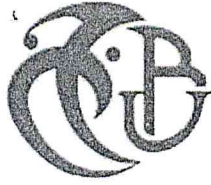


**Université Saad DAHLEB de BLIDA**



**Faculté des sciences**

***Département de physique***

*Mémoire présenté par :*

**SOUILAMAS Nesrine**

**&**

**KRIMI Romaisa**

En vue d'obtenir le diplôme de master

**Domaine :** Sciences de la matière

**Filière :** Physique

**Spécialité :** Energies renouvelables

**Option :** Conversion photovoltaïque

Sujet : ***Etude et simulation d'une structure à base de couches minces pour le photovoltaïque***

Soutenu le : 26 Juin 2014      Devant le jury composé de :

Mr EL-BEY Moussa	Maitre-assistant A	Président
Mr AISSAT Abdelkader	Professeur	Promoteur
Mr Aliane Hacem	Maitre-assistant A	Examineur

# Remerciements

Remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, volonté et patience afin d'élaborer ce modeste travail jusqu'à son terme.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers tous nos professeurs pour nous avoir inculqué leur savoir et leur savoir-faire en particulier Monsieur A. AISSAT Professeur à l'université de Blida, pour ses enseignements et ses conseils; il fut un guide précieux dans l'élaboration de ce mémoire.

Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à messieurs les membres du jury pour l'évaluation de notre travail.

Nous remercions infiniment nos très chers parents, puisse Dieu les protéger, sans omettre nos frères et sœurs pour leurs sacrifices et leur aide précieuse.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

*Resumé*

## ملخص :

في هذا العمل صببنا اهتمامنا حول دراسة و محاكاة لهيكل أساسه  $In_{1-x}Ga_xN/GaN$  و هذا لتطبيق فوتو ضوئي. هذا الخليط الثلاثي الذي هو من أشباه النواقل III-V , يمثل خصائص جد مهمة و خاصة طاقة فجوة ته بعدما أثر فيها تركيز كمية ال  $GaN$  لكي يتم تحسين امتصاص الأطياف. لقد قمنا أيضا بدراسة مختلف العناصر التي تميز الخلية الضوئية التي ساعدتنا على حساب مردودها في تحويل الطاقة الضوئية. 1

كلمات المفاتيح : التطبيق الفوتو ضوئية ؛ أشباه النواقل ؛ امتصاص ؛ مردودها.

---

## Résumé :

L'objet de notre mémoire est l'étude et la simulation d'une structure à base d' $In_{1-x}Ga_xN/GaN$  pour le photovoltaïque. Cet alliage ternaire est un semi-conducteur III-V présentant des caractéristiques intéressantes notamment par son énergie de gap donnant une meilleure amélioration de l'absorption des photons.

Notre étude a également porté sur la simulation des différents paramètres caractérisant la cellule solaire afin de calculer son rendement de conversion photovoltaïque.

**Mots clés :** Photovoltaïque; Semi-conducteur; Absorption; Rendement.

---

## Abstract :

In this work, we were interested about the study and the simulation of a structure based on  $In_{1-x}Ga_xN/GaN$  for photovoltaic. This ternary alloy who is an III-V semiconductor present an important characteristics especially its band-gap energy, thus the enhancement of the absorption of photons with wave-lengths near to red. We had also studied a different parameters characterized the solar cell which served us to calculate the efficiency of photovoltaic conversion.

**Keywords:** Photovoltaic; Semiconductor; Absorption; Efficiency.



# *Abréviations*

## Liste des acronymes et abréviations

### Généraux

AM	Air mass (masse d'air)	
ARC	Couche antireflet	
c	Vitesse de la lumière	299 792 458 m.s <sup>-1</sup>
Ga	Gallium	
h	Constante de Planck	4,136×10 <sup>-15</sup> eV.s
In	Indium	
k	Constante de Boltzmann	8,617×10 <sup>-5</sup> eV.K <sup>-1</sup>
N	Azote	
m <sub>0</sub>	Masse d'un électron	0,511 MeV.c <sup>-2</sup>
q	Charge élémentaire	1,602×10 <sup>-19</sup> C
T	Température	K
x	Concentration	

### Paramètres structurels

a	Paramètre de maille d'un cristal dans le plan	Å
C <sub>11</sub>	Constante élastique selon l'axe x	GPa
C <sub>12</sub>	Constante élastique dans le plan (x,y)	Gpa
hc	Epaisseur critique	
ν	Coefficient de Poisson	GPa
w	Largeur de la zone de charge d'espace	
ε	Déformation ou désaccord paramétrique	

### Paramètres électriques

b	Paramètre de courbure dans la loi de Vegard	eV
D	Coefficient de diffusion des porteurs	cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
E	Energie du photon	eV
E <sub>c</sub>	Energie de la bande de conduction	eV
E <sub>g</sub>	Energie de la bande interdite d'un matériau (Gap)	eV
E <sub>g</sub> <sup>cont</sup>	Gap contraint	eV
E <sub>g</sub> <sup>ncont</sup>	Gap non contraint	eV
EQE	Efficacité quantique externe	
E <sub>v</sub>	Energie de la bande de valence	eV
E <sub>v,moy</sub> <sup>hy</sup>	Centre de gravité de la bande de valence	
FF	Facteur de forme	s.d
I	Courant	A
I <sub>cc</sub>	Courant de court-circuit	A
I <sub>mp</sub>	Courant maximum	A
I <sub>obs</sub>	Courant d'obscurité	A
I <sub>ph</sub>	Courant photo-généré	A
I <sub>0</sub>	Courant de saturation	A
J	Densité de courant	A.cm <sup>-2</sup>



$J_{cc}$	Densité de courant de court-circuit	$A.cm^{-2}$
$J_{obs}$	Densité de courant d'obscurité	$A.cm^{-2}$

### Paramètres électriques (suite)

$J_{ph}$	Densité de courant photo-généré	$A.cm^{-2}$
$J_0$	Densité de courant de saturation	$A.cm^{-2}$
$k$	Vecteur d'onde	$cm^{-1}$
$L$	Longueur de diffusion des porteurs	$m$
$m_e$	Masse d'un électron dans la bande de conduction	$MeV.c^{-2}$
$m_e^*$	Masse effective d'un électron	$MeV.c^{-2}$
$N_a$	Densité de dopants accepteurs ionisés dans un matériau P	$cm^{-3}$
$N_c$	Densité d'états au bord de la bande de conduction	$cm^{-3}$
$N_d$	Densité de dopants donneurs ionisés dans un matériau N	$cm^{-3}$
$N_v$	Densité d'états au bord de la bande de valence	$cm^{-3}$
$n$	Densité d'électrons libres	$cm^{-3}$
$n_i$	Densité de porteurs libres intrinsèques	$cm^{-3}$
$n_{id}$	Coefficient d'idéalité d'une diode	s.d.
$p$	Densité de trous libres	$cm^{-3}$
$P$	Puissance incidente	$W.m^{-2}$
$P_{max}$	Puissance maximale fournie par une cellule	$W.m^{-2}$
$\tau$	Temps de vie des porteurs	$s$
$\mu$	Mobilité des porteurs	$m.s^{-1}$
$V$	Potentiel	$V$
$V_{mp}$	Tension maximale fournie par une cellule	$V$
$V_{oc}$	Tension de circuit ouvert	$V$
$\Delta_0$	Energie du spin orbite	
$\Delta E_{hh}$	Décalage d'énergie de la bande des trous légers	
$\Delta E_{hy}$	Décalage énergétique induit par la contrainte hydrostatique	
$\Delta E_{lh}$	Décalage d'énergie de la bande des trous lourds	
$\Delta E_{sh}$	Décalage énergétique induit par la contrainte de cisaillement	
$\eta$	Rendement de conversion	(%)

### Paramètres optiques

$\alpha$	Coefficient d'absorption	$cm^{-1}$
$n$	Indice de réfraction	s.d.
$\lambda$	Longueur d'onde d'un photon	$\mu m$
$R$	Coefficient de réflexion	(%)
$\nu$	Fréquence d'un photon	$cm^{-1}$

# *Sommaire*





## CHAPITRE II : L'étude du matériau $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$

II.1. Introduction-----	30
II.2. Description du nitrure de gallium-indium $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ -----	31
II.3. Les caractéristiques structurelles -----	31
II.3.1. Paramètre de maille -----	32
II.3.2. La contrainte-----	33
II.3.3. L'épaisseur critique-----	36
II.3.4. Evolution du gap d'énergie dans l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ -----	37
II.3.4.1. Gap d'énergie sans contrainte-----	37
II.3.4.2. L'effet de la contrainte sur le Gap d'énergie-----	39
II.3.4.3. Gap d'énergie avec contrainte-----	43
II.4. Les propriétés optiques-----	44
II.4.1. Le coefficient d'absorption-----	45
II.4.2. L'indice de réfraction -----	47
II.4.3. Le coefficient de réflexion -----	48
	49
II.5. Conclusion -----	

## CHAPITRE III : Simulation et résultats

III.1. Introduction-----	50
III.2. L'efficacité quantique externe-----	51
III.3. La caractéristique courant-tension -----	52
III.3.1. Courant de court-circuit-----	54
III.3.2. Tension de circuit ouvert-----	55
III.4. La puissance -----	55
III.5. Le facteur de forme -----	56
III.6. Le rendement $\eta$ -----	57
III.7. Conclusion-----	59
	60
CONCLUSION-----	61
Annexes-----	
Bibliographie-----	63

# *Introduction*

# Introduction

Dans le domaine de l'énergie, le point commun des travaux de recherche réalisés jusqu'à ce jour est de contribuer à une meilleure compréhension et conversion de nouvelles sources autres que les combustibles fossiles.

Il a fallu 300 millions d'années à la terre pour produire 1700 milliards de barils de pétrole et quelques centaines d'années à l'homme pour les épuiser. Nous avons déjà utilisé la moitié du pétrole accessible de la planète et les ressources se tariront, selon les spécialistes en la matière vers l'an 2050. L'évolution de toute source non renouvelable traverse les mêmes phases : la découverte, l'apprentissage de son usage, sa croissance, son apogée et son déclin lorsque la source s'épuise.

Et aujourd'hui, nous continuons à privilégier la croissance au détriment de la durabilité. A ce rythme, à cette méthode, devant la croissance démographique mondiale (2000 naissances par seconde), et le développement effréné des technologies pour l'amélioration de la qualité de vie de l'homme,

l'échéance du pétrole pourrait être ramenée à une date beaucoup plus précoce à celle annoncée.

Pour l'énergie électrique, les besoins mondiaux ne cessent d'augmenter et les ressources fossiles, qui permettent de la produire, contribuent au réchauffement et à la pollution de la planète ainsi qu'aux catastrophes climatiques qui en résultent.

Pour résoudre ces problèmes majeurs, nous avons deux choix :

- Diminuer la demande en énergie et c'est une gageure devant la dépendance étroite de l'Homme aux "machines" qu'il a créé ( moyens de transport, appareils domestiques.....).
- Se pencher sur des sources inépuisables ou renouvelables, semble être la seule solution pour l'homme d'aujourd'hui et de demain.

Et si l'approvisionnement en énergie veut pouvoir répondre à une demande toujours croissante, il va falloir se montrer créatif et observer de plus près les sources qui nous entourent, notamment : le vent, le soleil, l'eau, les vagues....L'énergie est là, mais il faut encore savoir s'en servir.

La source qui intéresse notre étude est le soleil. Depuis la découverte du français Edmande Becquerel en 1839, les avancées technologiques en énergie photovoltaïque ont permis la réalisation de panneaux solaires producteurs d'électricité. Ce dispositif de conversion énergétique est au cœur de notre mémoire.

Dans ce champ, notre travail s'intéresse aux composants structuraux des panneaux solaires par l'utilisation de matériaux nouveaux en couches minces.

Initialement en silicium, notre étude se base sur des cellules photovoltaïques élaborées en indium et gallium.



La première partie de notre mémoire est une approche théorique de l'énergie photovoltaïque, de ses composants semi-conducteurs, ainsi que de la cellule photovoltaïque, du rayonnement solaire, et de la conversion d'énergie électrique.

L'étude structurale de l'indium et du gallium va faire l'objet de la seconde partie de notre mémoire, avec comme corollaire les caractéristiques optiques des matériaux sus énumérés.

Les caractéristiques électriques et le rendement de conversion photovoltaïque forment la troisième partie de notre mémoire.



**CHAPITRE I**

# **Généralités**

## **I.1. Introduction**

*Ce chapitre est consacré aux notions fondamentales de l'énergie photovoltaïque et la description des semi-conducteurs.*

*En corollaire, la jonction P-N et la cellule solaire y sont étudiés avec une brève description des différentes filières technologiques existantes.*

## I.2. Le photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, ayant pour propriété de libérer leurs porteurs de charge sous l'influence d'une excitation extérieure.

Cette conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par le Français Edmande Becquerel en 1839 [1]. Il a découvert l'effet photovoltaïque en constatant l'apparition d'un potentiel électrique entre deux électrodes lorsqu'elles sont illuminées.

En outre le mot photovoltaïque trouve ses racines dans le mot grec ; phôtos, qui signifie lumière (photon) et dans ; Volta, nom du physicien italien qui découvrit la pile électrique en 1800.

L'histoire montre qu'en 1875, Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Cette découverte reste comme une curiosité scientifique dans les laboratoires jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale.

En 1954, la première cellule photovoltaïque en silicium avec un rendement de 4.5 % a été mise au point par des chercheurs du laboratoire Belle aux USA [2]. Ensuite il a fallu attendre les premiers lancements des satellites et les missions lunaires, pour observer un regain d'intérêt pour les cellules solaires et être considérées comme les meilleures solutions pour l'alimentation électrique des satellites.

En 1958, une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point et les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

La crise économique des années 1970, la flambée des prix du baril de pétrole en 1973 et les accidents des installations nucléaires du Three Mile Island (USA) de 1979 et Tchernobyl (URSS) en 1986 provoquent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables.

Les évènements cités ci-dessus ont abouti à certaines réalisations :

En 1973, l'Université de Delaware installe la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

En 1983, la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

La forte pression du programme spatial engendre des progrès très rapides en termes de rendement des cellules photovoltaïques : 8 % en 1957, 9 % en 1958, et 10 % en 1959 pour arriver à 14 % en 1960.

Les années soixante voient un ralentissement de l'évolution du rendement des cellules au silicium mais des progrès rapides en ce qui concerne les cellules à base de CdS. Au nombre de deux, elles sont subdivisées en cellules  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  et  $\text{CdTe-CdS}$ .

En 1973, les rendements record en laboratoire pour le silicium cristallin étaient déjà de 15 %.

