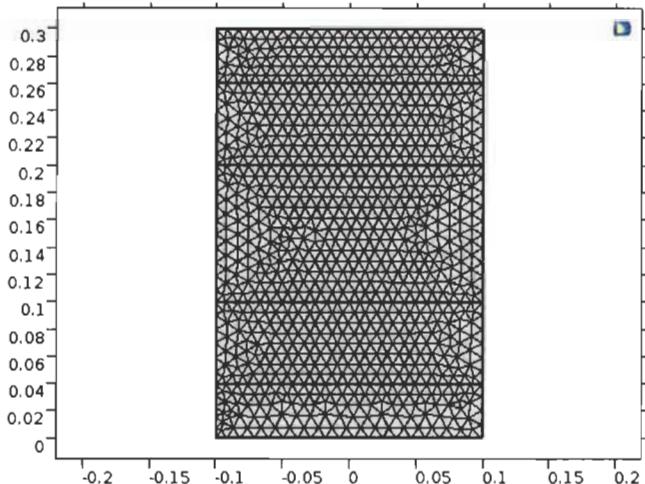


Figure 5.2 Maillage de la structure PIN

(GaN/InGaN/GaN) [109, MIMOUNE].

La mobilité des porteurs est calculée selon le modèle de Caughy-Thomas par la relation suivante [107]:

$$\mu_i(N) = \mu_{min,i} + \frac{\mu_{max,i} - \mu_{min,i}}{1 + (N/N_{g,i})^{y_i}} \quad (5.1)$$

Où :

i représente les électrons ou bien les trous, N et $N_{g,i}$ représente la concentration du dopage et le dopage critique du matériau respectivement et y est une constante.

Afin de calculer la mobilité du matériau, nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous les différentes valeurs tirées de la littérature pour les différents paramètres du GaN et InN.

Tableau 5- 1 Paramètres utilisés pour le calcul des porteurs [106].

Paramètres	GaN	InN
$\mu_{min,e} [cm^{-2}V^{-1}s^{-1}]$	55	30
$\mu_{max,e} [cm^{-2}V^{-1}s^{-1}]$	1000	1100
y_e [s.d]	1	1
$N_{g,e}[cm^{-3}]$	2×10^{17}	8×10^{18}
$\mu_{min,h} [cm^{-2}V^{-1}s^{-1}]$	3	3
$\mu_{max,h} [cm^{-2}V^{-1}s^{-1}]$	170	340
y_h [s.d]	2	2
$N_{g,h}[cm^{-3}]$	3×10^{17}	3×10^{17}

On a utilisé la statistique de Maxwell-Boltzman afin de définir la diffusion des électrons dans les niveaux énergétiques, nous avons aussi pris en considération les recombinaisons de Shockley-Read-Hall (SRH) dans le but de modéliser les pertes dans notre structure. Selon leur définition [108]:

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_p (n + n_{ie} e^{\frac{E_{trap}}{KT}}) + \tau_n (p + n_{ie} e^{-\frac{E_{trap}}{KT}})} \quad (5.2)$$

Avec:

n et p : Concentrations d'électrons et de trous [cm^{-3}].

n_{ie} : Concentration intrinsèque d'électrons [cm^{-3}].

τ_p et τ_n : Temps de vie des électrons et des trous [cm^{-3}].

E_{trap} : La différence d'énergie entre le niveau de fermi et le défaut [eV].

K : Constante de Boltzmann [eV. K^{-1}].

T : Température.

Tenant compte de l'importance du dopage et des défauts dans ce genre de matériaux, les temps de vie pour les électrons et les trous ont été définis par les relations [108]:

$$\tau_n = \frac{\tau_n^0}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_n^{SRH}} \right)} \quad (5.3)$$

$$\tau_p = \frac{\tau_p^0}{1 + \left(\frac{N_{tot}}{N_p^{SRH}} \right)} \quad (5.4)$$

Où :

τ_n^0 et τ_p^0 : Temps de vie des électrons et des trous définis dans le matériau [cm^{-3}].

N_{tot} : Concentration totale de défaut et du dopage [cm^{-3}].

$N_{n,p}^{SRH}$: Concentrations de défauts recombinants $5.0 \times 10^{16} cm^{-3}$ pour les électrons et les trous.

Il est aussi important de mentionner que malgré le large gap qui caractérise ces matériaux, ces derniers ont aussi un gap direct qui exige les phénomènes de recombinaison radiative définit par [108]:

$$R_{np}^{OPT} = C_c^{OPT} (np - n_{ie}^2) \quad (5.5)$$

Où C_c^{OPT} est le taux de capture optique [s.d].

Pour les contacts métalliques (les électrodes) dans les deux bordures supérieure et inférieure de notre structure, on a pris les contacts métalliques ohmiques présents dans le logiciel.

5.3.1.1 Résultats de simulation

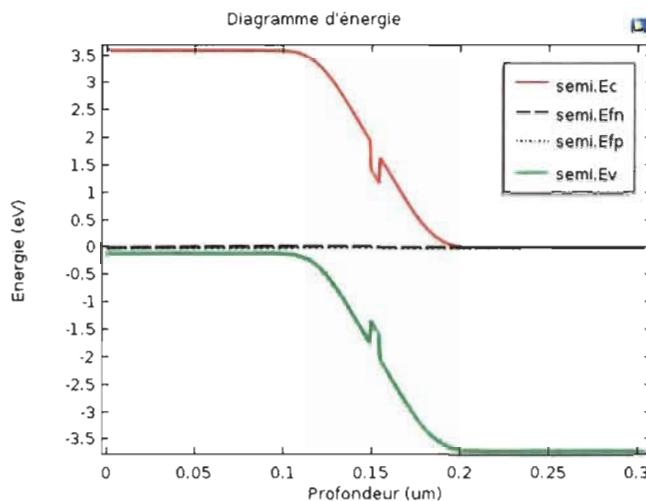


Figure 5.3 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/InGaN/GaN) sans polarisation [109, MIMOUNE].

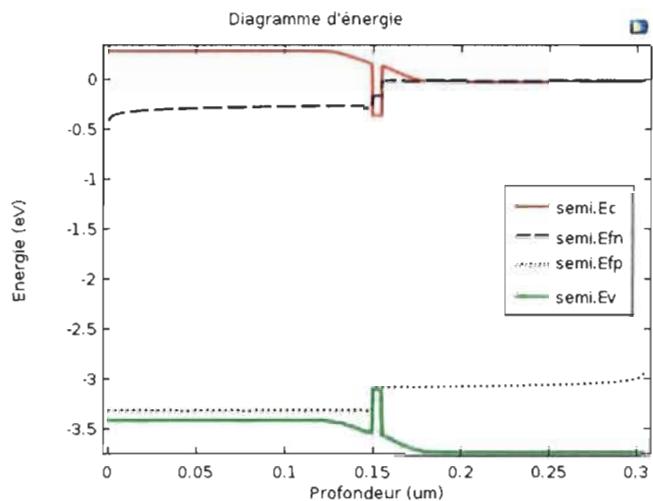


Figure 5.4 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/InGaN/GaN) avec polarisation [109, MIMOUNE].

5.3.1.2 Discussion des résultats

Les courbes illustrées dans la figure (5.3) et la figure (5.4), représentent le diagramme de niveau d'énergie de notre structure pour deux différentes tensions. La bande de conduction et la bande de valence sont référencées par semi.Ec (courbe rouge) et semi.Ev (courbe verte) respectivement, tandis que les électrons et les trous du niveau de Fermi sont référencés par des lignes discontinues semi.Efn et semi.Efp respectivement.

Pour les deux différentes valeurs de tension appliquées la structure, on voit que le dopage PIN est évident, car ce dernier provoque une barrière de potentiel entre la région dopée n dans la partie droite et la région dopée p dans la partie gauche. On remarque aussi un puit de potentiel dans la bande de conduction et aussi dans la bande de valence causé par la bande interdite de l'InGaN. Lors d'une polarisation nulle comme le cas dans la figure (5.3),

on voit que les niveaux de fermi sont loin des bords de la bande dans la couche InGaN.

Lorsqu'on applique une tension de 3.3V comme le cas dans la figure (5.4), on remarque une réduction de la hauteur de la barrière du potentiel entre la région de type-n et la région de type-p, à ce stade le niveau d'énergie des électrons c'est rendu au-dessus du bord de la bande de conduction dans la couche InGaN. Ce qui va inciter à avoir une plus grande concentration d'électrons dans cette région. D'un autre côté, le niveau d'énergie des trous est très proche de la limite de la bande de valence, ce qui va créer une plus grande concentration de trous.

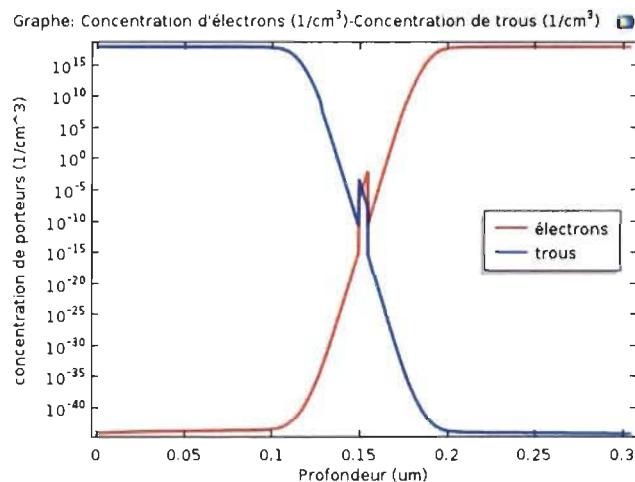


Figure 5.5 Concentration des porteurs (électrons et trous) à travers la structure sans polarisation [109, MIMOUNE].

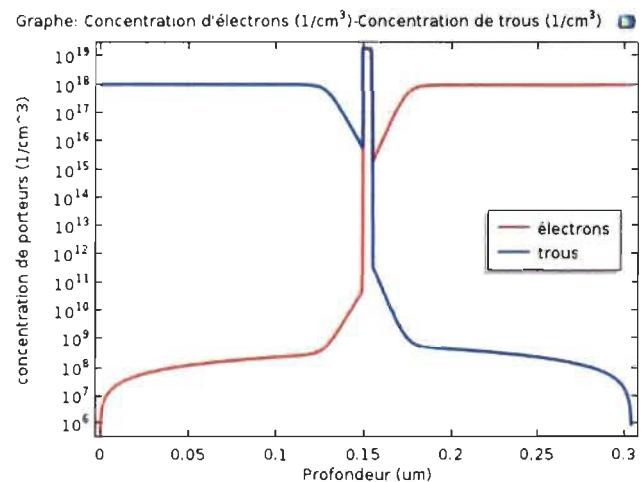


Figure 5.6 Concentration des porteurs (électrons et trous) à travers la structure avec polarisation [109, MIMOUNE].

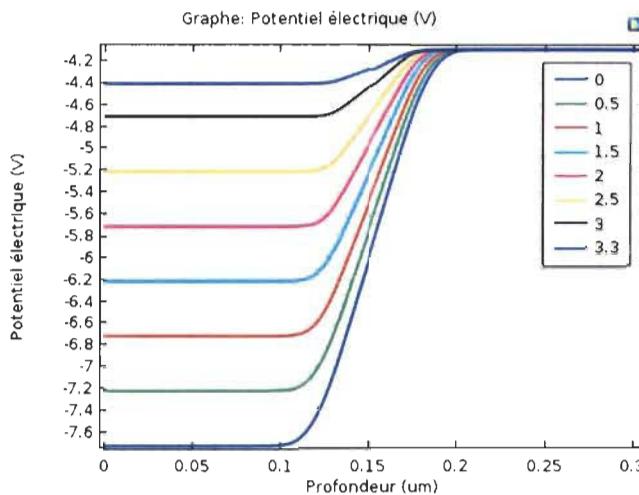


Figure 5. 7 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour différentes valeurs de tension [109, MIMOUNE].

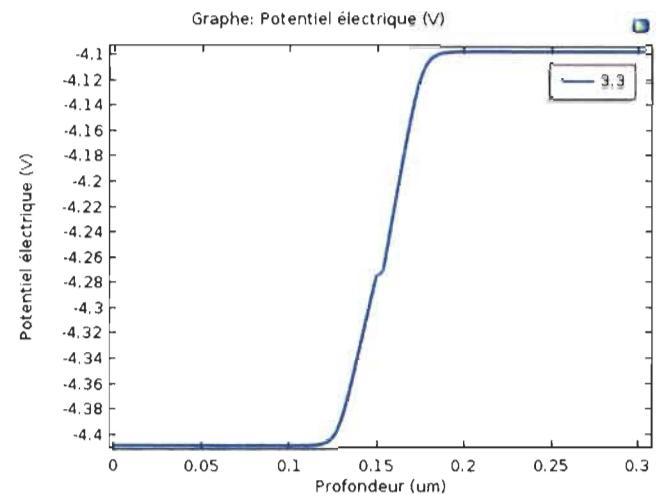


Figure 5. 8 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour une tension de 3.3V [109, MIMOUNE].

Les deux figures ci-dessus montrent la concentration des porteurs de notre structure pour les deux cas précédents de polarisations. On remarque une très grande concentration des porteurs dans les deux régions n et p. Cependant, on voit une certaine augmentation en concentration des porteurs au niveau de la couche InGaN, en raison du puit de potentiel dû à la bande interdite d'InGaN. Toutefois, la concentration est d'un ordre inférieur à celle du matériau.

D'abord lors d'une polarisation nulle illustrée sur la figure (5.5), la région de la couche InGaN a une faible densité de porteurs. Mais au moment où l'on applique une polarisation directe, cette dernière va provoquer une riche densité de porteurs dans la région de l'InGaN. D'où on peut le voir dans la variation des trous de potentiel de l'InGaN illustrée dans la figure (5.6).

Le fait que la concentration des électrons dans la bande de conduction et la concentration des trous dans la bande de valence ont la même valeur signifie que l'émission

de chaque photon nécessite un électron, pour se recombiner avec un trou à travers la bande interdite et cela permettra un rendement efficace.

La représentation du champ électrique en fonction de la profondeur illustrée dans les figures (5.7) et (5.8), confirme bel et bien la présence d'une barrière de potentiel aux deux interfaces entre le GaN et l'InGaN dû à la différence de paramètres physiques et des gaps de ces derniers. La barrière du potentiel a tendance à se réduire et devient plus plane en variaient la tension appliquée, tel qu'il est montré sur la figure (5.8). Cependant, elle présente un petit pic au niveau de l'InGaN qui correspond sûrement au puit du potentiel trouvé dans les deux bandes.

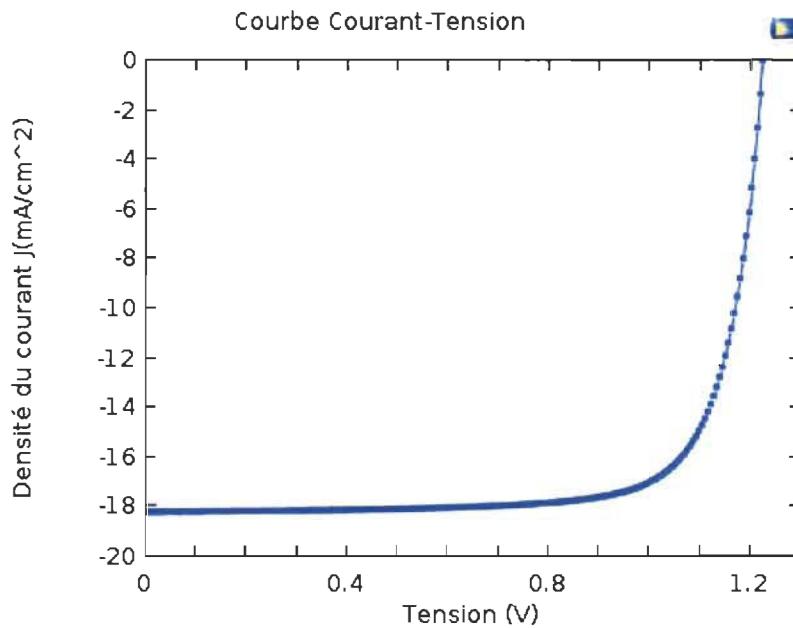


Figure 5. 9 Caractéristique courant-tension de la structure PIN (GaN/InGaN/GaN)

[109, MIMOUNE].

Le taux de recombinaison Auger est proportionnel au cube de la densité des porteurs, tandis que le taux de recombinaison radiative est proportionnel au carré de la densité des porteurs.

Cela causera une fraction de recombinaison produite par l'intermédiaire du mécanisme radiatif qui va considérablement réduire la densité des porteurs d'où la baisse de l'efficacité.

5.3.2 Deuxième partie

Dans cette deuxième partie de notre simulation, on va utiliser le même modèle que précédemment, mais on va introduire quelques modifications en raison de la différence entre les deux gaps de nos matériaux. En outre, l'InGaN a un gap de 1.71 eV et GaN a un gap de 3.39 eV, cette différence entre les deux gaps causera une réduction de la conduction du courant due à la discontinuité de bandes aux interfaces. Comme il a été rapporté dans une étude démontrant qu'une différence au-delà de 0.9 eV entre les gaps du InGaN et GaN va produire une baisse du rendement considérable. Afin d'éviter ce problème, nous allons procéder par l'introduction de deux couches ayant des gaps graduels entre les interfaces GaN/InGaN et InGaN/GaN comme il a été démontré dans une autre étude faite par Brown [106]. Par ailleurs, cette jonction graduelle minimise en plus les réflexions aux interfaces et l'effet de la polarisation.

Aussi, vu que le GaN est intrinsèquement dopé P, on va introduire une couche intermédiaire entre la cellule et le substrat qui servira comme couche tampon. Pour cela on va utiliser un matériau intrinsèquement dopé N tel que l'oxyde de Zinc (ZnO). Dans notre simulation les défauts des couches GaN et ZnO n'ont pas été pris en considération et les couches ont une épaisseur de 40 nm.

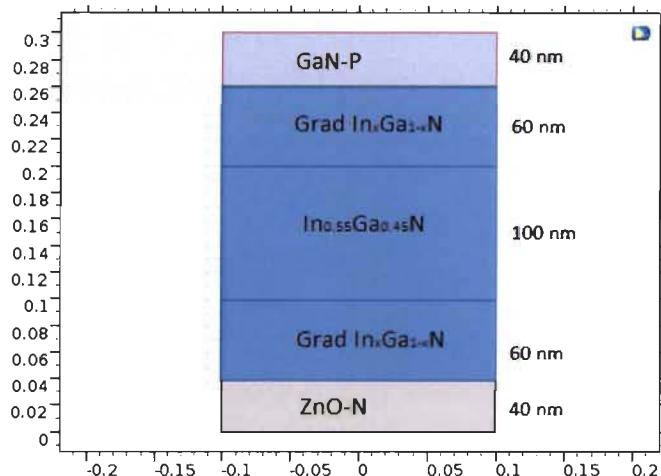


Figure 5. 10 Structure de la cellule PIN (GaN/Grad

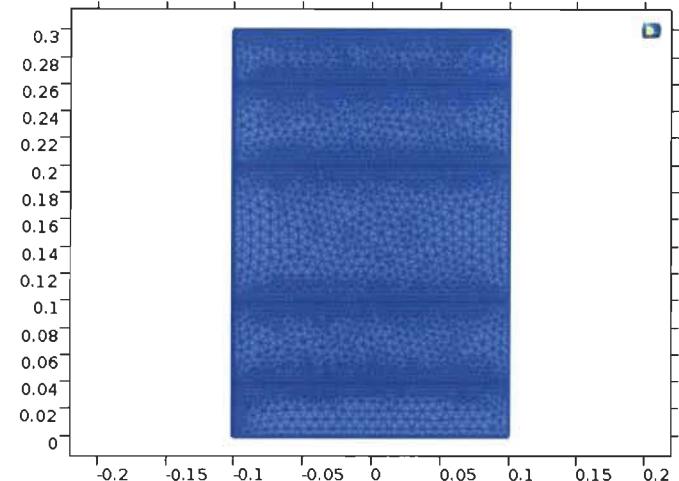


Figure 5. 11 Maillage de la structure PIN

InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO)

[109, MIMOUNE].

(GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad

InGaN/ZnO) [109, MIMOUNE].

Afin d'obtenir un rendement élevé nous allons utiliser une concentration d'indium de 55%.

La figure ci-dessus représente la modélisation de notre structure c'est-à-dire GaN-P/Grad

/In_{0.55}Ga_{0.45}N – 1/ Grad /ZnO-N avec les épaisseurs de 40 nm pour le GaN-p et le ZnO-N,

60 nm pour les couches graduelles et 100 nm pour la couche d'InGaN.

Afin d'obtenir une grande mobilité d'électrons dans l'alliage, nous avons effectué un

dopage N de 10¹⁵ dans la couche d'InGaN-I, un dopage de 10¹⁸ a été également effectué

dans les couches GaN-P et ZnO-N.

Concernant les paramètres de mobilités pour le ZnO, elles étaient fixées comme suit :

Mobilités des électrons est de 205 $cm^{-2}V^{-1}s^{-1}$

Mobilités des trous est de 30 $cm^{-2}V^{-1}s^{-1}$

5.3.2.1 Résultats de simulation

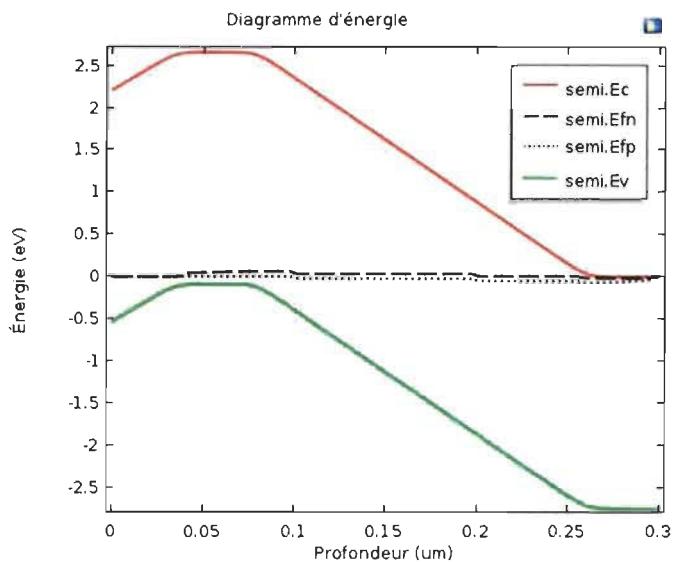


Figure 5.12 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO) sans polarisation [109, MIMOUNE].

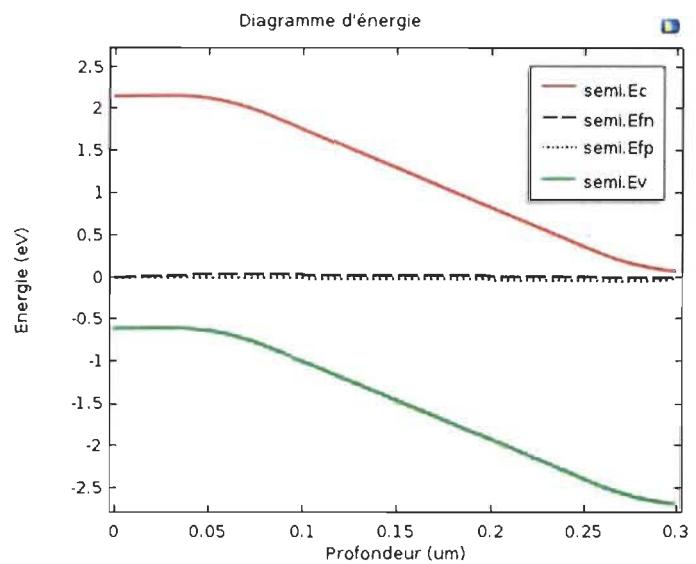


Figure 5.13 Diagramme des niveaux d'énergie de bandes de la structure PIN (GaN/Grad InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO) avec polarisation [109, MIMOUNE].

5.3.2.2 Discussion des résultats

Le diagramme de niveau d'énergie pour notre deuxième structure à gap graduell est représenté par les courbes illustrées dans les figures (5.12) et (5.13). Où les deux bandes de conduction et de valence sont représentées par semi.Ec (courbe rouge) et semi.Ev (courbe verte) respectivement, alors que l'énergie du niveau de fermi pour les électrons et les trous est représentée par des lignes discontinues et référée par Efn et Efp respectivement.

Contrairement au diagramme de niveau d'énergie précédent, on ne trouve pas de puits de potentiel dans les bandes de conduction et de valence, grâce à l'utilisation des couches graduelles d'InGaN et donc une moins grande différence entre les gaps des matériaux

constituant notre cellule. Cela permettra d'éviter le problème de réduction de courant à cause de la discontinuité de bandes due au puit de potentiel et ainsi obtenir un meilleur rendement.