La période entre 1973 et 1976 fit l'apparition des couches minces à base de  $\text{CuInSe}_2$  et à base de silicium amorphe. Celles-ci ont rapidement rattrapé les couches minces déjà existantes à base de CdTe et  $\text{Cu}_2\text{S}$  et ensemble ces quatre filières ont franchi la barrière des 10 % de rendement vers 1980.

Au début des années quatre-vingt-dix les trois couches minces restantes évoluent ensemble et atteignent en rendement de 15 %. Le  $\text{CuInSe}_2$  évolue par ajout de gallium en  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  pour devenir le leader avec 18.8 % obtenu en décembre 1999 [3]. Mais les couches minces n'ont pas rattrapé le silicium cristallin en rendement record, car celui-ci a continué son évolution pour atteindre 24 % de rendement en 1994, et 24.7 % en 1999 [4].

### I.3. Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau pour lequel il existe une probabilité non nulle pour qu'un électron de la bande de valence passe dans la bande de conduction. Il est caractérisé par la largeur de sa bande interdite (appelé « Gap »), qui est l'écart



d'énergie entre sa bande de valence (notée  $E_V$ ) et sa bande de conduction (notée  $E_C$ ), de l'ordre de quelques eV. On définit le niveau de Fermi comme le dernier niveau d'énergie occupé par les électrons. Dans un semi-conducteur, il se situe dans la bande interdite.

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau pur. La transition des électrons entre la bande de valence et la bande de conduction est rendue possible uniquement par activation thermique.

Le niveau de Fermi est situé à égale distance de la bande de valence et de la bande de conduction, c'est-à-dire qu'il y a autant d'électrons dans la bande de conduction, que de trous dans la bande de valence. Ces matériaux peuvent être dopés en semi-conducteur de type P ou de type N.

Le dopage de type P est assuré par l'introduction de défauts de type accepteur dans la structure du matériau (lacunes, atomes de valence inférieure aux autres atomes constituant le réseau cristallin...), qui conduit à un excès de trous dans la bande de valence. Les trous sont alors les porteurs majoritaires. Le niveau de Fermi est dans ce cas proche de la bande de valence.

Le dopage de type N est assuré par l'introduction de défauts de type donneur dans la structure du matériau (lacune, atomes de valence supérieure aux autres atomes constituant le réseau cristallin...), qui conduit à un excès d'électrons dans la bande de conduction. Les électrons sont alors les porteurs majoritaires. Le niveau de Fermi est dans ce cas proche de la bande de conduction.

### **I.3.1. La jonction P-N**

La mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N crée une jonction P-N. Cette mise en contact va entraîner une migration des porteurs majoritaires de chaque semi-conducteur de part et d'autre de la jonction afin d'équilibrer les niveaux de Fermi. Cette migration va conduire à un appauvrissement en porteur de la zone située à proximité de l'interface des deux semi-conducteurs, laissant ainsi des charges fixes sur des ions, chargés négativement dans la partie P et positivement dans la partie N.



Dans cette zone de déplétion, appelée zone de charge d'espace (ZCE), le semi-conducteur de type P devient chargé négativement, et le semi-conducteur de type N devient chargé positivement. Une différence de potentiel ( $V_{eq}$ ) s'établit alors à l'interface des deux semi-conducteurs, créant ainsi un champ électrique orienté de P vers N. En dehors de la ZCE, les semi-conducteurs restent neutres.

Un schéma représentant les diagrammes énergétiques des deux semi-conducteurs avant et après leur mise en contact est représenté sur la *figure I-1*. Lorsque les deux semi-conducteurs sont issus d'un même matériau, on parle d'homojonction (comme les cellules solaires à base de silicium). Lorsqu'ils sont issus de matériaux différents, on parle d'hétérojonction (comme les cellules à base d'InGaN) [5].

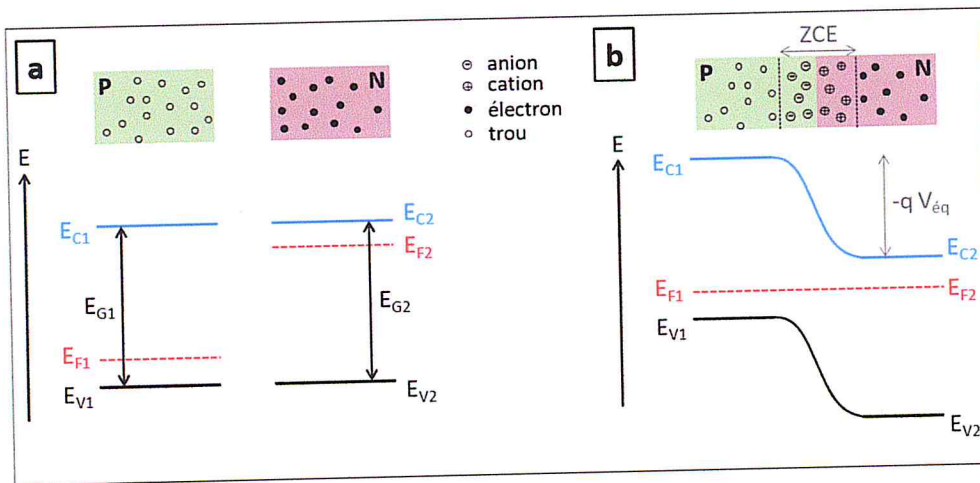


Figure I-1 : Diagramme énergétique des semi-conducteurs de type P et N avant (a), et après (b) mise en contact.

A l'équilibre, les niveaux de Fermi sont alignés. Lorsqu'on polarise la diode, il devient possible de contrôler l'énergie entre ces deux niveaux de Fermi. Une polarisation en directe permet d'abaisser la barrière de potentiel entre les deux semi-conducteurs, permettant ainsi un passage des électrons du semi-conducteur de type N vers le semi-conducteur de type P (au-delà d'une tension seuil). Au contraire, une polarisation en inverse augmente cette barrière de potentiel et bloque le passage des électrons. Ces deux situations sont représentées sur la *figure I-2*. Dans ces conditions, la caractéristique courant-tension  $J(v)$  correspondante est celle d'une diode. L'équation qui régit son fonctionnement est la suivante :

$$J = J_0 \left( \exp \left( \frac{qv}{nkT} \right) - 1 \right) \tag{I-1}$$

Où ' $J_0$ ' est la densité de courant de saturation, ' $n$ ' est le facteur d'idéalité de la diode, ' $k$ ' est la constante de Boltzmann, ' $T$ ' est la température (en Kelvin), et ' $q$ ' est la charge de l'électron.

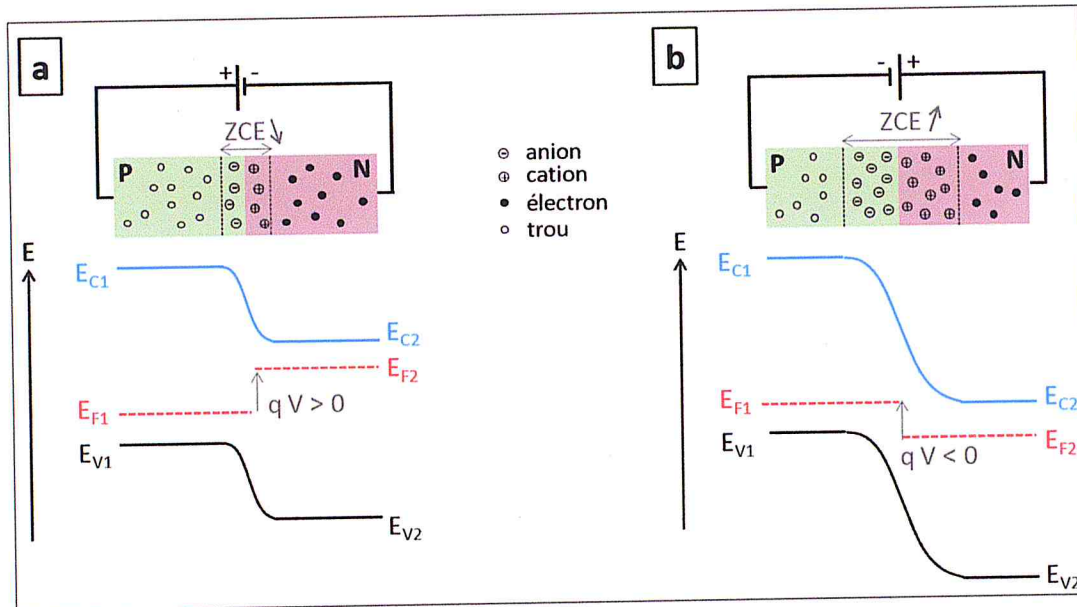
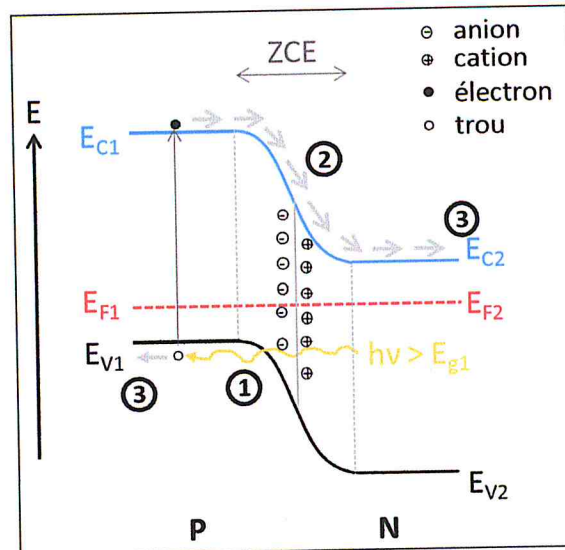


Figure I-2 : Diagramme énergétique d'une jonction P-N lors d'une polarisation en directe (a) et en inverse (b).

Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé, il va absorber les photons d'énergie supérieure à son gap. Cette absorption conduit à l'excitation d'un électron, qui passe alors de la bande de valence vers la bande de conduction. Dans un semi-conducteur isolé, l'électron va finir par se désexciter et par se recombiner avec le trou de la bande de valence.

Dans une jonction P-N, la présence du champ électrique et du gradient de porteur va permettre à une partie des électrons photo-générés de diffuser vers le semi-conducteur de type N avant leur recombinaison. Il y a alors apparition d'un photocourant ( $J_{Ph}$ ) des porteurs minoritaires, de signe opposé à celui du courant de diffusion des porteurs majoritaires, lorsque la diode est à l'obscurité. Cette situation est représentée sur la *figure I-3*, en situation de circuit ouvert. Sous éclairage, la caractéristique  $J(v)$  de la diode devient :

$$J = J_0 \left( \exp\left(\frac{qv}{nkT}\right) - 1 \right) - J_{Ph} \quad (\text{I-2})$$



**Figure I-3 :** Diagramme énergétique d'une jonction P-N sous éclairage, en situation de circuit-ouvert. 1) Création d'une paire électron-trou ; 2) Séparation des charges par la jonction P-N ; 3) Collecte des porteurs.

### I.3.2. L'énergie du gap

L'énergie de gap  $E_g$  est l'énergie nécessaire pour que l'électron puisse passer de la bande de valence vers la bande de conduction, il peut également être défini comme la différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence.

La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique et par suite dans le fonctionnement des composants optoélectroniques [6].

On distingue deux types de gap *figure I.4*, suivant lesquels les matériaux semi-conducteurs se divisent : à gap direct et à gap indirect.



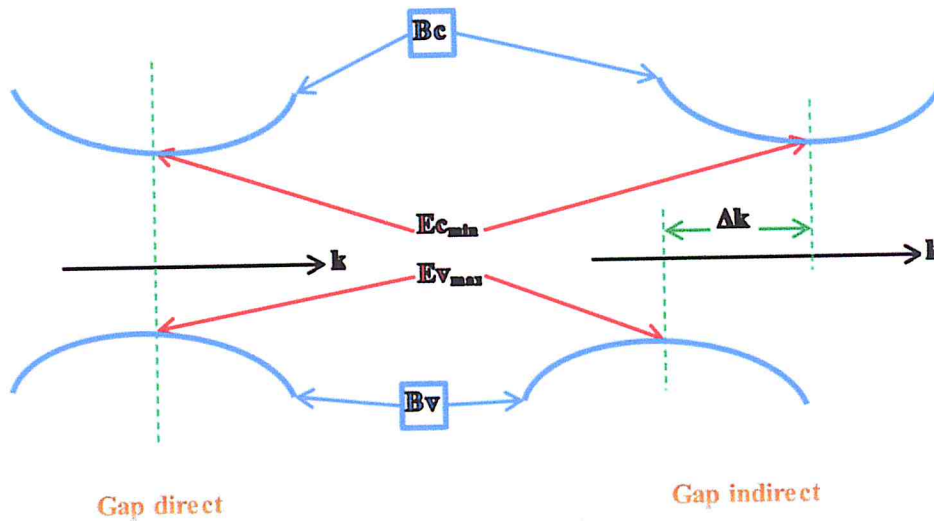


Figure I-4 : Le gap direct et le gap indirect où  $k$  : le vecteur d'onde associé à un électron.

Les semi-conducteurs à gap direct sont ceux qui ont le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sur le même point de l'espace des  $k$ , et les semi-conducteurs à gap indirect pour lesquels ces extrema sont situés aux points différents de l'espace des  $k$  [6].

#### I.4. Les matériaux III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la III colonne et d'un élément de la V colonne de la classification périodique de Mendeliev. Le tableau I-1 regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

II	III	IV	V	VI
	10.811 <sup>5</sup> B	12.011 <sup>6</sup> C	14.007 <sup>7</sup> N	
	26.982 <sup>13</sup> Al	28.086 <sup>14</sup> Si	30.974 <sup>15</sup> P	32.065 <sup>16</sup> S
65.39 <sup>30</sup> Zn	69.723 <sup>31</sup> Ga	72.64 <sup>32</sup> Ge	74.922 <sup>33</sup> As	78.96 <sup>34</sup> Se
112.41 <sup>48</sup> Cd	114.82 <sup>49</sup> In	118.71 <sup>50</sup> Sn	121.76 <sup>51</sup> Sb	127.60 <sup>52</sup> Te

Tableau I-1 : Extrait du tableau périodique qui représente l'emplacement des semi-conducteur III-V.

### I.4.1. Structure cristalline

La plupart des matériaux III-V se cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la *figure I-5*. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant, est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément V [7].

Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube, d'une quantité  $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$ ,  $a_0$  étant le paramètre cristallin, c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire.

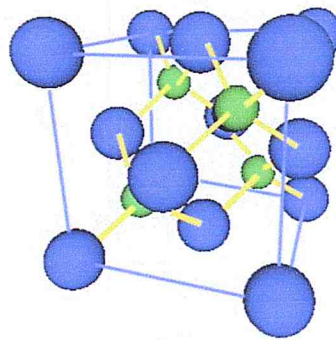


Figure I-5 : Réseau cristallin dans la structure Zinc-blende [8].

### I.5. La lumière

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou *photons*, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique.

Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde [7].

$$E_{ph}(eV) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.3)$$

Où ' $h$ ' : est la constante de Planck, ' $\nu$ ' : la fréquence associée à la longueur d'onde ' $\lambda$ ' du photon et ' $c$ ' la vitesse de la lumière dans le vide.



## I.6. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes infrarouge, visible et ultraviolette, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes.

Le rayonnement solaire dit « extraterrestre » c'est à dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut  $1367 \text{ w/m}^2$ . Il s'agit de l'irradiance reçue, ou rayonnement solaire instantané à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est à dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil).

On appelle cette valeur « constante solaire » mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance terre-soleil. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci [9].

Le rayonnement solaire se propage à la vitesse de la lumière; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [9].

La théorie corpusculaire de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence ' $f$ ' peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire est directement proportionnelle à cette fréquence ( $E = hf$ ). De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques. Notre œil perçoit une partie seulement du rayonnement solaire, celle située dans le domaine dit visible, dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,40 et 0,70  $\mu\text{m}$  (certains auteurs placent la limite du visible à 0,77  $\mu\text{m}$  pour que les contributions énergétiques du visible et du proche infrarouge soient égales).

Le soleil émet cependant dans une large gamme de longueurs d'onde, allant des rayons gamma (longueurs d'onde inférieures à 10-12  $\mu\text{m}$ ) aux grandes ondes radioélectriques (de longueur d'onde atteignant 1000 mètres), en passant par les rayons X, le rayonnement ultraviolet, le rayonnement visible, le rayonnement infrarouge et le rayonnement hyperfréquences [9].

La plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge: 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 0,2 $\mu\text{m}$  et 4  $\mu\text{m}$ . Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité vers le haut à 2,5  $\mu\text{m}$  environ (*figure I-6*) [9].

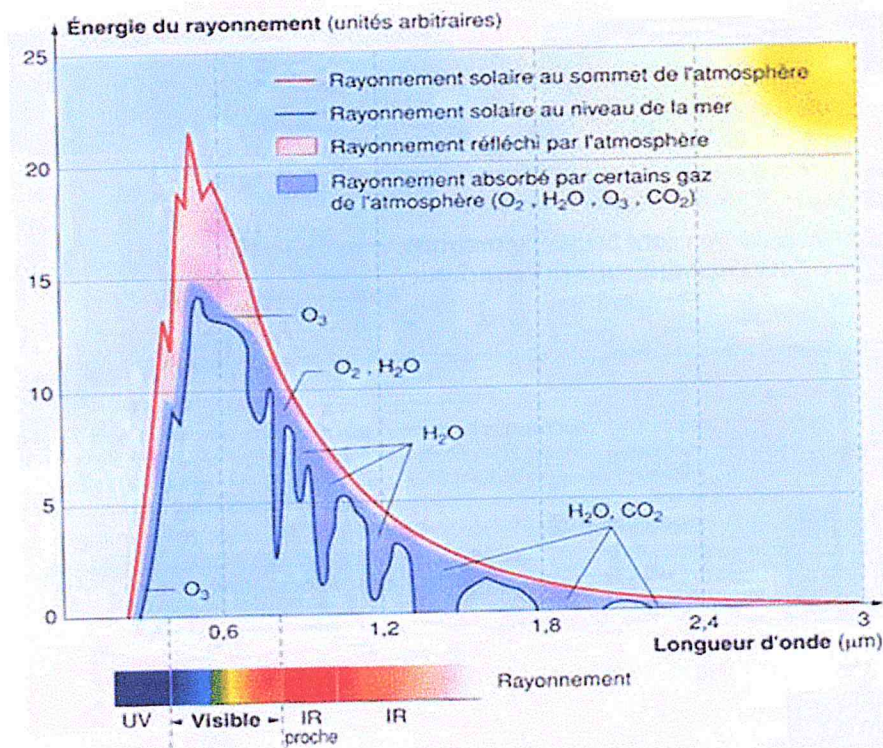


Figure I-6 : Densité spectrale du rayonnement solaire [10].

D'après la *figure I-6*, le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé. Par ailleurs, les spectres des rayonnements réfléchi, diffusé, et absorbé sont différents.



A la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O,.....).

Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour tenir compte de ces différences, il est utile de comparer les performances des cellules solaires et de qualifier les différents spectres solaires utilisés, pour l'introduction d'un coefficient appelé masse d'air (AM<sub>x</sub>) dont l'expression est:

$$x = \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{I-4})$$

Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith et par définition, AM<sub>0</sub> correspond aux conditions hors atmosphère.

Quand le soleil fait un angle de 48.19° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM<sub>1.5</sub>. Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 mW/cm<sup>2</sup> pour AM<sub>1.5</sub> dont la surface est inclinée à 37° du soleil) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques. Les conditions standards de caractérisation sont définies par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM<sub>1.5</sub> global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100mW/cm<sup>2</sup> et pour une température de cellule de 25°C [11,12].

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global. La *figure I-7* montre le spectre d'émission solaire sous AM<sub>1.5</sub> global normalisé à 100 mW/cm<sup>2</sup> [13,14].

Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P (en W.m<sup>-2</sup>) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes [13]:

AM0: Hors atmosphère (application spatiale).  $P 1.36 \text{KW} \cdot \text{m}^{-2}$

AM1: Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).

AM1.5G: Spectre standard, le soleil est à  $45^\circ$ .  $P 1 \text{KW} \text{m}^{-2}$  .

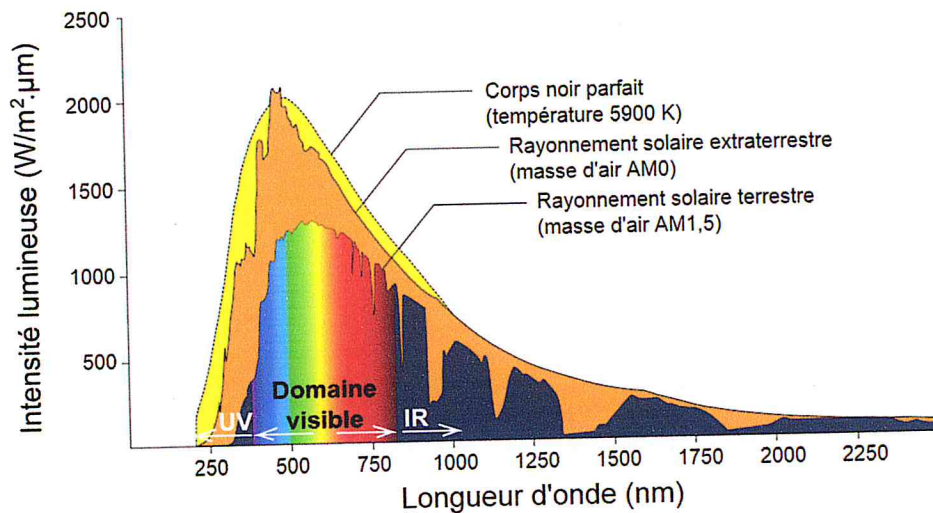


Figure I-7 : La distribution spectrale selon la masse d'air.

### I.7. La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque consiste à transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons par le matériau;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteurs;
- collecte des particules générées.



### 1.7.1. L'absorption de la lumière

Un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques : la réflexion, la transmission, l'absorption. Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restitué sous forme d'énergie électrique.

Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau. On prendra donc soin de minimiser les pertes purement optiques par réflexion ou par transmission [15].

### 1.7.2. Conversion de l'énergie

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi-conductrice. Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés produisent un courant électrique si on les « attire ensuite » vers l'extérieur.

En régime permanent, l'électron libéré laisse un "trou" qui se traduit par une charge positive. L'électron d'un atome voisin va donc venir combler ce trou. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique.

### 1.7.3. La collecte des charges

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Ces dernières doivent donc être attirées hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique. Dans le cas contraire, elles se recombinaient avec des atomes chargés positivement, neutralisant alors leurs trous. Les électrons libres retrouveraient alors leur état initial à la périphérie de leur atome [15].

Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté [15].

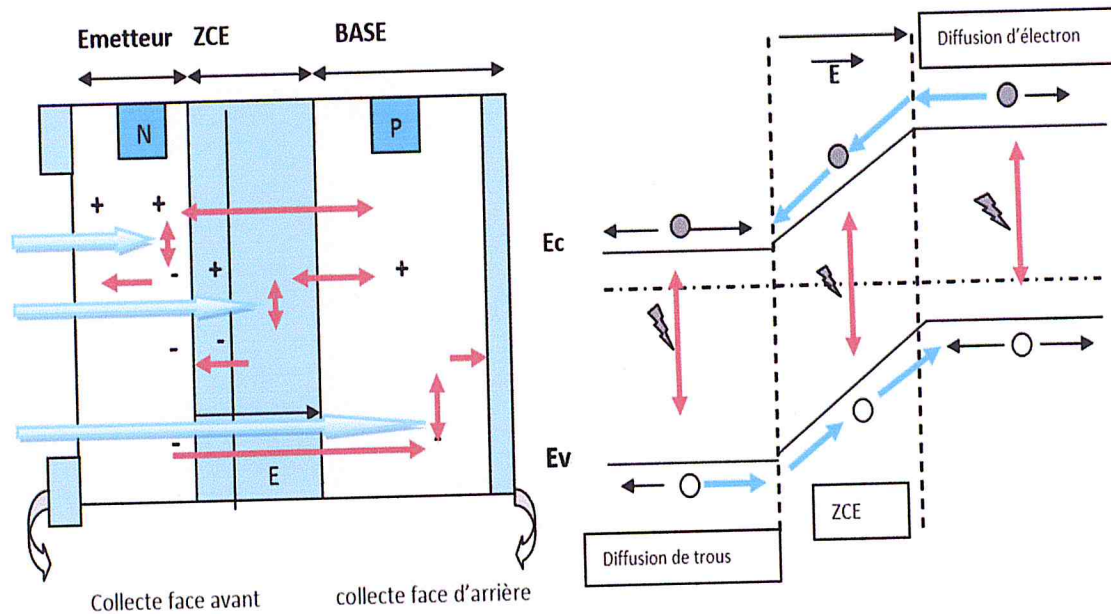


Figure I-8 : schéma de la structure d'une cellule PV [15].

a) phénomène de photo-génération b) collecte des porteurs pour différentes longueurs d'ondes

## I.8. La cellule photovoltaïque

### I.8.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, pouvant contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.



Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [16,17].

### I.8.2. Structure de la cellule photovoltaïque

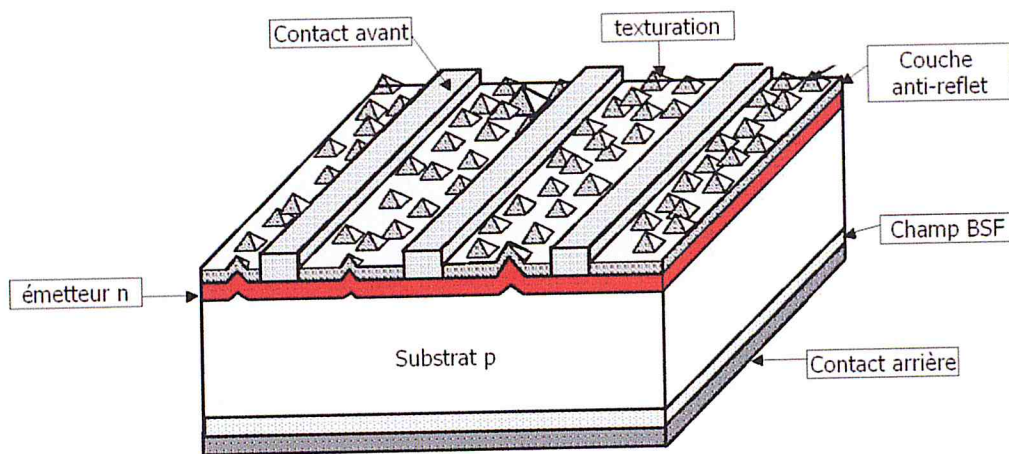


Figure 1-9: Structure photovoltaïque standard [18].

#### I.8.2.1. La passivation des faces

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x\text{:H}$ ) [19].



### I.8.2.2. Les contacts avant et arrière

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photogénérés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire [19].

La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées [19].

Pour l'InGaN et le GaN, les contacts sont des alliages de métaux. Pour l'InGaN type N, on utilise généralement l'alliage titane-aluminium-or et pour l'InGaN de type P, l'alliage nickel-or [20].

### I.8.2.3. Couche antireflet

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coatings CAR). Le rôle de la couche anti-réfléchissante est de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant. Sans couches anti-réfléchissantes, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Cette couche réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques [21].

Différentes couches anti réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $ZnS$ ,  $MgF_2$  et  $SiN_x$  ou conductrice comme le  $ZnO$  ou l'ITO [21].

La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau de l'épaisseur de la couche déposée, de l'angle d'incidence et de l'état de polarisation du rayon incident. Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{\text{CAR}} = \frac{(2N+1)*\lambda}{4*\eta_{\text{car}}} \text{ Avec } N = 0,1,2,3, \dots \quad (\text{I-5})$$

Où  $\eta_{\text{car}}$  représente l'indice de réfraction de la couche antireflet.

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double CAR est utilisée avec deux diélectriques différents [21].

#### I.8.2.4. Texturation

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant: un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus  $R$  mais  $R^2$  [21].

D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction  $\theta$  différent de  $0^\circ$ . Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique  $\theta_c$  à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet dans le semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons [21].

#### I.8.2.5. Champ BSF

Afin de collecter les paires électron-trou créées par les radiations de grandes longueurs d'ondes du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contact ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF (Back Surface Field). Les



porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombinaison, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant dans la mesure où la longueur de diffusion de ces porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [22].

### I.8.3. Paramètres de La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion  $\eta$ , une tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , un courant de court-circuit  $I_{cc}$  et un facteur de forme FF. La caractéristique courant-tension est utilisée pour déterminer ces paramètres.