Cependant, on remarque sur la figure (5.12), une barrière de potentiel dans la région dopée n dans la partie droite et la région dopée p dans la partie gauche en raison de la structure PIN. Dans le cas d'une polarisation de 3.3 V illustrée dans la figure (5.13), on peut voir que les bandes sont plus planes et montrent une réduction de la barrière de potentiel entre les deux régions. Cela peut être expliqué par la diminution du champ électrique.

En comparant les deux cas illustrés sur les figures (5.12) et (5.13) par rapport au niveau d'énergie des électrons et des trous, on constate une légère variation lors de la polarisation due à la réduction de la barrière de potentiel. À ce stade le niveau d'énergie des électrons s'est rendu légèrement en dessous au bord de la bande de conduction

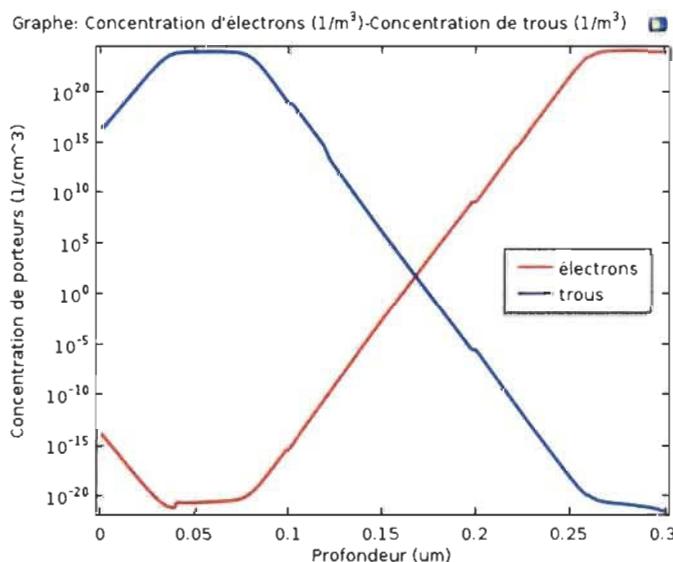


Figure 5.14 Concentration des porteurs à travers

la structure [109, MIMOUNE].

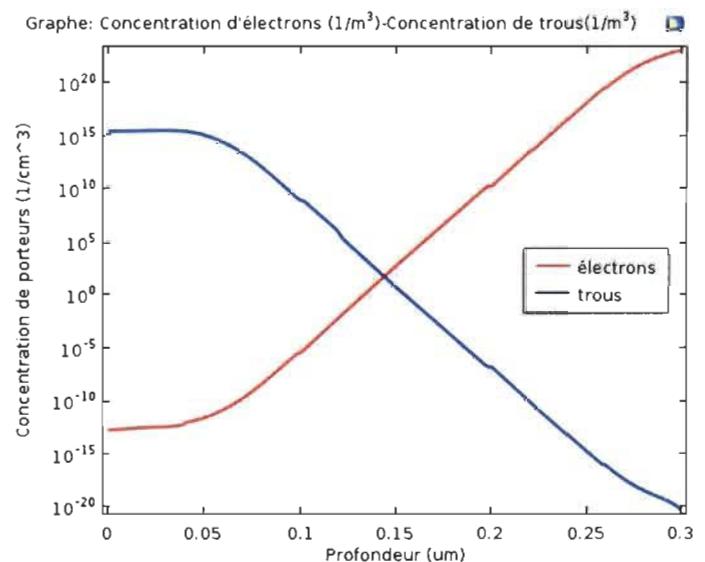


Figure 5.15 Concentration des porteurs à travers

la structure [109, MIMOUNE].

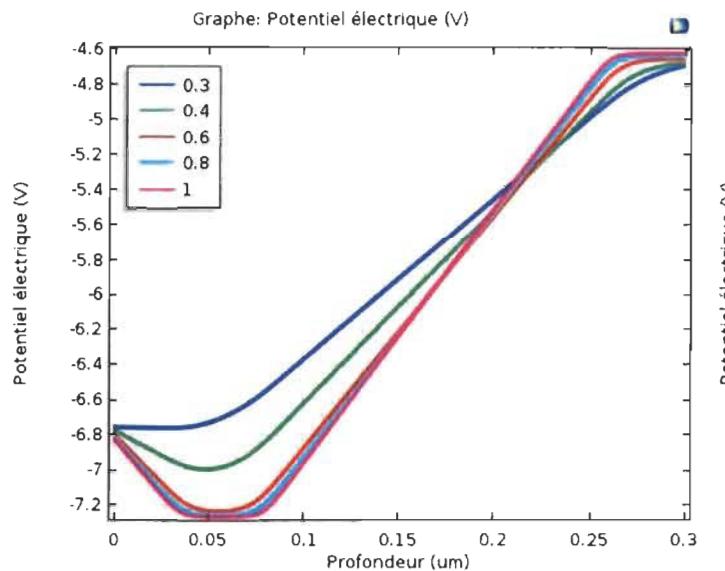


Figure 5.16 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour différentes valeurs de tension [109, MIMOUNE].

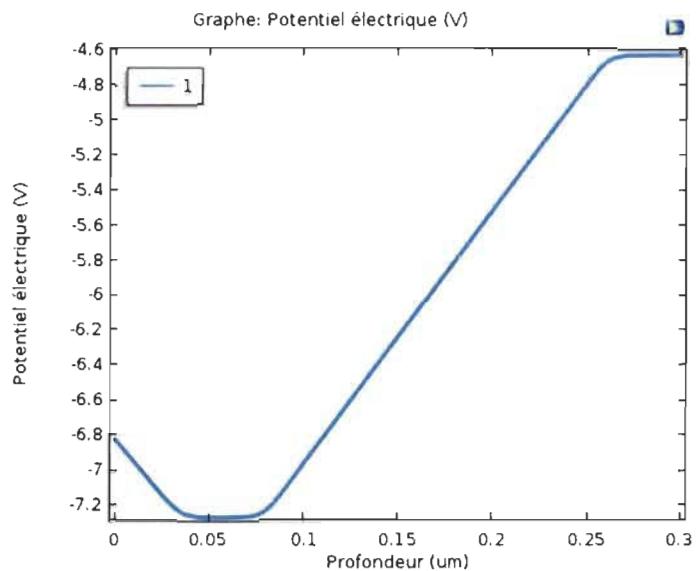


Figure 5.17 Schéma du potentiel électrique à travers la structure pour différentes valeurs de tension [109, MIMOUNE].

Pour la concentration des porteurs de cette structure, les courbes représentées dans la figure (5.14) affirment une très grande concentration des porteurs que ce soit dans la région n ou la région p avec une très mince augmentation dans la bande interdite d'InGaN. Mais en appliquant une polarisation directe tel est le cas dans la figure (5.15), on remarque une réduction de la concentration au niveau de la région n et une grande augmentation au niveau de la région p d'un ordre supérieur à celle du matériau, due à une accumulation d'électrons au niveau de l'interface.

Dans les figures (5.16) et (5.17), on a représenté les courbes du potentiel électrique en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de tension, d'où on remarque la présence de la barrière de potentiel aux niveaux des interfaces. Cependant, en diminuant la tension appliquée, on constate que les barrières de potentiel se réduisent et deviennent de plus en plus planes jusqu'à ce qu'elles s'annulent pour des très petites valeurs de tension.

La diminution du champ va réduire la collecte du courant à cause de la baisse des porteurs photo-générés.

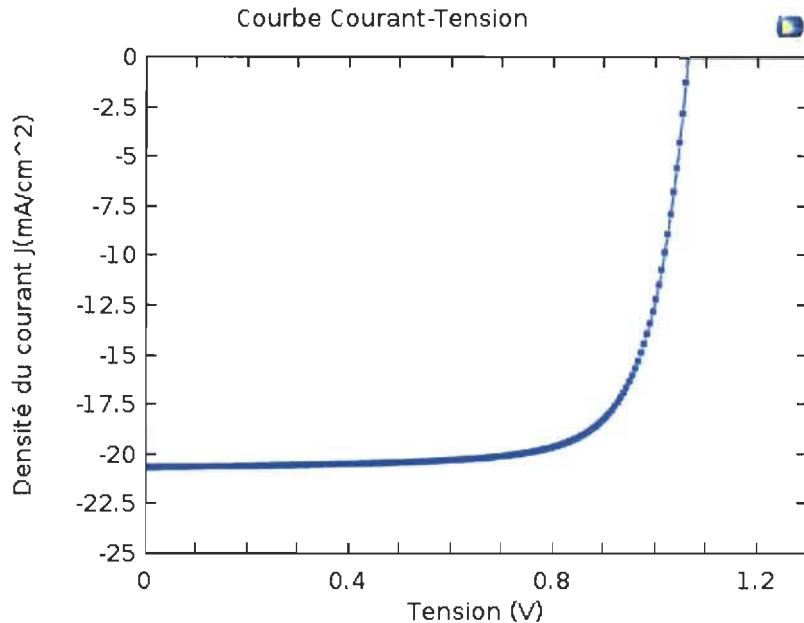


Figure 5. 18 Caractéristique courant-tension de la structure PIN (GaN/Grad

InGaN/InGaN/Grad InGaN/ZnO) [109, MIMOUNE].

5.4 Optimisation des paramètres

Après avoir défini notre structure de base pour une cellule solaire à base de l'InGaN dans cette troisième partie de notre simulation, nous allons faire une optimisation de quelques paramètres ayant une grande influence sur le rendement de la cellule dans le but d'obtenir le rendement optimum qui soit. Les paramètres dont il est question sont l'épaisseur de la couche active (InGaN), le dopage de la couche active, la densité de défauts et la concentration d'indium dans cet alliage (InGaN).

Pour la réalisation de cette optimisation, nous avons pris le deuxième modèle de notre structure c'est-à-dire la structure à base de couches graduelles, vu qu'elle présente des

meilleurs résultats contrairement à notre premier modèle qui présentait une grande différence entre les gaps des matériaux constituant la cellule.

5.4.1 Variation de l'épaisseur

Dans un premier temps, nous allons procéder par faire varier l'épaisseur de la couche InGaN de notre modèle dans un intervalle allant de 25 à 700 nm.

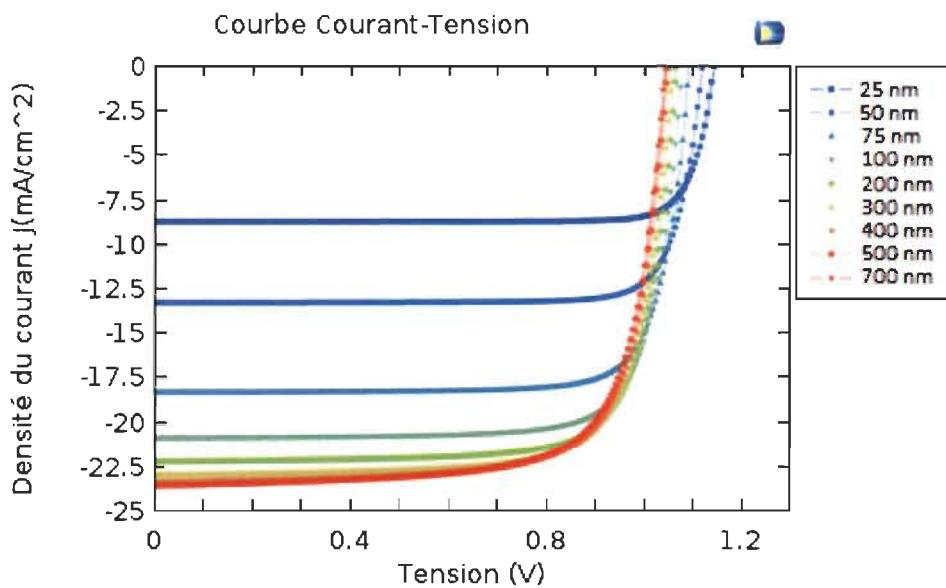


Figure 5.19 Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseurs de la couche InGaN [109, MIMOUNE].