#### I.8.3.1. La caractéristique courant-tension de La cellule photovoltaïque

L'enregistrement de la courbe caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule pour une illumination donnée *figure I-10*. Cette mesure s'effectue sous un simulateur solaire dont le spectre d'illumination s'approche le plus précisément possible du spectre AM1.5 et sous des conditions ambiantes de fonctionnement ; une température et une vitesse d'air ambiant données. Chaque caractéristique courant-tension d'une cellule correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

Dans le laboratoire, les conditions de test standard (Standard Testing Conditions STC) sont les suivantes :

- a. La répartition du rayonnement solaire est de type AM 1.5 ; correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé une atmosphère de masse 1 à  $45^\circ$ ;
- b. Le rayonnement incident est normal sur la surface de la cellule ;
- c. La température de la cellule est égale à  $+25^\circ\text{C}$  plus ou moins  $2^\circ\text{C}$ ;
- d. La vitesse de l'air circulant autour de la cellule est environ  $2\text{ ms}^{-1}$ .



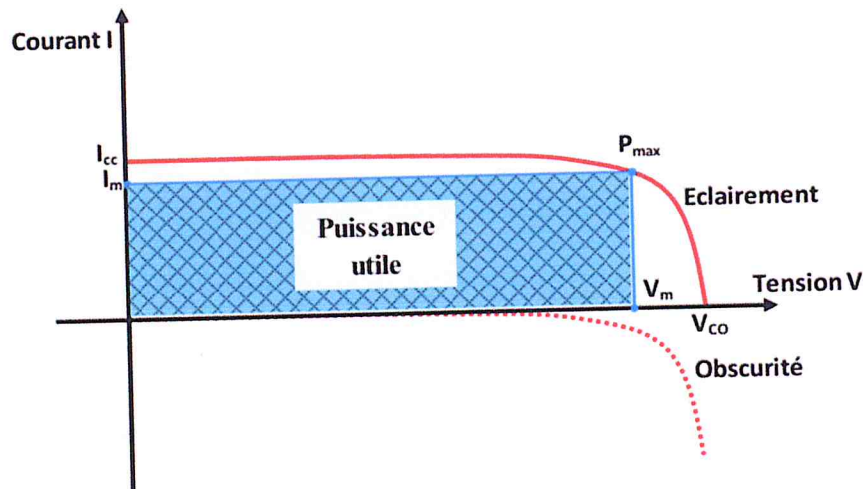


Figure I-10 : La caractéristique typique d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement et une température donnés.

La caractéristique typique d'une cellule solaire est représentée sur la *figure I-10*. Une cellule photovoltaïque idéale présenterait, pour un éclairement, une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, une courbe en forme de marche : le courant restant constant jusqu'à la tension de circuit ouvert, puis la tension demeurant constante jusqu'à un courant nul, le courant passe brusquement du courant de court-circuit  $I_{cc}$  à 0.

A partir de la caractéristique courant tension de la cellule photovoltaïque on peut déterminer ses paramètres physiques à savoir : la tension de circuit ouvert, le courant du court-circuit, la puissance caractéristique, la puissance maximale, la puissance crête, le facteur de forme, et le rendement. Des brèves définitions de ces paramètres, ainsi que leurs déterminations de la caractéristique sont données ci-après.

#### a. Tension de circuit ouvert $V_{OC}$

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [23].

### b. Courant du court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [23].

### d. Puissance max idéale $P_{max\text{idéale}}$

La puissance maximale  $P_m$  d'une cellule, correspond au point pour lequel le produit de la tension et de l'intensité de courant soit maximal. Dans le cas d'une cellule idéale, la puissance maximale correspondrait à la tension de circuit ouvert  $V_{OC}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$ :

$$P_{max\text{idéale}} = V_{OC} \times I_{cc} \quad (I-6)$$

$P_{max\text{idéale}}$  : Puissance mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en Watt ;

$V_{OC}$  : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en Volt;

$I_{cc}$  : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en Ampère.

### e. Puissance crête $P_m$

La puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance catalogue, notée  $P_m$  (Watt crête) ou  $W_p$  (Watt peak), représente la puissance électrique maximale délivrée dans les conditions standard.

### f. Le facteur de forme FF

Le facteur de forme FF (fill factor) correspond au rapport [23] :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_{Pm} \times I_{Pm}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I-7)$$

### g. Le rendement $\eta$

Le rendement de la cellule  $\eta$  correspond à la division de la densité de la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque ( $P_m = V_{Pm} \cdot I_{Pm}$ ) par

l'intensité de l'illumination incidente qui est normalisée à  $1000\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  pour un spectre de AM1.5 [23].

$$\eta = \frac{V_{Pm} \times I_{Pm}}{P_{in}} = \frac{V_{co} I_{cc} \times FF}{P_{in}} \quad (\text{I-8})$$

### I.8.3.2. Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent (*figure I-11*) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant.  $R_s$  est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ).  $R_{sh}$  est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe  $I(V)$  au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_{sh}$ ) [24].

En général, la valeur de  $R_{sh}$  est plus grande que celle de  $R_s$  d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer  $R_s$  et augmenter  $R_{sh}$ . Le cas idéale est représenté par  $R_{sh}$  égale à l'infini et  $R_s$  égale à 0 [24].

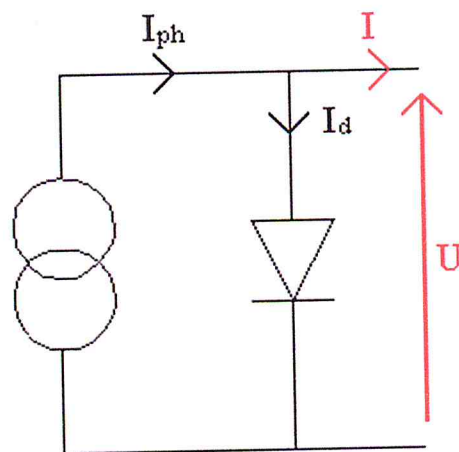


Figure I-11 : schéma équivalent d'une cellule idéale.



- $I$  : le courant total produit par la cellule [A]
- $I_d$  : le courant traversant la diode [A]
- $U$  : la tension délivrée par la cellule [V]

Dans le cas idéal l'équation de la diode :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (I-9)$$

où

$I_{ph}$  : est le courant photogénéré.

$I_0$  : le courant de saturation de la diode.

$q$  : la charge de l'électron.

$k$  : la constante de Boltzmann.

$T$  : la température en Kelvin.

### I.9. Les différentes technologies

A ce jour, le plus haut rendement obtenu est de 43,5 % avec une cellule triple-jonction accordée en maille, sous concentrateur (x418 soleils), par l'entreprise Solar Junction [25].

Cette technologie de cellules multi-jonctions à base de matériaux III-V présente depuis longtemps les plus hauts rendements. C'est pourquoi elle est aujourd'hui principalement utilisée pour l'alimentation des satellites. Néanmoins, son coût reste très élevé, rendant impossible son utilisation pour des applications terrestres [20].

Pour les simples jonctions en matériau III-V, le plus haut rendement a été présenté avec du GaAs par l'institut pour les systèmes à énergie solaire de Fraunhofer (FhG-ISE), avec 29,1 % sous 117 soleils [20].

Le silicium sous toutes ses formes domine le marché des applications terrestres. La filière du silicium monocristallin a l'avantage de présenter les plus hauts rendements de conversion avec un record à 27,6 %, par l'entreprise Amonix, sous concentrateur (x92 soleils). Les modules commerciaux présentent des rendements entre 12 et 18 %. Cependant, cette filière est la plus coûteuse des filières silicium.

Le silicium polycristallin est le matériau le plus répandu pour les panneaux solaires commerciaux grâce à son faible coût et son rendement intéressant. Les rendements des modules commerciaux se situent entre 12 et 15 %. Au niveau de la recherche, le FhG-ISE a rapporté un rendement de 20,4 % [20].

La filière du silicium en couche mince est celle qui possède les rendements les plus bas de la filière silicium avec 12,5 % en recherche, obtenu par United Solar et entre 6 et 9 % pour les modules commerciaux [20].

Le silicium en couche mince est un film très fin (quelques centaines de nanomètres) de silicium amorphe hydrogéné formant une jonction P-i-N déposée sur un substrat de verre ou céramique. Malgré son faible rendement, cette technologie possède les coûts de fabrication les plus bas grâce à la faible quantité de matériau nécessaire et à son procédé de fabrication basse température [20].

La filière des matériaux en couche mince est dominée par le Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub>, ou CIGS, avec un record à 20,3 % obtenu par le centre pour la recherche sur l'énergie solaire et l'hydrogène (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff, ZSW). Depuis son arrivée sur le marché, cette filière est en pleine expansion. Elle présente, en effet, des performances équivalentes au silicium polycristallin avec un coût inférieur grâce à un dépôt rapide nécessitant peu d'énergie (par rapport au silicium polycristallin) et avec la possibilité de couvrir de grandes surfaces. Par ailleurs, les cellules en couches minces présentent un grand intérêt pour des applications photovoltaïques flexibles [20].

Enfin, les cellules photovoltaïques émergentes se caractérisent par la plus haute augmentation de rendement sur ces cinq dernières années. Elles sont composées des cellules solaires organiques, des cellules à nanostructures et des cellules à colorant. Ces dernières sont d'ailleurs les plus performantes de cette catégorie avec un rendement de 11,4% obtenu par l'institut national pour la science des matériaux au Japon (NIMS) [20].



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

### **I.10.1 Avantages**

a. Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25ans par la plupart des constructeurs ;

b. Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux;

c. Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;

d. Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. Généralement la maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel ;

e. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore olfactive.

### **I.10.2 Inconvénients**

a. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;

b. L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;

c. Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %) ;

d. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées ;



---

e. Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

### **I.11. Conclusion :**

Le premier chapitre présente la technologie photovoltaïque en décrivant le principe de fonctionnement d'une jonction PN et d'une cellule solaire. Nous avons fait ensuite un rapide inventaire des filières photovoltaïques en donnant leur record de rendement et enfin nous avons énuméré les avantages et les inconvénients du photovoltaïque.

## **CHAPITRE II**

**L'étude du matériau  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$**

### II.1. Introduction :

*Au cours de ces dernières années, le développement de la technologie des semi-conducteurs à base de matériaux III-V a révolutionné l'électronique et l'optoélectronique. Par l'apparition des structures semi-conductrices à couches très fines, de très bonne qualité (pureté) et par la création de nouveaux produits (diode, transistor, circuit intégrés, diode laser à semi-conducteurs) ainsi que des nanostructures (puits, et boîtes quantiques). Il est à signaler que la recherche sur les matériaux semi-conducteurs a commencé au début du 19ème siècle, et parmi les plus célèbres :*

*Le silicium (Si) et le germanium (Ge) de la colonne IV du tableau périodique. Ces deux semi-conducteurs sont composés d'atomes identiques.*

*D'autres, comme le nitrure de gallium GaN et le nitrure d'indium InN (III-V) sont composés d'atomes d'éléments différents : Ga, In (III) et N (V). Cette composition permet d'accéder à des propriétés électriques et optiques que n'ont pas les semi-conducteurs purs.*

*Le matériau InGaN fut proposé pour la première fois pour des applications photovoltaïques en 2003 par J. Wu et al. [27] en mettant en avant son gap d'énergie modulable et sa résistance aux radiations de haute énergie. La fabrication de cellules photovoltaïques à base d'InGaN a été réalisée avec une homojonction PN ou PiN sur GaN, ou sur AlN.*

*Nous allons donc étudier l'influence de l'incorporation du gallium sur les caractéristiques de la structure InGaN/GaN : la contrainte, les déformations (uniaxiale et biaxiale), l'épaisseur critique. L'énergie de la bande interdite, l'absorption.*



## II.2. Description du nitrure de gallium-indium $In_{1-x}Ga_xN$

Ce deuxième chapitre présente le matériau : nitrure de gallium-indium  $In_{1-x}Ga_xN$  qui est au centre de ce travail. Ce matériau est un semi-conducteur faisant partie de la catégorie des nitrures III-V c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne III du tableau de Mendeleïev. Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN). C'est pourquoi, nous allons principalement décrire dans ce chapitre les propriétés structurales, électriques et optiques de ces deux alliages binaires, pour ensuite décrire les propriétés de l' $In_{1-x}Ga_xN$  qui en découlent.

Ces matériaux, nitrures III-V sont activement étudiés parce qu'ils représentent une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance ainsi que pour le photovoltaïque. Dans les sections suivantes, nous présentons la structure cristalline du GaN, de l'InN et de l' $In_{1-x}Ga_xN$ , ainsi que leurs caractéristiques structurale, électriques et optiques [20].

## II.3. Caractéristiques structurales

Sous certaines conditions de pression, de température et sur un substrat cubique, il est possible de faire croître les nitrures en structure cubique, sous forme de zinc-blende [20].

La structure zinc-blende, en prenant l'exemple du GaN, est présentée dans la *figure II-1* selon différentes directions.

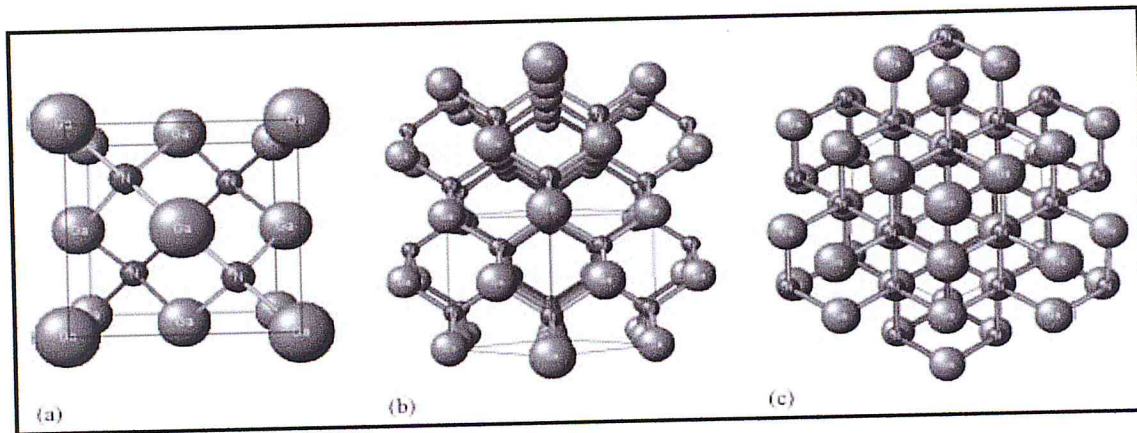


Figure II-1 : Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, exemple du GaN: (a) [100], (b) [110], (c) [111]. [20]

### II.3.1. Paramètre de maille

Le paramètre de maille d'un matériau III-V dépend de sa composition : les paramètres de maille respectifs de l'InN et GaN sont  $a_{InN} = 4.98 \text{ \AA}$ ,  $a_{GaN} = 4.5 \text{ \AA}$ . Le paramètre de maille d'un alliage  $In_{1-x}Ga_xN$  non contraint est déterminé par la loi linéaire de Vegard en fonction de la proportion de gallium et des paramètres de maille des composés binaires non contraints InN et GaN [27].

Le paramètre de maille de l'alliage  $In_xGa_{1-x}N$  est donné par la loi de Végard :

$$a^{InGaN}(x) = (1 - x)a^{InN} + xa^{GaN} \quad (II-1)$$

Les paramètres de maille des principaux semi-conducteurs sont donnés en annexe.

La figure II-2 illustre le paramètre de maille de l' $In_{1-x}Ga_xN$  en fonction de la concentration de gallium.

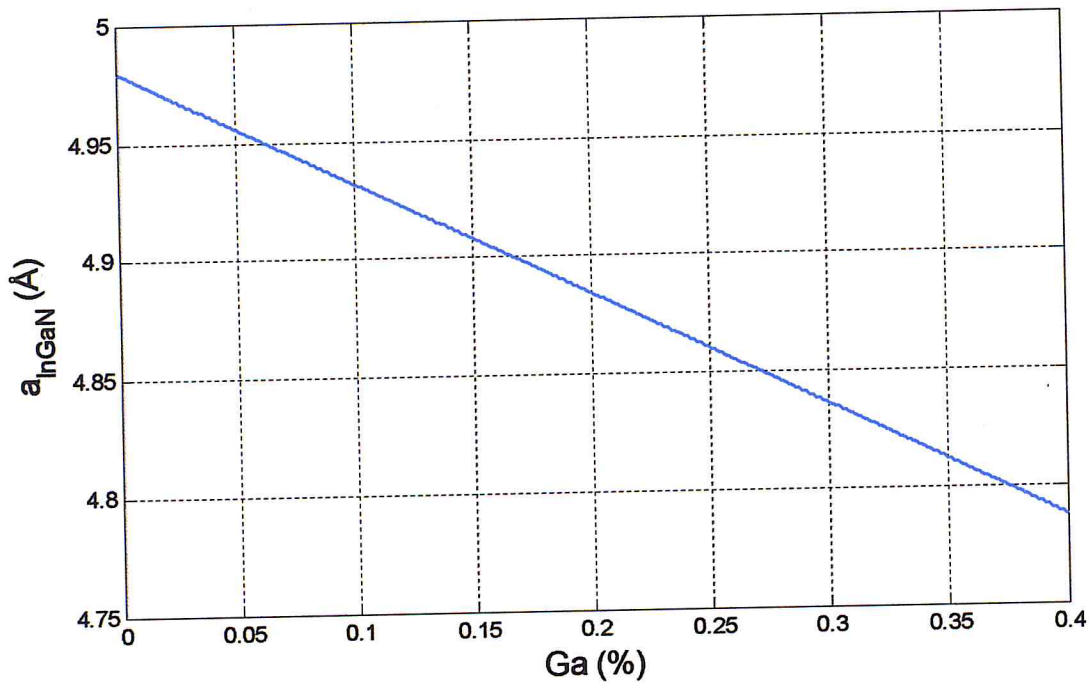


Figure II-2 : Variation du paramètre de maille de  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  en fonction de la concentration de gallium.

### II.3.2. La contrainte

Lorsqu'on fait croître un semi-conducteur sur un autre, et les deux matériaux constituant le substrat et la couche active ont des paramètres de mailles différents, (aux conditions de même structure cristalline ainsi que de paramètres de maille voisins) ; la maille du matériau épitaxié se déforme de manière élastique dans les deux directions parallèle et perpendiculaire à la surface de croissance, et selon le paramètre de la couche épitaxiée, plus petit ou plus grand que celui du substrat, la déformation est soit un rétrécissement (*Figure II-3.a*), soit un allongement (*Figure II-3.b*).



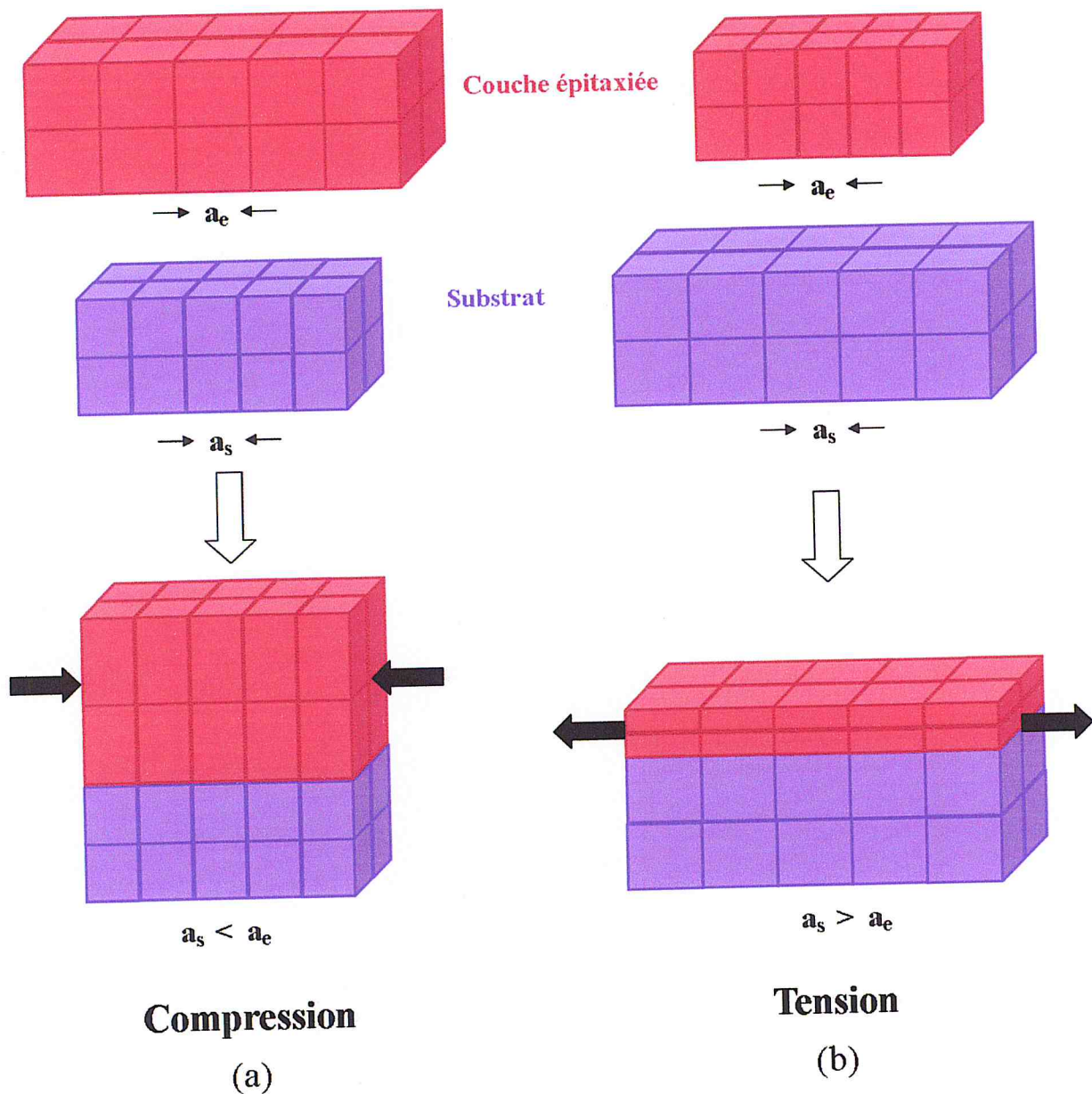


Figure II-3 : Illustration des deux types de contraintes.

Pour des valeurs de  $x$  (concentration de gallium) lors de l'épitaxie de l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  sur le substrat GaN, le raccordement des mailles à l'interface entraîne l'existence d'une déformation de la maille cristalline.

Il en résulte des contraintes élastiques dans le dépôt. L'épitaxie de l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  sur le substrat GaN présente la particularité de pouvoir être contrainte en tension selon les déformations biaxiales ( $\epsilon_{yy}$  et  $\epsilon_{zz}$ ) et uniaxiale ( $\epsilon_{xx}$ ) [28].

- Biaxiale dans le plan de croissance :

$$\varepsilon_{//} = \varepsilon_{xx}(x) = \varepsilon_{yy}(x) = \frac{a_s - a_e(x)}{a_e(x)} \quad (II-2)$$

- Uniaxiale dans la direction de croissance :

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{zz}(x) = -2 \frac{C_{12}(x)}{C_{11}(x)} \varepsilon_{xx}(x) \quad (II-3)$$

Où :

- $\varepsilon$  : La déformation ou le désaccord de maille.
- $a_s$  : Le paramètre de maille du substrat GaN.
- $a_e$  : Le paramètre de maille de la couche épitaxiée  $In_{1-x}Ga_xN$ .
- $C_{ij}$  : Les coefficients d'élasticité.

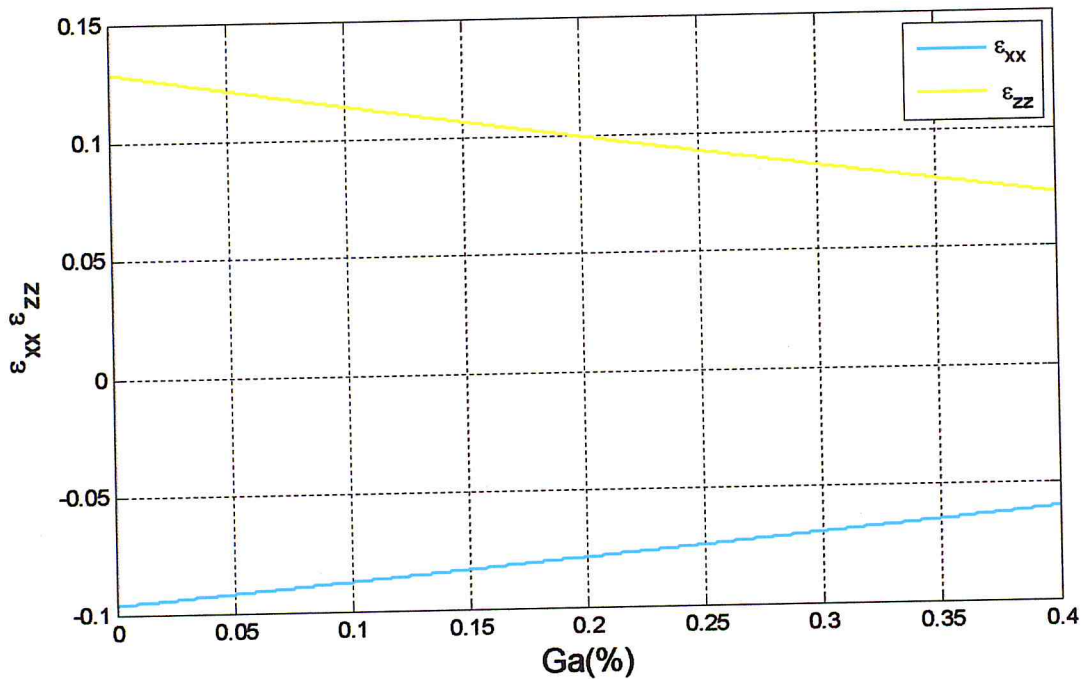


Figure II-4 : Variation du désaccord paramétrique en fonction de la concentration d'indium.

La figure II-4 montre la variation du désaccord de maille en fonction de la variation des concentrations de gallium dans le matériau  $In_{1-x}Ga_xN$  ; la remarque d'une augmentation de la déformation  $\Delta\varepsilon_{xx}$  avec augmentation de la concentration de

gallium et diminution de la déformation  $\Delta\varepsilon_{zz}$  avec augmentation de la concentration de gallium, expliquant une contrainte en tension ( $a_s > a_e$ ).

### II.3.3. L'épaisseur critique :

L'épaisseur critique d'une couche épitaxiée se définit comme l'épaisseur à partir de laquelle la contrainte contenue dans la couche devient trop importante. En conséquence la couche se relaxe plastiquement en créant des défauts structuraux [20].

En dessous de cette épaisseur, la couche épitaxiée possède le même paramètre de maille que le substrat : cette couche est pseudomorphique [20].

Au contraire, si l'épaisseur de la couche épitaxiée est supérieure à l'épaisseur critique, alors la contrainte contenue dans la couche devient trop grande et le matériau va se relaxer plastiquement en créant des défauts, principalement des dislocations [20].

L'épaisseur critique dépend donc fortement du désaccord de maille entre la couche et son substrat, du procédé de croissance, et des propriétés du matériau déposé [20].

Pour notre étude, nous avons utilisé le modèle le plus classique, celui de K. Köksal et al [29] :

$$h_c = \frac{a_e}{k \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta} * \frac{1 - 0.25 \cdot \gamma}{1 + \gamma} * \ln \left( \frac{h_c \cdot \sqrt{2}}{a_e} + 1 \right) \quad (\text{II-4})$$

Avec :

- $\Delta$ : Le désaccord paramétrique qui est donné par :  $\Delta = \left| \frac{a_s - a_e}{a_s} \right|$
- $\gamma$  : Le coefficient de poisson qui est donné par :  $\gamma = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}}$

Où,  $C_{11}$  et  $C_{12}$  sont les constantes d'élasticité obtenues par l'interpolation linéaire des binaires GaN et InN.

- $a_e$  : Paramètre de maille de la couche relaxée.



- $k$  : C'est un coefficient égal à '1' dans le cas d'un super-réseau ; à '2' pour un puits quantique et '4' dans le cas d'une couche unique.

La *figure II-5* représente la variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de gallium.