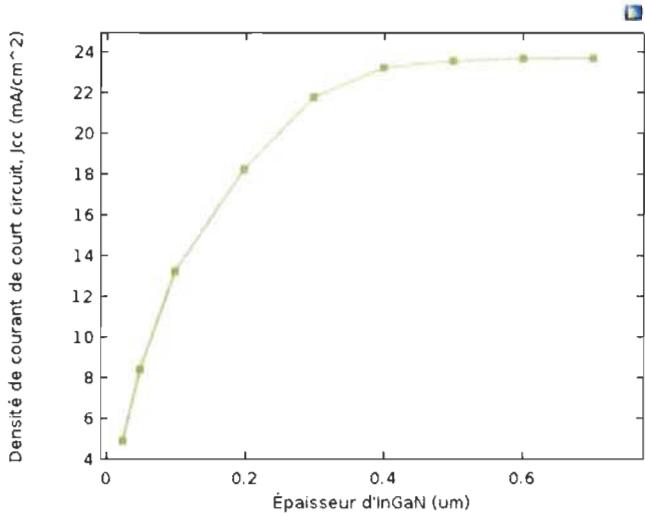


Figure 5. 20 Densité de courant de court-circuit (J_{cc}) en fonction de la variation de l'épaisseur d'InGaN [109, MIMOUNE].

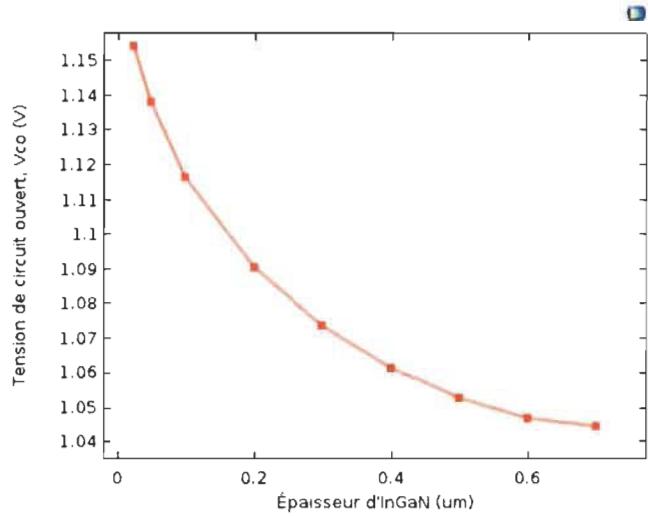


Figure 5. 21 Tension de circuit ouvert (V_{co}) en fonction de la variation de l'épaisseur d'InGaN [109, MIMOUNE].

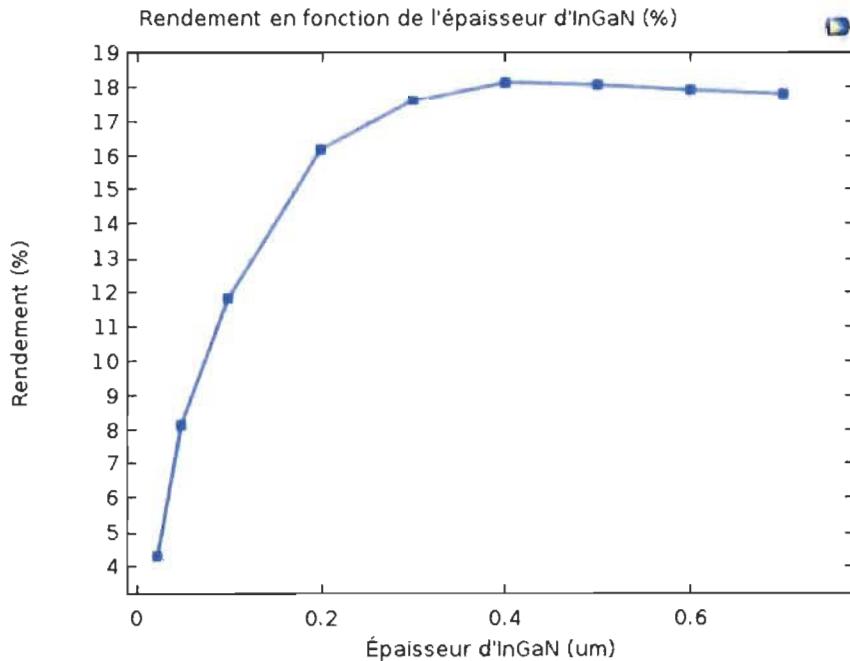


Figure 5. 22 Rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur d'InGaN [109, MIMOUNE].

D'après les résultats obtenus des caractéristiques courant-tension illustrées dans la figure (5.20), on remarque que la densité de courant est proportionnelle à l'épaisseur de la

couche active. D'où on voit que la densité de courant J_{cc} à une épaisseur d'InGaN égale à 25 nm est de seulement 4.6 mA.cm^{-2} , puis elle augmente graduellement avec l'augmentation de l'épaisseur pour atteindre une valeur de 23.7 mA.cm^{-2} à une épaisseur aux alentours de 700 nm. Cela est dû grâce à une augmentation des recombinaisons électrons-trous qui permet une meilleure absorption des photons. Arrivant à un certain niveau, la densité de courant se fixe pour commencer à se dégrader, vu qu'une très grande épaisseur de la couche va impliquer une réduction du courant à cause de la recombinaison des photons non collectés.

Si on prend la courbe de la tension en fonction de l'épaisseur de la couche active, on remarque que la tension est inversement proportionnelle à l'épaisseur contrairement au courant. D'où on remarque que la tension à une épaisseur de 25 nm est égale 1.155 V, puis cette dernière se décroît continuellement avec l'augmentation de l'épaisseur. On peut justifier cela par le gap d'énergie ou bien par l'augmentation de la densité de défauts.

Cependant, afin de conclure sur l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque, nous avons aussi tracé la courbe du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche active. D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'épaisseur de la couche d'InGaN peut avoir une influence positive sur la structure comme peut aussi avoir une influence négative. D'où on constate qu'à une certaine valeur d'épaisseur située aux alentours de 400 nm, on obtient un maximum de rendement. Ce qui revient sûrement à un compromis entre l'absorption des photons et le gap d'énergie.

On peut ajouter aussi que cette valeur optimale d'épaisseur dépendra de plusieurs facteurs tels que le dopage, la densité de défauts et la mobilité de porteurs.

5.4.2 Variation du dopage

Après avoir fait varier l'épaisseur de la couche active, dans cette deuxième étape nous allons fixer l'épaisseur de notre modèle à 200 nm et faire varier le dopage entre 8×10^{16} et $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. D'après les caractéristiques courant-tension obtenues illustrées sur la figure (5.24), on remarque que pour des dopages de l'ordre de 10^{16} la caractéristique courant-tension est quasiment la même avec une diminution négligeable du courant. Cela peut être expliqué par la diminution de mobilités de porteurs, mais pour des plus forts dopages comme le cas d'un dopage de 2×10^{17} ou de $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, le courant a une très faible valeur, voire même nulle.

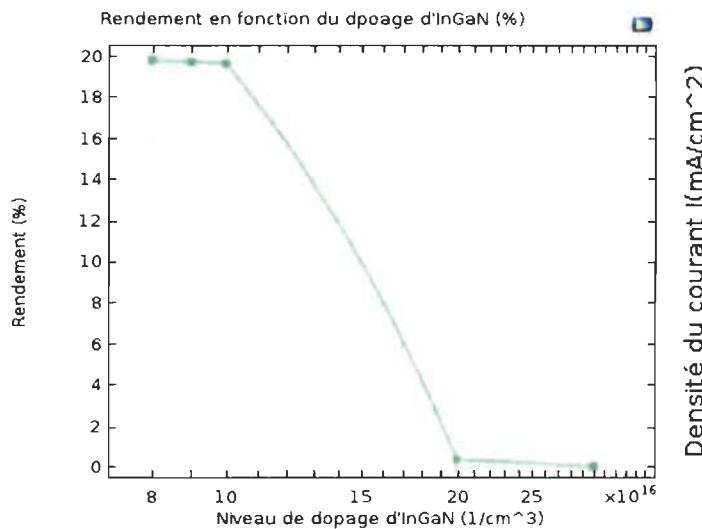


Figure 5. 23 Rendement de la cellule en fonction de la variation du dopage d'InGaN [109, MIMOUNE].

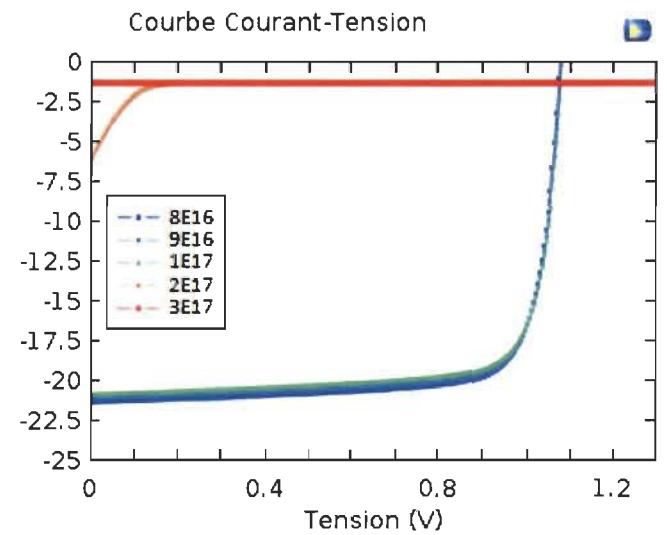


Figure 5. 24 Caractéristiques courant-tension de la structure pour différents dopages d'InGaN [109, MIMOUNE].

Ces résultats se confirment avec la courbe qui trace le rendement en fonction du dopage dans la figure (5.23), d'où on remarque un rendement de 19.8% pour des dopages inférieurs à 10^{17} cm^{-3} , qui va chuter directement après pour atteindre une valeur nulle à partir d'un dopage supérieur à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

5.4.3 Variation de la densité des défauts

Dans cette troisième phase, nous allons voir l'impact que la densité de défauts de la couche intrinsèque aura sur les caractéristiques courant-tension ainsi que le rendement de notre cellule. Pour cela, on a pris le même modèle puis on a fixé l'épaisseur de InGaN à 200 nm avec le dopage initial, c'est-à-dire 10^{18} cm^{-3} pour les couches dopées et 10^{15} cm^{-3} pour la couche active. Puis nous avons varier la densité de défauts dans un intervalle allant de 2×10^{17} à $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats obtenus sont illustrés ci-dessous.

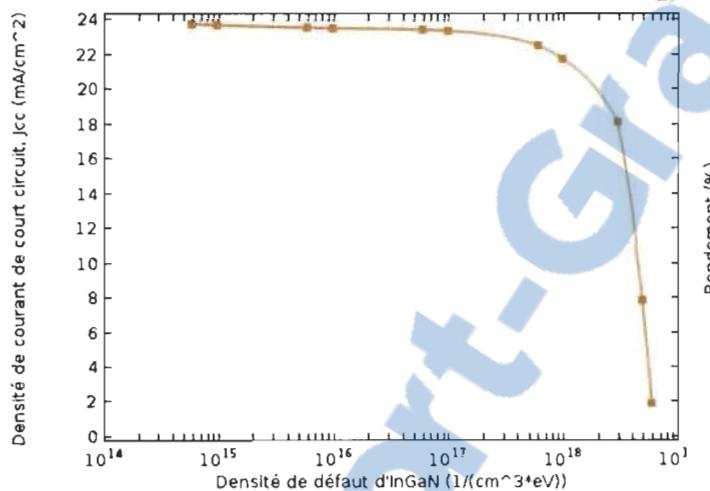


Figure 5. 25 Densité de courant de court-circuit en fonction de la variation de la densité de défauts dans l'InGaN [109, MIMOUNE].

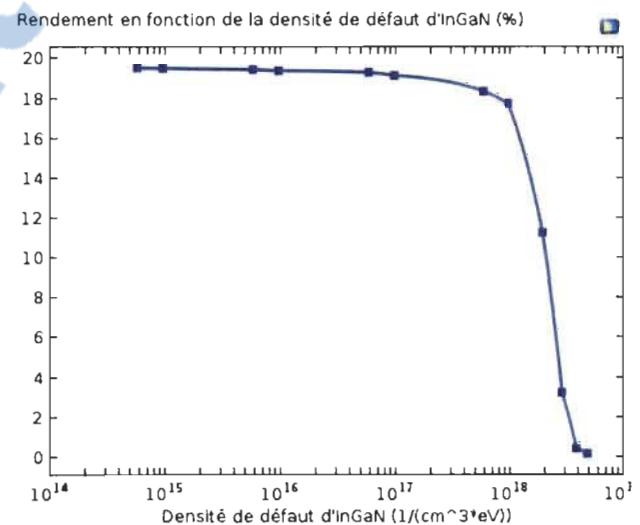


Figure 5.26 Rendement de la cellule en fonction de la variation de défauts dans l'InGaN [109, MIMOUNE].