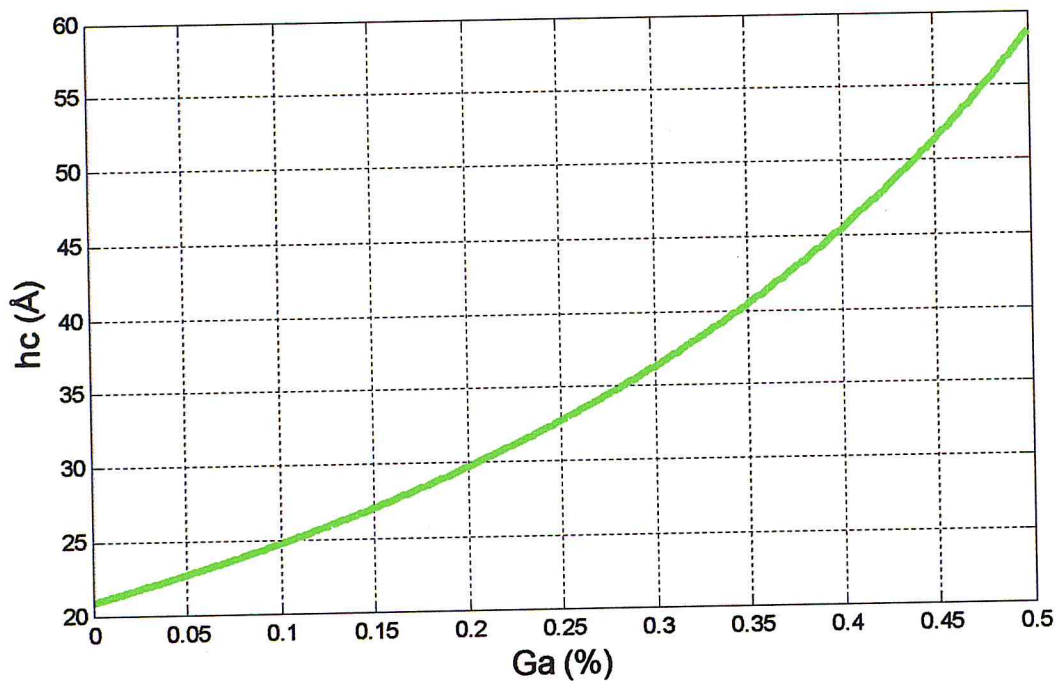


Figure II-5 : Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de gallium.

### II.3.4. Evolution du gap d'énergie dans l' $In_xGa_{1-x}N$ :

#### II.3.4.1. Gap d'énergie Sans contrainte :

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaN et InN, il est possible de déterminer le gap d'énergie de l' $InGaN$  en utilisant la loi de Vegard avec un paramètre de courbure.

La loi de Vegard est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (gap d'énergie, paramètre de maille, constantes élastiques, etc.) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants [20].

Cependant, les valeurs mesurées peuvent dévier de l'interpolation linéaire à cause de la taille relative des constituants, du volume relatif par électron de valence, des effets de la zone de Brillouin, et des différences électrochimiques entre les éléments [20].

L'introduction d'un paramètre de courbure dans l'expression est nécessaire afin de suivre les données expérimentales [20].

La loi de Vegard avec le paramètre de courbure est définie par:

$$E_g^{InGaN} = (1 - x)E_g^{InN} + xE_g^{GaN} - bx(1 - x) \quad (II-5)$$

Avec

- $x$  : la concentration de gallium dans l' $In_{1-x}Ga_xN$  [s.d.]
- $b$  : le paramètre la courbure [eV]
- $E_g^{InGaN}$  : le gap d'énergie de l' $InGaN$  [eV]
- $E_g^{GaN}$  : le gap d'énergie du  $GaN$  [eV]
- $E_g^{InN}$  : le gap d'énergie de l' $InN$  [eV]

La courbe de la *figure II-6* correspond au gap d'énergie en utilisant l'expression (II-5) avec ' $E_g^{GaN}=3,42 eV$ ', ' $E_g^{InN}=0,77 eV$ ', et comme paramètre de courbure ' $b=1,43$ '.

Cette valeur de ' $1,43 eV$ ' pour le paramètre de courbure a également été rapportée par Wu et al. [30] [31] et est en accord avec la plupart des prédictions théoriques. Cependant, des effets extérieurs tels que la déformation, le dopage, ou la fluctuation de la composition peuvent faire varier ce paramètre [20].

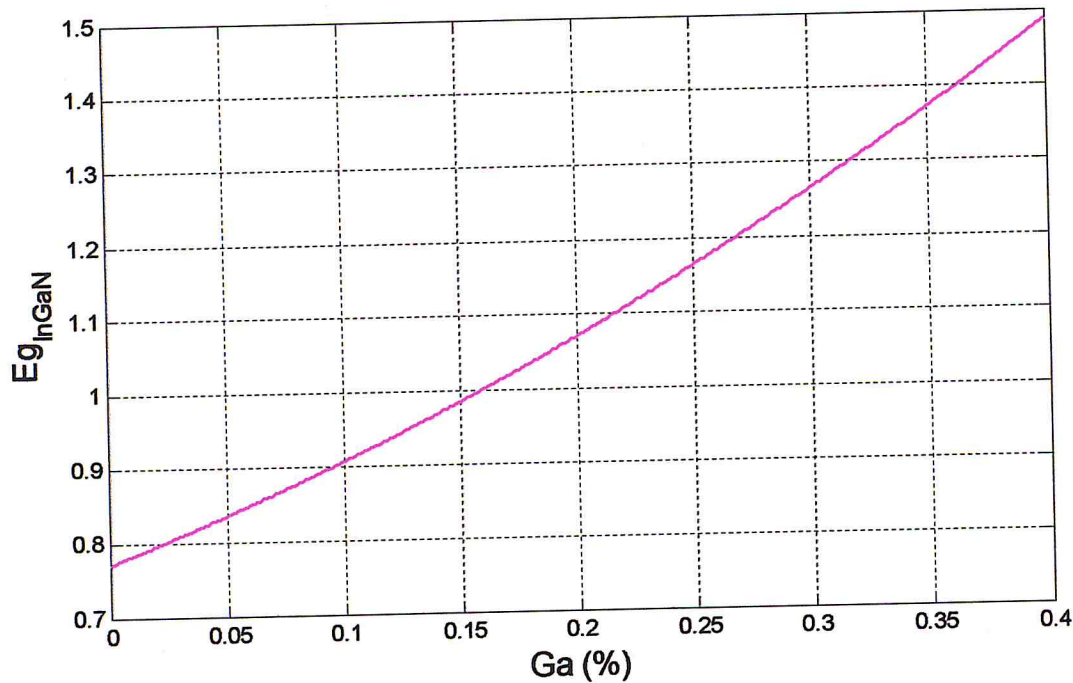


Figure II-6 : Evolution du gap d'énergie interdite de l' $In_{1-x}Ga_xN$  en fonction de la concentration de gallium en introduisant le paramètre de courbure «  $b$  ».

La *figure II.6* montre que l'énergie du gap  $E_g^{InGaN}$  évolue suivant la concentration de gallium.

#### II.3.4.2. L'effet de la contrainte sur le Gap d'énergie

L'effet de la contrainte sur les bandes de valence et de conduction peut être décomposé en deux :

- **La contrainte hydrostatique** : liée à la déformation selon l'axe de croissance ( $Oz$ ), provoquant un décalage du centre de gravité de la bande de valence et du centre de gravité de la bande de conduction ;

- **La contrainte de cisaillement** : qui lève la dégénérescence des états énergétiques des trous lourds et des trous légers en ' $k=0$ ' (typiquement d'une valeur  $\Delta_0 (hh-lh)$  de 60-80 meV pour un désaccord paramétrique de 1%).



Pour une couche soumise à une contrainte biaxiale de compression *figure II-7 (b)*, la composante hydrostatique augmente le gap moyen entre les bandes de conduction et de valence, alors que la composante de cisaillement rend les bandes de valence fortement anisotropes :

- la bande de plus haute énergie (improprement appelée bande HH) devient "lourde" selon  $k_{\perp}$  et "légère" selon  $k_{//}$ .
- la bande d'énergie inférieure (improprement appelée bande LH) devient elle "légère" selon  $k_{\perp}$  et "lourde" selon  $k_{//}$ .

Si la couche est soumise à une contrainte biaxiale de tension *figure II-7 (c)*, le gap moyen diminue et les bandes de valences sont inversées par rapport à celles d'une couche en compression :

- la bande de plus haute énergie (bande LH) reste "légère" selon  $k_{\perp}$ .
- la bande d'énergie inférieure "lourde" selon  $k_{//}$  [32].

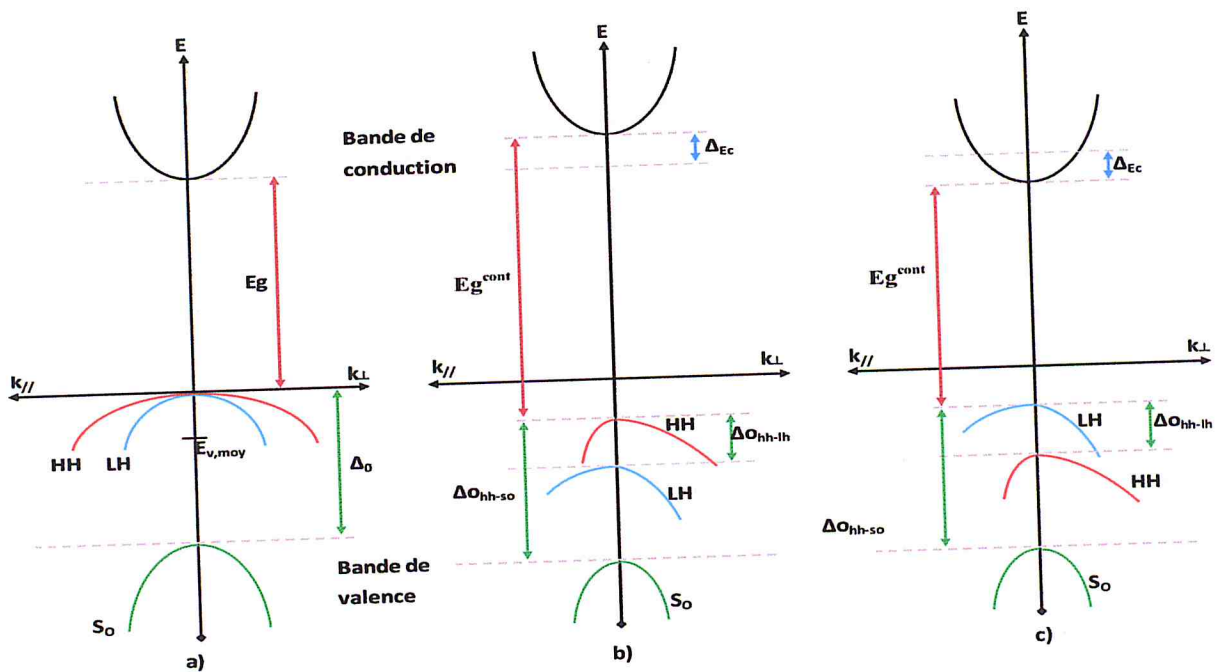


Figure II-7 : Structure de bande d'un semi-conducteur à gap directe.

a) non contraint b) en compression c) en tension

Les décalages en énergie des centres de gravité de la bande de valence et de la bande de conduction en  $k=0$  varient proportionnellement à la contrainte [32]:

$$\Delta E_{v,moy}^{hy} = a_v(2\varepsilon_{//} + \varepsilon_{\perp}) \quad (\text{II-6})$$

$$\Delta E_c^{hy} = a_c(2\varepsilon_{//} + \varepsilon_{\perp}) \quad (\text{II-7})$$

Où  $a_c$  et  $a_v$  sont respectivement les potentiels hydrostatiques de déformation pour la bande de conduction et de valence.

$a_v$  et  $a_c$  ont été obtenus grâce à la loi de Vegard à partir des potentiels de déformation hydrostatiques des binaires GaN et InN répertoriés en Annexe.

Les décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement pour chacune des bandes constituant la bande de valence sont les suivants [32]:

$$\Delta E_{hh}^{sh} = -\frac{1}{2}\delta E^{sh} \quad (\text{II-8})$$

$$\Delta E_{lh}^{sh} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{sh} + \frac{1}{2}\left[\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{sh} + \frac{9}{4}(\delta E^{sh})^2\right]^{1/2} \quad (\text{II-9})$$

$$\Delta E_{so}^{sh} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{sh} - \frac{1}{2}\left[\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{sh} + \frac{9}{4}(\delta E^{sh})^2\right]^{1/2} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$$\delta E^{sh} = 2 * b * (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{//}) \quad (\text{II-11})$$

Où  $b$  est le potentiel de déformation tétragonale.

Les résultats de simulation obtenus sont représentés dans la *figure II-8* et la *figureII-9* décrivant l'évolution des décalages énergétiques induits respectivement par la contrainte hydrostatique, et par la contrainte de cisaillement en fonction de la concentration de gallium.

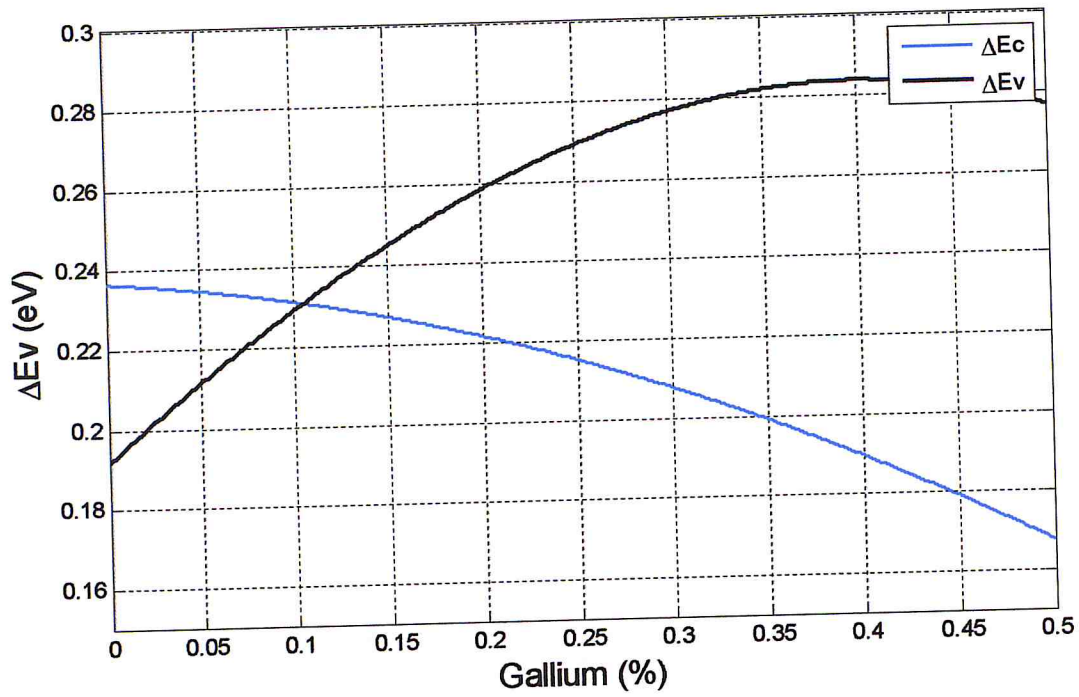


Figure II-8 : Décalages énergétiques induits par la contrainte hydrostatique en fonction de la concentration de gallium.