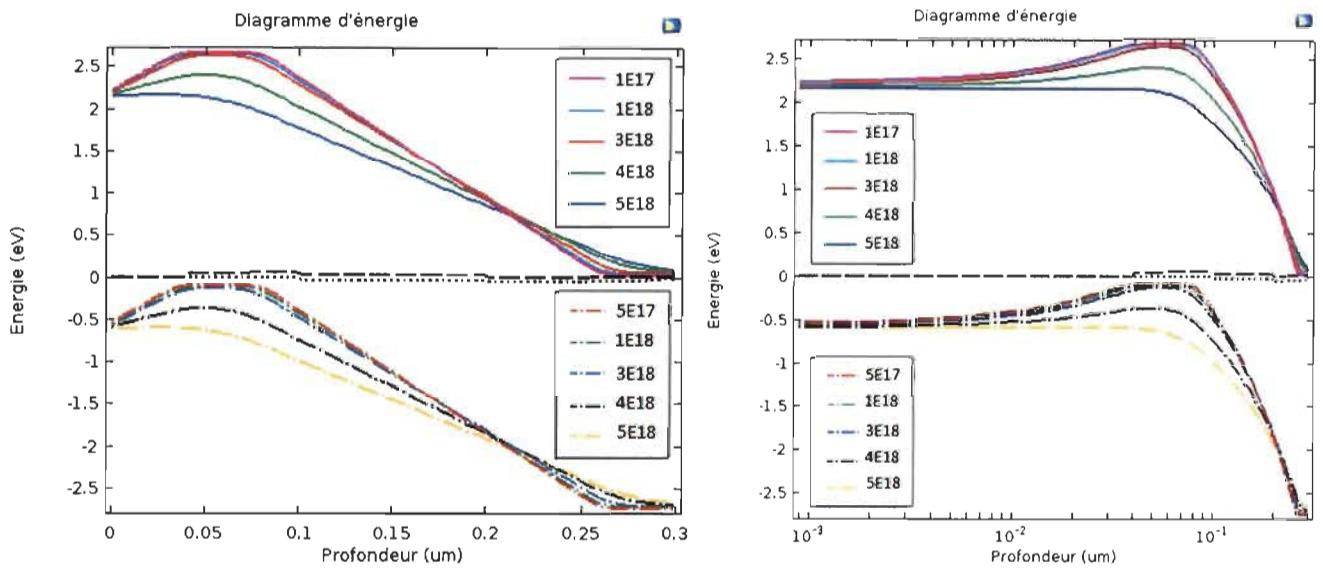


Figure 5.27 Diagrammes des niveaux d'énergie de bandes de la structure pour différentes densités de défauts dans la couche d'InGaN [109, MIMOUNE].

On peut remarquer sur la figure (5.25) qui représente le courant en fonction de la densité de défauts, que le courant est maintenu à une valeur d'à peu près 23.9 mA/cm^2 pour différentes densités de défaut. En revanche, arrivant à une densité supérieur à $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ le courant chute brutalement à cause de la très forte densité qui limite la collecte des porteurs, ce qui explique la diminution du courant. Si on regarde le diagramme des niveaux d'énergie de bandes sur la figure (5.27). On voit que le champ électrique diminue avec l'augmentation de la densité de défauts, quoi que dans l'intervalle 0.2 à 0.23 μm on remarque que les champs électriques des différentes densités de défauts se superposent et deviennent égaux. Cela peut être expliqué par l'égalité de la densité de défauts dans la couche d'InGaN avec le dopage de la couche p. La diminution de la largeur des bandes va provoquer une réduction de collectes de charges.

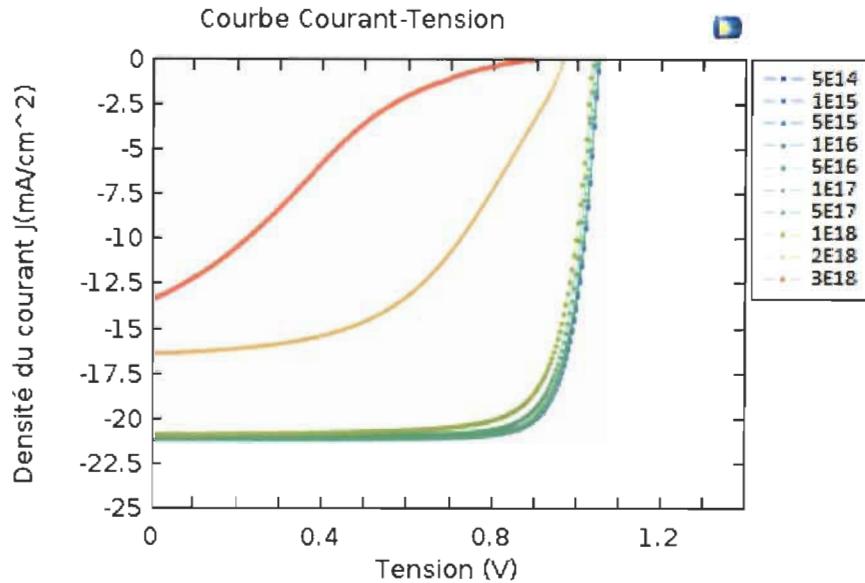


Figure 5. 28 Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes densités de défauts dans l'InGaN [109, MIMOUNE].

En ce qui concerne les caractéristiques courant-tension illustrées sur la figure (5.28), on remarque une déformation de la caractéristique courant-tension pour les fortes densités de défauts due à la barrière de potentiel résultante.

Pour conclure l'influence de la densité de défauts, on a aussi représenté la variation du rendement en fonction de la densité de défauts dans la figure (5.26). D'où on remarque clairement qu'au-delà d'une certaine valeur de densité le rendement se dégradera rapidement et deviendra nul. Cependant en dessous de ce seuil, la densité de défauts n'a quasiment aucun effet sur le rendement, mais lorsque la densité de défauts devient supérieure au dopage dans la couche p, la cellule perd toutes ces performances comme était le cas pour le dopage.

La densité de défauts a un effet similaire que le dopage, au-dessus d'un certain seuil le rendement de la cellule devient nul. Cependant, une légère variation de ces deux paramètres

n'a quasiment aucun effet sur les performances de la cellule. Ce seuil est défini par le dopage dans la couche p.

5.4.4 Variation de la concentration d'indium

Après avoir fait l'optimisation de l'épaisseur, le dopage ainsi que la densité de défauts de la couche intrinsèque de notre matériau (InGaN). Dans ce qui va suivre nous allons essayer de faire une optimisation de la concentration d'indium dans l'alliage InGaN. Afin d'obtenir une meilleure optimisation au niveau de la concentration d'indium. Nous avons fixé l'épaisseur de la couche active à 200 nm, le dopage à $9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et la densité de défaut à $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, d'abord avec la même concentration d'indium c'est-à-dire 55%. Ensuite, on a varié la concentration d'indium à 25% dans un premier temps puis à 10% pour finir.

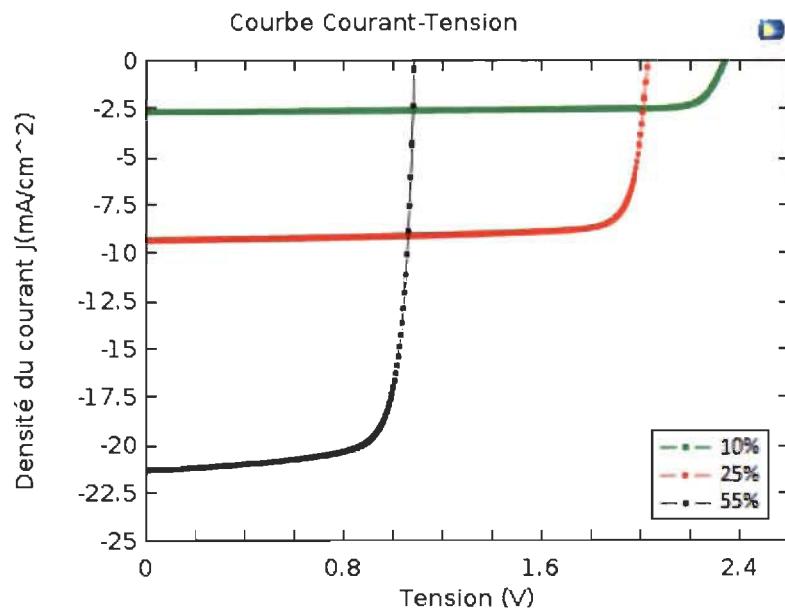


Figure 5. 29 Caractéristiques courant-tension de la cellule avec différentes concentrations d'indium dans l'InGaN [109, MIMOUNE].

La figure (5.29) représente les caractéristiques courant-tension pour les trois différentes concentrations d'indium 55%, 25% et 10%. À partir de ces résultats, on peut remarquer que la tension du circuit augmente pour des faibles concentrations d'indium. Par contre on a un moins fort courant, du fait qu'avec une faible concentration d'indium on obtient un plus large gap. Cela impliquera une moins forte absorption de photons qui est responsable de cette diminution de courant. Les rendements calculés pour les trois cas étaient d'environ 19.36%, 15.70%, et 4.02% respectivement (voir Annexe).

Cependant, une très grande concentration d'indium ne donnera pas de bons résultats non plus, il se trouve que la concentration d'indium a aussi une valeur optimale allant de 50 à 60%.

5.4.5 *Texturation*

Actuellement, on utilise dans la fabrication des cellules solaires des couches antireflets qui permettent une absorption maximale de spectre solaire. Ces couches sont généralement très minces et transparentes, fabriquées avec une texturation de la surface et ayant un indice de réfraction plus faible que celui de l'absorbeur (InGaN), afin que l'effet anti reflet opère ainsi sa permettra de minimiser les reflets de la lumière.

Afin d'évaluer les performances de notre structure avec une couche antireflet. On va ajouter une couche tampon (GaN) de 20 nm sur l'absorbeur (InGaN) dans notre structure de référence, avec une épaisseur de la couche intrinsèque de 200 nm, un dopage de $9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et une concentration d'indium de 55%. Cette fois la densité de défauts n'est pas considérée.

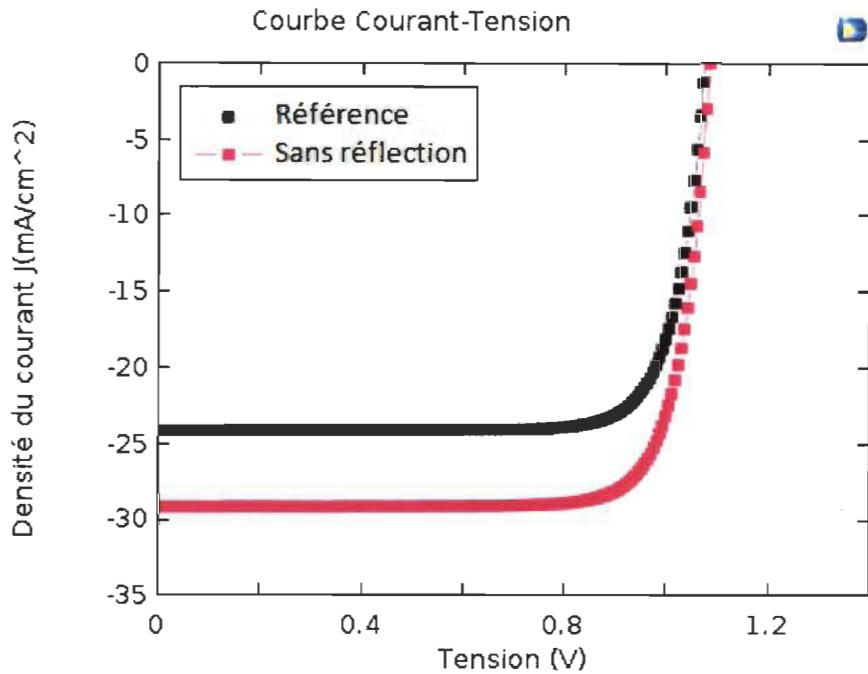


Figure 5.30 Caractéristiques courant-tension de la cellule avec l'ajout d'une couche antireflet [109, [MIMOUNE](#)].

Après avoir tracé les caractéristiques courant-tension illustrées dans la figure (5.30). On peut dire qu'on a obtenu un plus grand courant avec cette couche antireflet, dû à une plus grande absorption de lumière donc une plus grande absorption de photons.

En conclusion, la texturation de la surface nous permettra une augmentation significative du rendement.