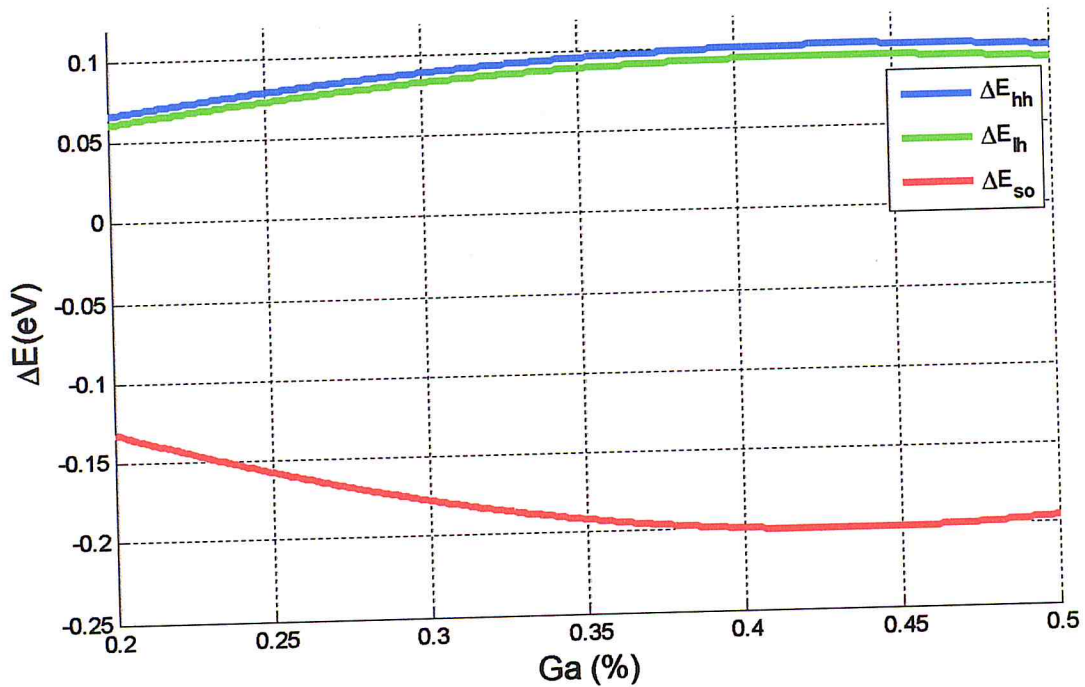


Figure II-9 : décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement pour chacune des bandes constituant la bande de valence en fonction de la concentration de gallium.



### II.3.4.3. Gap d'énergie avec contrainte

En prenant comme référence énergétique et compte tenu des équations précédentes (II-6), (II-7), (II-8), (II-9) et (II-10), on peut définir [32]:

- Le maximum de la bande de valence :

$$E_v = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_{v,moy}^{hy} + \max(\Delta E_{hh}^{sh}, \Delta E_{lh}^{sh}) \quad (II-13)$$

- Le minimum de la bande de conduction :

$$E_c = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_g^{non\ contraint} + E_c^{hy} \quad (II-14)$$

Dans ces expressions, l'énergie du gap et l'éclatement spin-orbite  $\Delta_0$  et  $E_{v,moy}$  sont relatifs au matériau non contraint. Les expressions (II-13) et (II-14) conduisent naturellement à l'expression du gap contraint [32]:

$$E_g^{cont} = E_c - E_v = E_g^{n\ cont} + \Delta E_c^{hy} - \Delta E_{v,moy}^{hy} - \max(\Delta E_{hh}^{sh}, \Delta E_{lh}^{sh}) \quad (II-15)$$

- Soit pour une couche en compression :

$$E_g^{cont} = E_{g_{hh}} = E_g^{n\ cont} + \Delta E_c^{hy} - \Delta E_{v,moy}^{hy} - \Delta E_{hh}^{sh} \quad (II-16)$$

- Ou pour une couche en tension :

$$E_g^{cont} = E_{g_{lh}} = E_g^{n\ cont} + \Delta E_c^{hy} - \Delta E_{v,moy}^{hy} - \Delta E_{lh}^{sh} \quad (II-17)$$

La détermination du gap contraint nécessite la connaissance du gap  $E_g$  et de l'éclatement spin-orbite, des constantes élastiques de la couche, des potentiels de déformation hydrostatique et du potentiel de déformation tétragonale  $b$ .

La *figure II-10* représente la variation du gap avec la contrainte en tension engendrée par la superposition de la couche mince  $In_{1-x}Ga_xN$  sur le substrat GaN, calculée par l'équation (II-17).

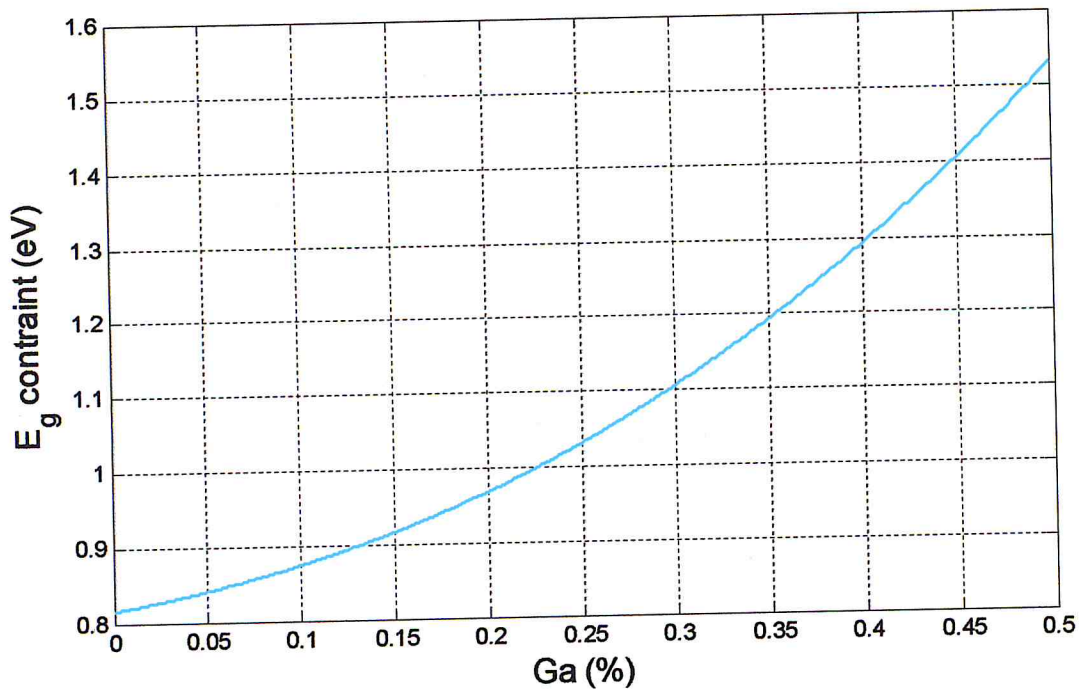


Figure II-10 : Evolution de l'énergie du gap contraint après éclatement pour l' $In_{1-x}Ga_xN$  en fonction de la concentration de gallium.

#### II.4. Les propriétés optiques

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption.

Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant.

Par exemple, dans un composant composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. Cette propriété permet de confiner la lumière dans une couche particulière, comme dans les lasers. Elle est aussi très intéressante pour les applications de cellules solaires afin d'augmenter les efficacités d'absorption de la lumière.

### II.4.1. Le coefficient d'absorption

L'interaction entre les photons et le semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : c'est le coefficient d'absorption, ce dernier traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de sa longueur d'onde [33].

De ce fait, lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau, la transition des électrons vers la bande de conduction n'est plus possible ainsi le photon n'est pas absorbé.

Le coefficient d'absorption  $\alpha(E)$ , pour une énergie de photon  $E$  supérieure à l'énergie du gap est donné par la relation suivante [34] :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (\text{II-18})$$

- $\alpha(E)$  : Coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon  $E$ ,
- $\alpha_0$  : Constante,
- $E_g$  : L'énergie du gap.

La *figure II-11* et la *figure II-12* représentent l'évolution du coefficient d'absorption :

- une en fonction de la concentration de gallium pour différentes énergies de photons incidents fixes ;
- l'autre en fonction des longueurs d'ondes des photons incidents pour différentes concentrations de gallium.



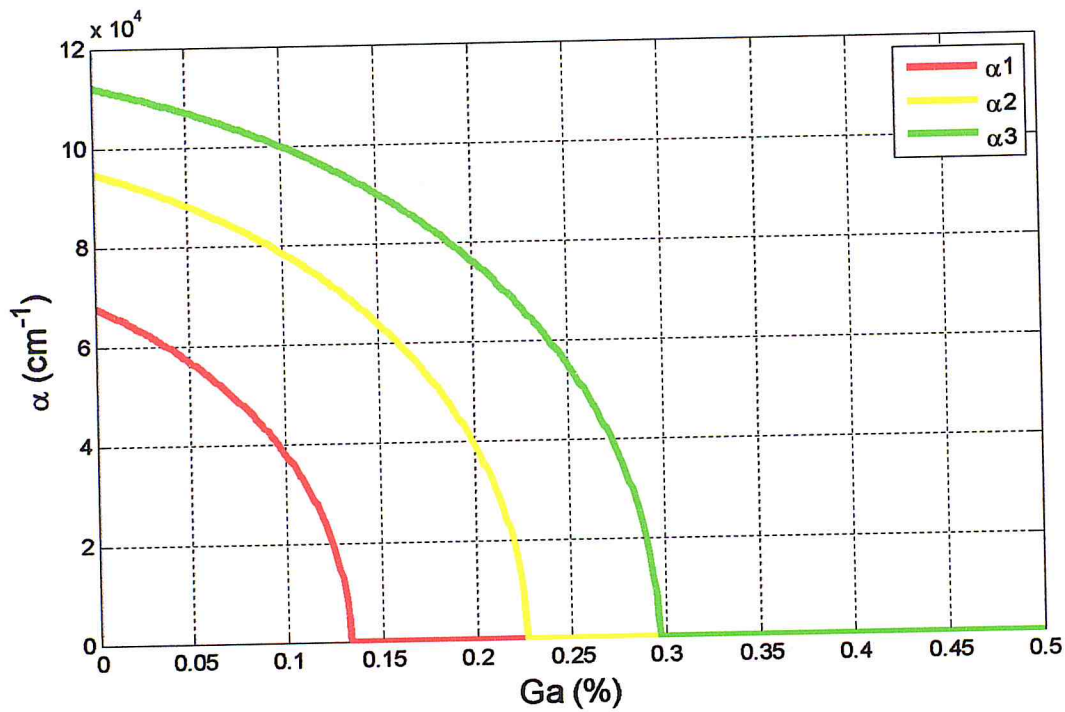


Figure II-11 : l'évolution du coefficient d'absorption ; en fonction de la concentration de gallium pour différentes énergies de photons incidents fixes.

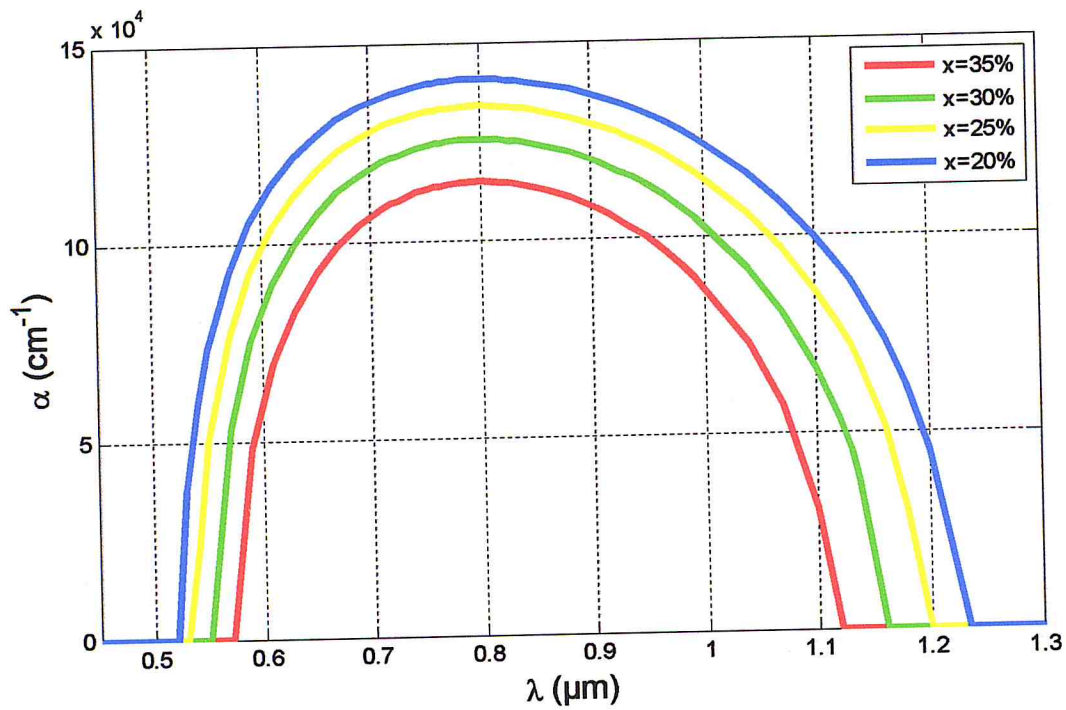


Figure II-12 : l'évolution du coefficient d'absorption ; en fonction des longueurs d'ondes des photons incidents pour différentes concentrations de gallium.

La *figure II-11* reflète que pour des énergies de photons incidents inférieures à l'énergie du Gap, le coefficient d'absorption est nul, en raison de l'insuffisance d'énergie des électrons pour franchir la bande interdite de l'alliage  $In_{1-x}Ga_xN$ .

D'autre part, avec l'augmentation de l'indium le Gap augmente, dès que son énergie devient supérieure à celle du photon incident, le coefficient d'absorption diminue d'une manière forte.

La *figure II-12* montre une diminution de l'absorption avec la diminution de l'intervalle des longueurs d'ondes. Autrement dit la quantité de photons absorbés diminue lorsque la concentration en gallium augmente.

#### II.4.2. L'indice de réfraction

L'indice de réfraction provient du phénomène de réfraction désignant un changement de direction de la lumière lors du passage d'un milieu à un autre. La notion d'indice de réfraction a d'abord été introduite empiriquement comme coefficient dans les lois de Snell-Descartes [20].

L'une des raisons pour laquelle nous étudions l'indice de réfraction est de réduire la réflectivité des matériaux, par conséquent, augmenter l'intensité du faisceau incident, et ce par l'introduction de couches additionnelles. Ces dernières doivent avoir une épaisseur bien spécifique et un indice de réfraction approprié pour pouvoir jouer le rôle de couches antireflet [20].