5.5 Conclusion

Dans ce cinquième et dernier chapitre nous avons d'abord présenté le design de notre structure de la cellule solaire à modélisée, qui était à la base une cellule solaire GaN/InGaN/GaN à hétérojonction. Cependant, les résultats des simulations initiales ont présenté une certaine discontinuité au niveau des bandes, en créant des puits de potentiel responsables d'une réduction du courant. Cette réduction pourra causer une baisse

considérable dans l'efficacité de la cellule solaire. Afin de remédier à ce problème, nous avons élaboré une nouvelle structure à couches graduelles d'InGaN pour contourner le problème des trous résultants de la grande différence entre les gaps de GaN et InGaN. Ensuite, après avoir modélisé notre deuxième structure GaN-P/Grad /In_xGa_{1-x}N – I/ Grad /ZnO-N, on a démontré l'absence des trous de potentiel trouvés dans notre premier modèle par une analyse détaillée, munie d'une comparaison des résultats de simulations obtenues pour les deux structures de notre modèle.

Par la suite, nous avons fait une étude d'optimisation des différents paramètres de notre structure à couche graduelle. En premier lieu, on a fait une variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque. Après avoir obtenu une efficacité optimale, on a fixé l'épaisseur et faire varier le dopage de cette dernière afin d'obtenir l'efficacité optimale en fonction du dopage de la couche active. Ensuite, nous avons varié la densité de défauts dans cette couche. Après avoir fini avec l'optimisation des paramètres de la couche d'InGaN, nous avons également étudié l'efficacité de notre structure pour différentes concentrations d'indium. Et nous avons trouvé que le meilleur rendement était obtenu avec une concentration d'indium de 55%. Enfin, nous avons introduit une couche antireflet à notre modèle afin d'absorber le maximum qui soit de la lumière, effectivement les résultats trouvés montrent un meilleur rendement pour notre modèle.

Lors de la simulation, on a pris en considération la densité de défaut afin que notre modèle soit le plus possible proche d'un modèle réel vu qu'on n'utilise pas des couches graduelles dans les cellules industrielles.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons fait une étude détaillée d'une cellule solaire à base de matériaux ayant des dimensions nanométriques, afin de montrer l'impact de cette technologie sur l'efficacité d'une cellule solaire, ainsi que les avantages procurés pour le domaine du photovoltaïque. Ce mémoire avait pour objectif principal la modélisation d'une cellule solaire à base d'InGaN aux dimensions nanométriques. Cet alliage a fait l'objet de plusieurs sujets de recherches au cours des dernières années grâce à ces caractéristiques semi-conductrices considérées comme exceptionnelles, vu qu'il possède le plus large des gaps modulables capable de couvrir quasiment tout le spectre solaire allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. D'ailleurs le succès de l'InGaN dans le domaine de l'optoélectronique, surtout au niveau des diodes lasers et les LEDs, a fait de lui un élément clé pour les applications photovoltaïques car son utilisation dans des cellules solaires permettra d'avoir des hauts rendements à un coût concurrentiel.

Ce mémoire est réparti en cinq chapitres dont le premier chapitre se consacrait à un état d'art des technologies photovoltaïques, où on a dressé toutes les connaissances à propos de cette technologie, en commençant par quelques notions sur la source responsable dans la création de l'effet voltaïque. Ensuite nous avons décrit la cellule solaire, sa structure, son principe de fonctionnement, ses paramètres ainsi que son rôle dans un panneau photovoltaïque et enfin, on a présenté toutes les technologies photovoltaïques existantes.

Vu l'implication de notre étude dans une technologie de l'ordre du nanomètre, on a trouvé qu'il est plus que nécessaire d'aborder ce domaine de technologie. Et donc, on a

consacré le deuxième chapitre du mémoire à l'étude des nanotechnologies, en passant en revue leurs domaines d'applications, leurs propriétés électriques, magnétiques et optiques. Par la suite, on a vu l'utilisation de ces nanomatériaux dans la conversion de l'énergie au niveau d'une cellule solaire à travers l'effet quantique et celui du confinement géométrique ou optique.

Il est aussi indispensable de connaître les différentes technologies utilisées dans la fabrication de ces cellules à base de couches minces, vu qu'on va faire la modélisation d'une cellule solaire à base de cette technologie. C'est pourquoi on a réservé le troisième chapitre à l'étude des différentes technologies utilisées dans la réalisation d'une cellule photovoltaïque ainsi que le principe et les caractéristiques d'une hétérojonction dans ce genre de cellules à couches minces.

Le quatrième chapitre consistait à une introduction au cinquième et dernier chapitre. Dans ce chapitre, on a non seulement fait une étude détaillée sur l'InGaN portée sur sa structure, ses caractéristiques, ses paramètres physiques ou optiques et son intérêt pour le photovoltaïque. Mais, on a aussi cité quelques recherches réalisées à base de ce matériau pour des cellules photovoltaïques, que ce soit à simple-jonction, hétérojonction ou multijonctions. Et pour clore ce chapitre, nous avons évoqué le calcul du rendement théorique maximum.

Enfin, nous avons réalisé la modélisation d'une cellule solaire à base de notre matériau dans le dernier chapitre. Premièrement, on a proposé un modèle initial pour la structure de notre cellule puis nous avons présenté et discuté les premiers résultats obtenus. Ensuite, on a proposé un deuxième modèle à couches graduelles pour la structure de notre cellule, afin de corriger et contourner le problème de la grande différence entre les gaps des couches

constituant la cellule. Évidemment, nous avons montré avec les résultats de simulation, que l'introduction de ces couches graduelles a permis d'annuler les discontinuités de bandes trouvées dans notre modèle initial sans trop affecter l'efficacité de la cellule. Nous avons également essayé d'optimiser notre cellule, en faisant varier les différents paramètres ayant une grande influence tels que l'épaisseur de la couche active, sa densité et son dopage afin d'obtenir de meilleurs résultats. Puis, on est allé voir l'effet de différentes concentrations d'indium ainsi que l'apport d'une couche antireflet sur l'efficacité de la cellule.

Pour conclure, ce mémoire résume l'étude du développement d'une cellule photovoltaïque à base d'un matériau (InGaN), fabriqué avec les applications des nanotechnologies, en passant par les différentes techniques utilisées dans la fabrication de ce type de cellules, l'étude du matériau utilisé dans ces composants et enfin la présentation du modèle de la structure proposée.

Une optimisation des paramètres a été également effectuée ainsi que des suggestions pour une optimisation des performances de la cellule.

Bibliographie (ou Références)

- [1] B. Multon, "L'énergie sur la terre: analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique," *revue 3EI*, pp. pp. 29-38, 1998.
- [2] Q. Mauguit. (2013) les cellules photovoltaïques, cœur des panneaux solaires. Revue scientifique. *Futura sciences* 15-33.
- [3] K. Djeriouat, "Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à heterojonctions GaInP/GaAs," mémoire, Université Abou-bakr Belkaid-Tlemcen, 2011.
- [4] J. M. Navarro, "Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible," Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [5] http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp.
- [6] <https://www.cairn.info/les-energies-renouvelables--9782130576761-page-3.htm>.
- [7] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités," INSA de Lyon, 2005.
- [8] D. Diouf, "Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structures interdigitée en face arrière," Paris 11, 2010.
- [9] <http://tpesp.free.fr/effetphotovoltaïque/fonctionnement/fonctionnement.html>.
- [10] <http://tpesp.free.fr/effetphotovoltaïque/histoire/histoire.html>.
- [11] <http://tpesp.free.fr/effetphotovoltaïque/cellule/cellule.html>.
- [12] S. Mostefa Kara, "Etude et simulation de cellules photovoltaïques à Couches Minces à Base De CIS et CIGS," 2012.
- [13] L. Bailly, "Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface," Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2010.
- [14] R. H. Michel Israël, Christophe Lerouge, Raphaël Allegre, Rémi Delville. (2006) Mission pour la Science et la Technologie. *Nanosciences, Microelectronique, Materiaux*.
- [15] C. Roger, "Developpement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques", Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2013.
- [16] D. Lincot, L. Escoubas, J. F. Guillemoles, J.-J. Simon, and A. Slaoui, "Nanomatériaux pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire," pp. 9-45.

- [17] Z. A. Latif, N. A. M. Zaki, and S. A. Salleh, "GIS-based estimation of rooftop solar photovoltaic potential using LiDAR," in *Signal Processing and its Applications (CSPA), 2012 IEEE 8th International Colloquium on*, 2012, pp. 388-392.
- [18] M. Abdelhak, "Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique," Université El Hadj Lakhdar de Batna.
- [19] J. Xue, S. Uchida, B. P. Rand, and S. R. Forrest, "Asymmetric tandem organic photovoltaic cells with hybrid planar-mixed molecular heterojunctions," *Applied Physics Letters*, vol. 85, pp. 5757-5759, 2004.
- [20] M.-H. Kao, T.-G. Chen, M.-A. Tsai, H.-C. Chen, F.-I. Lai, S.-Y. Kuo, *et al.*, "Fabrication and simulation of antireflective nanostructures on c-Si solar cells," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2011, p. C754.
- [21] A. Dowling, R. Clift, N. Grobert, D. Hutton, R. Oliver, O. O'neill, *et al.*, "Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties," *London: The Royal Society & The Royal Academy of Engineering Report*, pp. 61-64, 2004.
- [22] V. Fthenakis, H. C. Kim, S. Gualtero, and A. Bourtsalas, "Nanomaterials in PV manufacture: Some life cycle environmental- and health-considerations," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE*, 2009, pp. 002003-002008.
- [23] <http://les-nanotechnologies.e-monsite.com/pages/definition-et-principe/definition-et-origine-de-la-nanotechnologie.html>.
- [24] <http://agora.qc.ca/dossiers/nanotechnologie>.
- [25] M. Zitouni, "Élaboration sur wafer Si (100) et (111) de couches sensibles de (ZnO) par électrocrystallisation en vue d'application dans les domaines de l'optoelectronique et des capteurs," Thèse, Hadj Lakhder - Batna, 2011.
- [26] J. L. F. Monfort-Windels. (2008) Les applications des nanotechnologies. *Sirris driving industry by technology*.
- [27] A. Lefrançois, "Synthèse de nanocristaux de type Chalcopyrite en vue d'applications en cellules solaires," Grenoble, 2013.
- [28] M. Madani, "'Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces'," Mémoire de Magister à l'Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [29] <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovations-th10/nanosciences-concepts-caracterisation-et-aspects-securite-42194210/les-nanotechnologies-du-fondamental-aux-applications-nm112/>.
- [30] <http://nanotek.e-monsite.com/pages/les-nanotechnologies-domaines-d-application.html>.
- [31] http://www.memoireonline.com/11/12/6461/m_Methodes-de-synthese-des-nanomateriaux5.html.
- [32] D. Lincot, L. Escoubas, J. F. Guillemoles, J.-J. Simon, and A. Slaoui, "Chapitre 5: Nanomatériaux pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire," pp. 9-50.

- [33] T. K. Manna and S. M. Mahajan, "Nanotechnology in the Development of Photovoltaic Cells," in *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on*, 2007, pp. 379-386.
- [34] A. Piegari and F. Flory, *Optical thin films and coatings: From materials to applications*: Elsevier, 2013.
- [35] S.-I. Na, S.-S. Kim, J. Jo, and D.-Y. Kim, "Efficient and flexible ITO-free organic solar cells using highly conductive polymer anodes," *Adv. Mater.*, vol. 20, pp. 4061-4067, 2008.
- [36] E. Samulski, R. Lopez, D.-H. Ko, and J. Tumbleston, "Photonic Crystal Geometry for Organic Solar Cells," in *APS Meeting Abstracts*, 2010, p. 16007.
- [37] F. N. Belhocine, "Étude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques," Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou-Algérie, 2013.
- [38] L. Guyot, "Intégration sur silicium de capteurs plasmoniques à base de nanostructures périodiques," École Polytechnique de Montréal, 2011.
- [39] K. Catchpole and A. Polman, "Plasmonic solar cells," *Optics express*, vol. 16, pp. 21793-21800, 2008.
- [40] V. Ferry, M. Verschuuren, H. Li, E. Verhagen, R. Walters, R. Schropp, *et al.*, "Light trapping in thin film plasmonic solar cells," in *Proc. 25th EU-PVSEC Conference, Valencia*, 2010.
- [41] D. Lincot. (2008) appel international de scientifiques pour l'accélération du développement de l'énergie photovoltaïque. *Les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat*.
- [42] https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_mince.
- [43] S. Hariech, "Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD)," Mémoire de Magistère de l'université Mentouri-Constantine, 2009.
- [44] B. Rezgui, Optical, electrical and structural properties of silicon nanoparticles embedded in a dielectrical matrix for highly efficient solar cells application," 2010.
- [45] P. Panse, "Copper gallium diselenide solar cells: Processing, characterization and simulation studies," 2003.
- [46] C. Ornaghi, M. Stöger, G. Beaucarne, J. Poortmans, and P. Schattschneider, "Thin film polycrystalline silicon solar cell on ceramics with a seeding layer formed via aluminium-induced crystallisation of amorphous silicon," *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*, vol. 150, pp. 287-292, 2003.
- [47] A. Ricaud. (2009) Modules photovoltaïques Filières technologiques. *Cythelia*.
- [48] Chapter 7. Thin-Film Silicon Solar Cells. Available: http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/SolarCells/res00030/CH7_Thin_film_Si_solar_cells.pdf

- [49] A. V. Shah, M. Vaněček, J. Meier, F. Meillaud, J. Guillet, D. Fischer, *et al.*, "Basic efficiency limits, recent experimental results and novel light-trapping schemes in a-Si: H, μ -Si: H and micromorph tandem solar cells," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 338, pp. 639-645, 2004.
- [50] S. Amtablian, "Du transfert de films minces de silicium monocristallin vers un procédé cellule à faible budget thermique," PhD Thèse, INSA de Lyon, 2008.
- [51] P. Papet, "Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin," INSA de Lyon, 2007.
- [52] A. Zerga, A. Slaoui, J. Muller, D. Ballutaud, A. Messant, and N. L. Quang, "Étude d'un nouveau concept d'émetteur sélectif de cellules photovoltaïques à base de silicium multicristallin," *Rencontres et Journées Techniques sur les Matériaux, Procédés et Systèmes pour la Conversion Photovoltaïque de l'Énergie Solaire*, p. Actes pp. 70, 2005.
- [53] L. C. Tom Markvart, *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation* Great Britain, 2005.
- [54] R. Noufi and K. Zweibel, "High-Efficiency CdTe and CIGS Thin-Film Solar Cells: Highlights and Challenges," in *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, 2006, pp. 317-320.
- [55] A. Bouraoui, "Élaboration et caractérisation des couches minces CuInSe2 par électrodéposition," Thèse, Mentouri Constantine, Algérie, 2009.
- [56] J.-F. G. Daniel Lincot. (2010) Cellules solaires en couches minces à base de CuInSe2. *Reflet de la Physique*
- [57] K. Ramanathan, M. A. Contreras, C. L. Perkins, S. Asher, F. S. Hasoon, J. Keane, *et al.*, "Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe2 thin-film solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 225-230, 2003.
- [58] E. Ahmed, R. Pilkington, A. Hill, M. Amar, W. Ahmed, H. Taylor, *et al.*, "Effects of H⁺ ion implantation and annealing on the properties of CuIn0.75Ga0.25Se2 thin films," *Journal of materials engineering and performance*, vol. 16, pp. 119-122, 2007.
- [59] P. Pradhan, D. Attygalle, P. Aryal, N. J. Podraza, A. S. Ferlauto, S. Marsillac, *et al.*, "Real time spectroscopic ellipsometry of first stage: Indium-gallium selenide co-evaporation," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013 IEEE 39th*, 2013, pp. 0414-0419.
- [60] S. Dhellemmes, "Contribution à l'étude de l'épitaxie par jets moléculaires à grande échelle de semi-conducteurs phosphorés," Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2006.
- [61] I. Gorczyca, A. Svane, and N. Christensen, "Theory of point defects in GaN, AlN, and BN: Relaxation and pressure effects," *Physical Review B*, vol. 60, p. 8147, 1999.

- [62] I. Akasaki, H. Amano, N. Koide, M. Kotaki, and K. Manabe, "Conductivity control of GaN and fabrication of UV/blue GaN light emitting devices," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 185, pp. 428-432, 1993.
- [63] H. Hovel and J. Cuomo, "Electrical and Optical Properties of rf-Sputtered GaN and InN," *Applied Physics Letters*, vol. 20, pp. 71-73, 1972.
- [64] K. Osamura, K. Nakajima, Y. Murakami, P. H. Shingu, and A. Ohtsuki, "Fundamental absorption edge in GaN, InN and their alloys," *Solid State Communications*, vol. 11, pp. 617-621, 1972.
- [65] L. Liu and J. H. Edgar, "Substrates for gallium nitride epitaxy," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 37, pp. 61-127, 2002.
- [66] J. H. Edgar, "Properties of group III nitrides," 1994.
- [67] J. Wu, "When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, p. 011101, 2009.
- [68] I. Vurgaftman and J. Meyer, "Band parameters for nitrogen-containing semiconductors," *Journal of Applied Physics*, vol. 94, pp. 3675-3696, 2003.
- [69] D. Fritsch, H. Schmidt, and M. Grundmann, "Band dispersion relations of zinc-blende and wurtzite InN," *Physical Review B*, vol. 69, p. 165204, 2004.
- [70] L. C. de Carvalho, A. Schleife, and F. Bechstedt, "Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN polytypes," *Physical Review B*, vol. 84, p. 195105, 2011.
- [71] L. Vegard, "Die konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome," *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, vol. 5, pp. 17-26, 1921.
- [72] J. Wu, W. Walukiewicz, K. Yu, J. Ager, S. Li, E. Haller, *et al.*, "Universal bandgap bowing in group-III nitride alloys," *Solid State Communications*, vol. 127, pp. 411-414, 2003.
- [73] H. Morkoç, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Materials Properties, Physics and Growth* vol. 1: John Wiley & Sons, 2009.
- [74] A. Mesrane, F. Rahmoune, A. Mahrane, and A. Oulebsir, "Design and Simulation of InGaN-Junction Solar Cell," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2015, 2015.
- [75] V. Gorge, "Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V," Université Paris Sud-Paris XI, 2012.
- [76] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/types-of-recombination>.
- [77] GaN-Gallium nitride. Electronic archive. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties. Ioffe Physico-Technical Institute. [Online].
- [78] InN - Indium Nitride. New Semiconductor Materials. Characteristics and properties. Ioffe Physico-Technical Institute. [Online].

- [79] 123.Optical constants of GaN (Gallium nitride). RefractiveIndex.Info. [Online] 2011.[Cited:1223.[Online].Available: <http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=GaN>
- [80] M. Anani, H. Abid, Z. Chama, C. Mathieu, A. Sayede, and B. Khelifa, "In_xGa 1-xN refractive index calculations," *Microelectronics Journal*, vol. 38, pp. 262-266, 2007.
- [81] Y. E. Gmili, "Étude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque," Université de Lorraine, 2013.
- [82] R. Singh, D. Doppalapudi, T. Moustakas, and L. Romano, "Phase separation in InGaN thick films and formation of InGaN/GaN double heterostructures in the entire alloy composition," *Applied Physics Letters*, vol. 70, pp. 1089-1091, 1997.
- [83] J. Trainor and K. Rose, "Some properties of InN films prepared by reactive evaporation," *Journal of Electronic Materials*, vol. 3, pp. 821-828, 1974.
- [84] C. Parker, J. Roberts, S. Bedair, M. Reed, S. Liu, and N. El-Masry, "Determination of the critical layer thickness in the InGaN/GaN heterostructures," *Applied Physics Letters*, vol. 75, p. 2776, 1999.
- [85] http://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivité_thermique.
- [86] <http://cellule-photovoltaïque.e-monsite.com/pages/le-dopage-des-cellules-photovoltaïques.html>.
- [87] N. Koide, H. Kato, M. Sassa, S. Yamasaki, K. Manabe, M. Hashimoto, *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*, vol. 115, pp. 639-642, 1991.
- [88] W. Walukiewicz, "Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors," *Physics B: Condensed Matter*, vol. 302, pp. 123-134, 2001.
- [89] Wang, X. and al, ET. Applied Physics, 2008
- [90] S. Mokkapati and C. Jagadish, "III-V compound SC for optoelectronic devices," *Materials Today*, vol. 12, pp. 22-32, 2009.
- [91] T. Kuykendall, P. Ulrich, S. Aloni, and P. Yang, "Complete composition tunability of InGaN nanowires using a combinatorial approach," *Nature materials*, vol. 6, pp. 951-956, 2007.
- [92] J. Wu, W. Walukiewicz, K. Yu, W. Shan, J. Ager Iii, E. Haller, *et al.*, "Superior radiation resistance of In_{1-x}Ga_xN alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system," *Journal of Applied Physics*, vol. 94, pp. 6477-6482, 2003.
- [93] S. Zeng, B. Zhang, J. Sun, J. Cai, C. Chen, and J. Yu, "Substantial photo-response of InGaN p-i-n homojunction solar cells," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 24, p. 055009, 2009.
- [94] X. Chen, K. Matthews, D. Hao, W. Schaff, and L. Eastman, "Growth, fabrication, and characterization of InGaN solar cells," *physica status solidi (a)*, vol. 205, pp. 1103-1105, 2008.

- [95] X.-m. Cai, S.-w. Zeng, and B.-p. Zhang, "Fabrication and characterization of InGaN pin homojunction solar cell," *Applied Physics Letters*, vol. 95, p. 3504, 2009.
- [96] P. Faine, S. Kurtz, and J. Olson, "Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell and coating thicknesses as adjustable parameters," in *Photovoltaic Specialists Conference, 1990., Conference Record of the Twenty First IEEE*, 1990, pp. 339-344.
- [97] S. R. Kurtz, P. Faine, and J. Olson, "Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter," *Journal of Applied Physics*, vol. 68, pp. 1890-1895, 1990.
- [98] L. Hsu and W. Walukiewicz, "Modeling of InGaN/Si tandem solar cells," *Journal of Applied Physics*, vol. 104, p. 024507, 2008.
- [99] P. Huang, H. Zong, J.-j. Shi, M. Zhang, X.-h. Jiang, H.-x. Zhong, *et al.*, "Origin of 3.45 eV Emission Line and Yellow Luminescence Band in GaN Nanowires: Surface Microwire and Defect," *ACS nano*, vol. 9, pp. 9276-9283, 2015.
- [100] I. M. Pryce, D. D. Koleske, A. J. Fischer, and H. A. Atwater, "Plasmonic nanoparticle enhanced photocurrent in GaN/InGaN/GaN quantum well solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 96, p. 153501, 2010.
- [101] X. Jun-Jun, C. Dun-Jun, L. Bin, X. Zi-Li, J. Ruo-Lian, Z. Rong, *et al.*, "Au/Pt/InGaN/GaN heterostructure schottky prototype solar cell," *Chinese Physics Letters*, vol. 26, p. 098102, 2009.
- [102] J.-Y. Duboz. (1995) Matériaux semi-conducteurs à grand gap III-V à base de GaN, Laboratoire de Physique des Composants au Laboratoire Central de Recherches de Thomson-CSF, Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique, 1995. *Techniques de l'Ingénieur*, .
- [103] S. Bremner, M. Levy, and C. B. Honsberg, "Analysis of tandem solar cell efficiencies under AM1. 5G spectrum using a rapid flux calculation method," *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, pp. 225-233, 2008.
- [104] <https://www.comsol.fr/products>.
- [105] https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics.
- [106] G. Brown, J. Ager, W. Walukiewicz, and J. Wu, "Finite element simulations of compositionally graded InGaN solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, pp. 478-483, 2010.
- [107] D. M. Caughey, and R. E. Thomas " Carrier mobilities in silicon empirically realted to doping and field " *proceeding of the IEEE*, vol. 55, pp. 2192-2193, 1967.
- [108] D. J. Roulston, N. D. Arora, and S. G. Chamberlain, "Modeling and measurement of minority-carrier lifetime versus doping in diffused layers of n-p silicon diodes," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 29, pp. 284-285, 1982.
- [109, MIMOUNE] Contribution de l'auteur. Trauvaux effectués par M. Mimoune, mémoire de maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.

Annexe A – Organigramme du programme de simulation [109, MIMOUNE]



Annexe B – Face avant COMSOL Multiphysics

1. Démonstration de quelques équations et paramètres sur l'interface COMSOL [109,

MIMOUNE]

Analytic Doping Model

Show equation assuming:

Study 1: Preliminary study, Stationary

$$N_D = N_D^{pew}$$

$$N_A = N_A^{pew} + N_{D0} \exp \left(- \left[\left(\frac{r_n}{l_d} \right)^2 + \left(\frac{r_p}{l_d} \right)^2 \right] \right)$$

$$l_d = \frac{d_j}{\sqrt{\ln \left(\frac{N_{D0}}{N_b} \right)}}$$

Coordinate System Selection

Coordinate system: Global coordinate system

Continuation Settings

Distribution: Box

Impurity: Donor doping (n-type)

Donor concentration: $N_{D0} = 1e18 [1/cm^3]$

Uniform Region

Profile: Gaussian

Specify profile length scale: Junction depth

Junction depth: $d_j = 0.1[\mu m]$

Background doping concentration: $N_b = User defined$

Acceptor doping (p-type)

Analytic Doping Model

Continuation Settings

Distribution: Box

Impurity: Donor doping (n-type)

Donor concentration: $N_{D0} = 1e18 [1/cm^3]$

Uniform Region

Profile: Gaussian

Specify profile length scale: Junction depth

Junction depth: $d_j = 0.1[\mu m]$

Background doping concentration: $N_b = User defined$

1e15 [1/cm^3]

Continuity/Heterojunction

Override and Contribution

Equation

Show equation assuming:

Study 1: Preliminary study, Stationary

$$n_1 = n_2 \frac{N_{c1} Y_{n1}}{N_{c2} Y_{n2}} \exp \left(\frac{\Delta E_c}{k_B T_f} \right)$$

$$p_2 = p_1 \frac{N_{v2} Y_{p2}}{N_{v1} Y_{p1}} \exp \left(\frac{\Delta E_v}{k_B T_f} \right)$$

$$J_{n2} = - \left(V_{n1} n_1 \exp \left(\frac{-\Delta E_c}{k_B T_f} \right) - V_{n2} n_2 \right) q, \quad V_n = A_n^* \frac{T_f^2}{q N_c}$$

$$J_{p2} = - \left(V_{p1} p_1 \exp \left(\frac{-\Delta E_v}{k_B T_f} \right) - V_{p2} p_2 \right) q, \quad V_p = A_p^* \frac{T_f^2}{q N_v}$$

$$D_1 = D_2$$

Continuation Settings

Continuation type: No continuation

Heterojunction

Continuity model: Thermionic emission

Metal Contact

Override and Contribution

Equation

Show equation assuming:

Study 1: Preliminary study, Stationary

$$V = V_a + \frac{k_B T}{q} \text{arsinh}((N_D - N_A)/2n_i) - \chi - (E_g/2q - k_B T/2q \ln(N_v/N_c))$$

$$n = \frac{1}{2} (N_d^+ - N_s^-) + \frac{1}{2} \sqrt{(N_d^+ - N_s^-)^2 + 4 \gamma_n \gamma_p n_i \text{eff}}$$

$$p = n - \frac{1}{2} (N_d^+ - N_s^-) + \frac{1}{2} \sqrt{(N_d^+ - N_s^-)^2 + 4 \gamma_n \gamma_p n_i \text{eff}}$$

$$V = \frac{k_B T}{q} \left(\ln \left(\frac{n}{\gamma_n \gamma_i \text{eff}} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) \right) - \frac{1}{q} (\Delta E_f + \frac{1}{2} E_g) - \chi + V_0$$

$$\Delta E_f = \frac{k_B T}{2q} \left(T \ln \left(\frac{N_v(T)}{N_c(T)} \right) - T_0 \ln \left(\frac{N_v(T_0)}{N_c(T_0)} \right) \right) + \chi^0(T_0) - \chi^0(T) + \frac{1}{2q} (E_g^0(T_0) - E_g^0(T))$$

$$J_n \cdot n = -q v_n (n - n_0), \quad J_p \cdot n = q v_p (p - p_0)$$

$$n_0 = N_c \exp \left(-\frac{\Phi_m - \chi}{k_B T_f} \right), \quad p_0 = N_v \exp \left(\frac{E_g - \Phi_m + \chi}{k_B T_f} \right)$$

$$V = -\Phi_m - \frac{1}{q} \Delta E_f + V_0$$

Terminal

Trap-Assisted Recombination

Equation

Show equation assuming:

Study 1: Preliminary study, Stationary

$$R_n = \frac{n p - \gamma_n \gamma_p n_i \text{eff}^2}{r_p (n + n_i) + r_n (p + p_i)}, \quad R_n = R_p$$

$$n_i = \gamma_n n_i \text{eff} \exp \left(\frac{\Delta E_t}{k_B T} \right), \quad p_i = \gamma_p p_i \text{eff} \exp \left(\frac{\Delta E_t}{k_B T} \right)$$

$$n_i \text{eff} = \sqrt{N_{v0} N_{p0}} \exp \left(-\frac{E_g - \Delta E_g}{2k_B T} \right), \quad \Delta E_t = E_t - E_i$$

Trap-Assisted Recombination

Domain trapping model: Shockley-Read-Hall model

Shockley-Read-Hall Recombination

Electron lifetime, SRH: $r_n = User defined$

Hole lifetime, SRH: $r_p = User defined$

Material Properties					
▼ Material Contents					
»	Property	Name	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/>	Relative permittivity	epsilon	9.7	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Band gap	Eg0	InGaN_bg	V	Semiconductor material
<input checked="" type="checkbox"/>	Electron affinity	chi0	4.6[V]	V	Semiconductor material
<input checked="" type="checkbox"/>	Effective density of states, vale...	Nv	(T/1[K])...	1/m ³	Semiconductor material
<input checked="" type="checkbox"/>	Effective density of states, cond...	Nc	(T/1[K])...	1/m ³	Semiconductor material
<input checked="" type="checkbox"/>	Electron mobility	mun	1148(cm...)	m ² /(V·s)	Semiconductor material
<input checked="" type="checkbox"/>	Hole mobility	mup	447(cm...)	m ² /(V·s)	Semiconductor material
<input checked="" type="checkbox"/>	Auger recombination factor, el...	Cn	1.7e-30[...]	m ⁶ /s	Auger recombination
<input checked="" type="checkbox"/>	Auger recombination factor, h...	Cp	1.7e-30[...]	m ⁶ /s	Auger recombination
<input checked="" type="checkbox"/>	Electron lifetime, SRH	taun	1.7e-9	s	Shockley-Read-Hall reco...
<input checked="" type="checkbox"/>	Hole lifetime, SRH	taup	0.65e-9	s	Shockley-Read-Hall reco...
	Thermal conductivity	k	130[W/(...)]	W/(m·K)	Basic
	Density	rho	6070[kg/...]	kg/m ³	Basic
	Heat capacity at constant press...	Cp	490(J/(kg...))	J/(kg·K)	Basic

La face avant du programme COMSOL Multiphysics correspond à l'interface entre l'utilisation et le programme. Le COMSOL est équipé de différents contrôles, qui nous permettent de définir la physique ou les physiques de notre système, les caractéristiques de son environnement ainsi que les équations, les paramètres et leurs valeurs.

Dans les cinq tableaux ci-dessus, on a rassemblé quelques données utilisées lors de la simulation.

Ces tableaux illustrent les équations utilisées pour le dopage de type p et le dopage de type n avec les concentrations de ces dopages, les équations de l'hétérojonction, les équations du contacte métallique, les équations de la recombinaison Sokley-Read-Hall ainsi que les valeurs des différents paramètres électriques, optiques et thermiques des matériaux utilisés.

2. Équations utilisées pour le calcul du rendement

Nous avons calculé approximativement le rendement énergétique de la cellule pour différentes concentrations d'Indium suivant les équations suivantes : (illustrées au premier chapitre autant qu'équations (1.4) et (1.5).

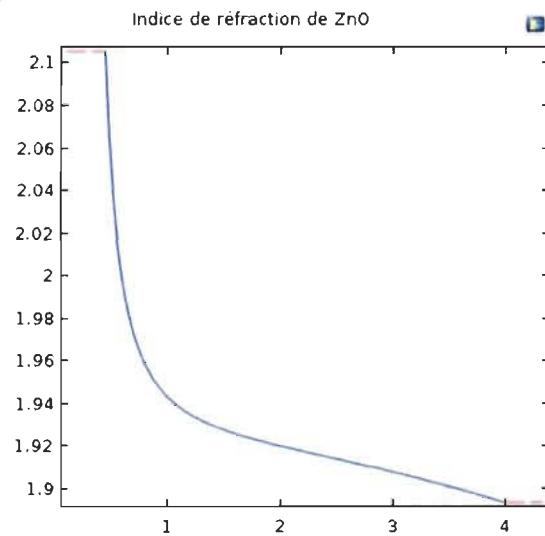
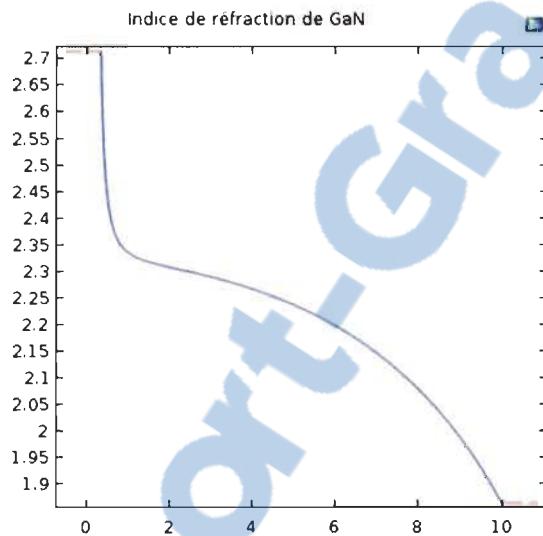
$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S}$$

$$\eta = FF V_{co} J_{cc}$$

Avec :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}}$$

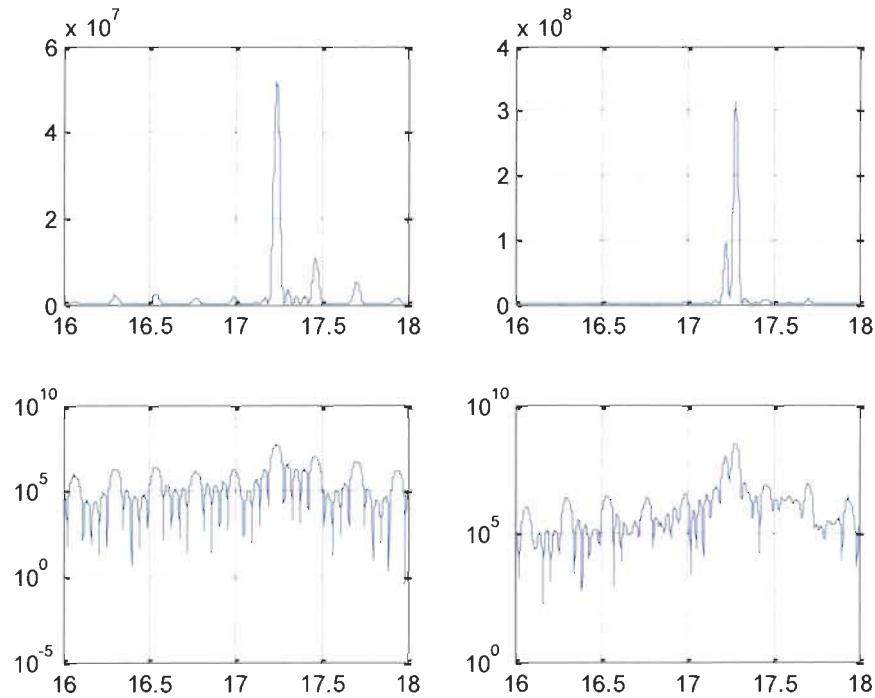
3. Indices de réfraction pour GaN et ZnO [109, MIMOUNE].



Annexe C – Résultats obtenus par Matlab

Dans un matériau ayant une structure ou morphologie cristalline comme est le cas pour l’InGaN, les courbes illustrées ci-dessous (les pics) correspondent aux modes des vibrations des atomes dans le réseau cristallin constituant l’InGaN. L’introduction d’un défaut ou d’une impureté ou même n’importe quelle contrainte dans une couche, va modifier la distance entre les atomes constituant le réseau cristallin, donnant ainsi une moins bonne structure cristalline [81].

L’InGaN présente quelques problèmes de désaccord de maille comme on l’a déjà mentionné. Pour éviter ce problème on a fait varier l’épaisseur de la couche de l’InGaN afin d’avoir une bonne structure. Les résultats sont illustrés sur les figures suivantes [109, MIMOUNE]:



Les pics illustrés sur ces figures sont appelés « pics de diffraction » donnés par la loi de Bragg [81] :

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Où :

d : est la distance entre deux plans cristallographiques.

θ : est l'angle de Bragg.

n : est l'ordre de réflexion.

λ : est la longueur d'onde.

Les quatre courbes illustrées représentent différentes épaisseurs de la couche InGaN allant de 25 à 400 nm. Où les grands pics représentent le GaN et les petits pics représentent l'In.

On remarque une bonne structure cristalline dans des couches ayant des épaisseurs allant de 25 à 200 nm.