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

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{II-19})$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change selon la longueur d'onde. La valeur de l'indice de réfraction est extraite de la partie

constante, loin de la zone d'absorption. Dans le cas du GaN, elle est égale à environ 2,3 [35], pour l'InN, elle vaut environ 2,9 dans l'infrarouge [36].

L'indice de réfraction de l'alliage  $In_xGa_{1-x}N$  est calculé à partir des indices de réfraction des binaires selon la loi de Végard. Équation (II-1)

$$n^{InGaN} = xn^{InN} + (1 - x)n^{GaN} \quad (II-20)$$

### II.4.3. Le coefficient de réflexion:

La réduction de la réflexion de la lumière est réalisée en jouant sur les indices de réfraction des matériaux traversés.

La réflexion s'exprime par l'équation suivante [37]:

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (II-21)$$

Plus la différence des indices de réfraction est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante [37].

La *figure II-13* montre l'évolution de l'indice de réfraction en fonction des concentrations de gallium.



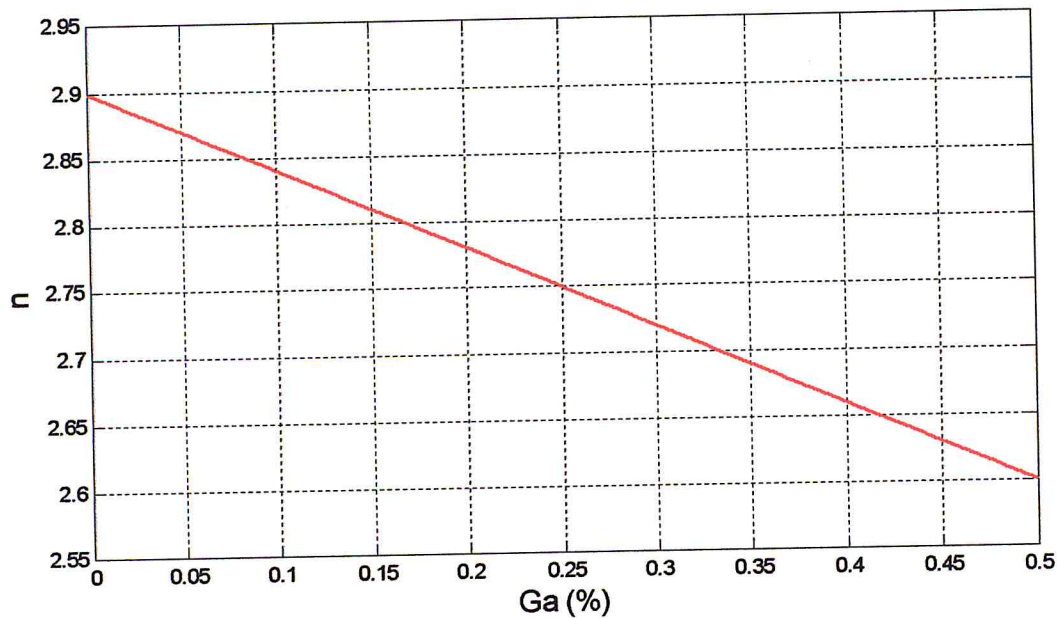


Figure II-13 : l'évolution de l'indice de réfraction; en fonction des concentrations de gallium.

## II.5. Conclusion

*Le deuxième chapitre de ce mémoire décrit les principales propriétés : structurales, électriques et optiques de l'InGaN. Nous avons étudié la qualité cristalline du matériau en fonction de la concentration de gallium, l'épaisseur de la couche active et du substrat GaN.*

*Nous avons montré que les matériaux avec de faibles concentrations de gallium présentaient une bonne qualité cristalline. Cependant, cette dernière diminue avec l'incorporation de l'indium à cause de l'augmentation du désaccord de maille avec le substrat et du désordre introduit par les atomes d'indium dans le réseau, provoquant la formation de nombreux défauts.*

## **CHAPITRE III**

# **Simulation et résultats**

### III.1. Introduction

*Dans ce troisième chapitre, nous présenterons la simulation d'une cellule photovoltaïque à base d'InGaN effectuée à l'aide du logiciel Matlab.*

*Nous avons étudié les performances de la cellule solaire ainsi que l'impact de la concentration de gallium sur l'alliage InGaN. Afin de déterminer sa caractéristique électrique et optimiser les concentrations de gallium pour obtenir un meilleur rendement de conversion photovoltaïque.*





### III.2. L'efficacité quantique externe

Le rendement quantique externe est défini comme le rapport entre le nombre d'électrons photogénérés et le nombre de photons incidents.

L'efficacité quantique externe est donnée par la relation suivante [38] :

$$EQE(\lambda) = [1 - R(\lambda)] * [1 - \exp(-\alpha w)] \quad (\text{III-1})$$

Avec:

- $R(\lambda)$  : Réflectivité de la cellule (%).
- $\alpha$  : Absorption ( $cm^{-1}$ ).
- $w$  : Largeur de la zone de charge d'espace ( $\mu m$ ).

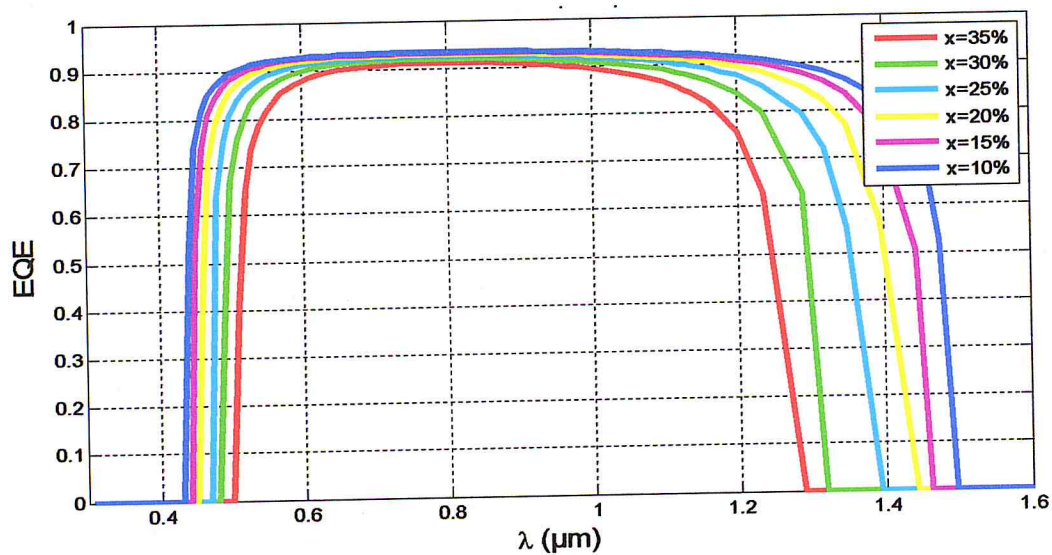


Figure III-1 : Variation de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde pour différentes concentrations de gallium.

La figure III-1 montre la variation de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations de gallium. L'augmentation de la concentration de gallium implique une diminution en amplitude de l'efficacité quantique avec un rétrécissement suivant l'axe des longueurs d'onde.

### III.3. La caractéristique courant-tension

A l'obscurité, la cellule photovoltaïque est un dispositif redresseur. Sa caractéristique courant-tension est donnée par [39] :

$$I_{obs}(V) = I_s \left( \exp\left(\frac{qv}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (\text{III-2})$$

Avec :

- $q$  : Charge élémentaire =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C.
- $V$  : Tension aux bornes de la jonction (V).
- $k$  : Constante de Boltzmann =  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>.
- $T$  : Température (K).
- $I_s$  : Courant de saturation inverse de la jonction p-n.
- $n$  : Coefficient d'idéalité de la jonction.

Ce courant d'obscurité correspond au courant de diode ( $I_d$ ), il résulte de la polarisation de la jonction.

Sous illumination, il apparaît un courant  $I_{ph}$  qui est dû aux porteurs générés et séparés par le champ électrique interne. Ce courant  $I_{ph}$  passe dans le circuit extérieur à travers une résistance de charge  $R_c$ . Il en résulte une polarisation  $V$  de la cellule. Si la superposition des courants d'obscurité sous illumination est admise, alors [39] :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \quad (\text{III-3})$$

Le courant photon-courant ( $I_{ph}$ ) est donné par l'expression suivante [40] :

$$I_{ph} = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) EQE_{Total}(\lambda) d\lambda \quad (\text{III-4})$$

Avec:

- $q$  : Charge élémentaire (C).
- $F(\lambda)$ : Spectre solaire.
- $\lambda$  : Longueur d'onde (m).
- $EQE(\lambda)$  : Efficacité Quantique Externe (%).

Ainsi, il existe deux courants opposés au sein de la cellule :

- le courant  $I_{ph}$ , obtenu par éclairage, contribue au courant inverse de la diode ;
- le courant d'obscurité  $I_{obs}$  direct résultant de la polarisation du composant.

L'utilisation des expressions (III-2), (III-3) et (III-4) abouti à l'expression du courant en fonction de la tension (III-5) :

$$J(V) = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) EQE_{Total}(\lambda) d\lambda - J_0 \left(1 - e^{\frac{qV}{kT}}\right) \quad (III-5)$$

Où  $J_0$  est le courant de saturation donné par [20] :

$$J_0 = q \left[ \frac{D_p * n_{ip}^2}{L_p * N_d} + \frac{D_n * n_{in}^2}{L_n * N_a} \right] \quad (III-6)$$

Avec :

- $n_{in}$  : Concentration en porteurs du semi-conducteur intrinsèque N.
- $n_{ip}$  : Concentration en porteurs du semi-conducteur intrinsèque P.
- $D_x$  : Constante de diffusion des porteurs.
- $L_x$  : Longueur de diffusion des porteurs.
- $x$  : (n : pour électrons et p : pour trous).

L'expression (III-5) a permis de tracer la caractéristique courant-tension représentées dans la *figure III-2* pour différentes fraction de gallium.

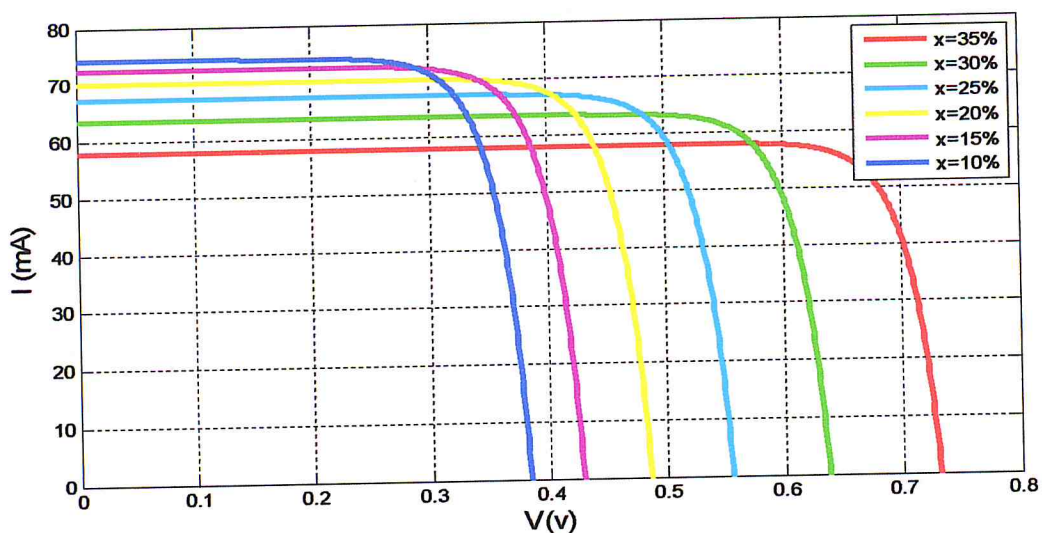


Figure III-2: Caractéristique courant-tension pour différentes concentrations de gallium.



Les caractéristiques montrent une augmentation de la tension de court-circuit  $V_{co}$  avec l'augmentation de la concentration de gallium.

Dans un même temps, une diminution du courant de court-circuit  $J_{cc}$  avec l'augmentation de la concentration de gallium.

### III.3.1. Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et sans application de tension, la *figure III-3* montre la variation de ce dernier en fonction de la concentration de gallium.

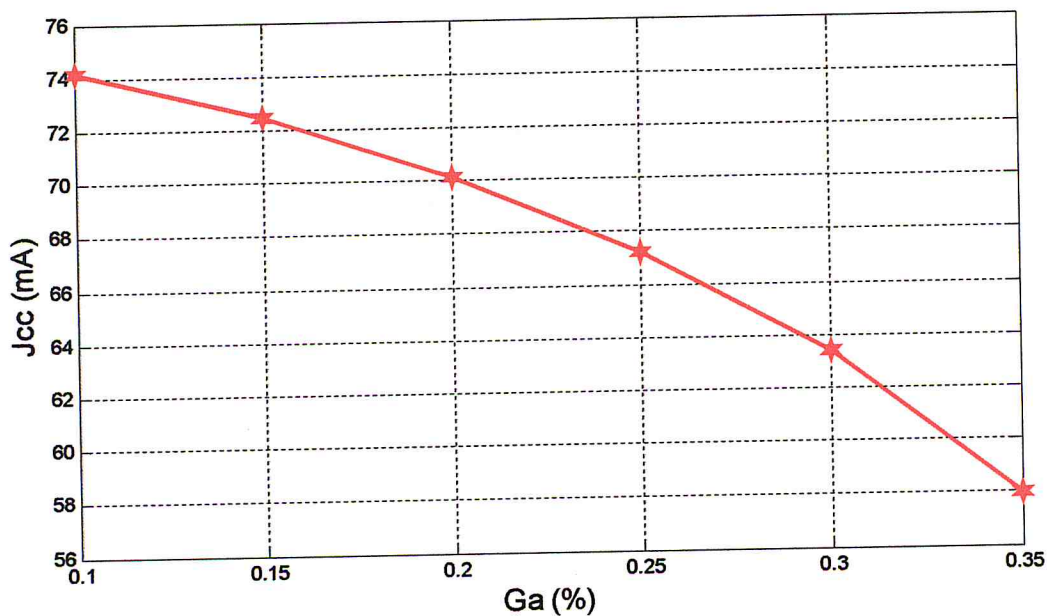


Figure III-3: Variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la concentration de gallium.

D'après la simulation illustrée par la *figure III-3*, le courant de court-circuit diminue avec l'augmentation de la concentration de gallium, il atteint 58 mA pour une concentration de 35%.

### III.3.2. Tension de circuit ouvert

D'après la définition de la tension de circuit ouvert vu en premier chapitre, son évolution peut être extraite directement via la caractéristique courant- tension lorsque le courant est nul.

La *figure III.4* illustre cette évolution en fonction de la concentration de gallium.

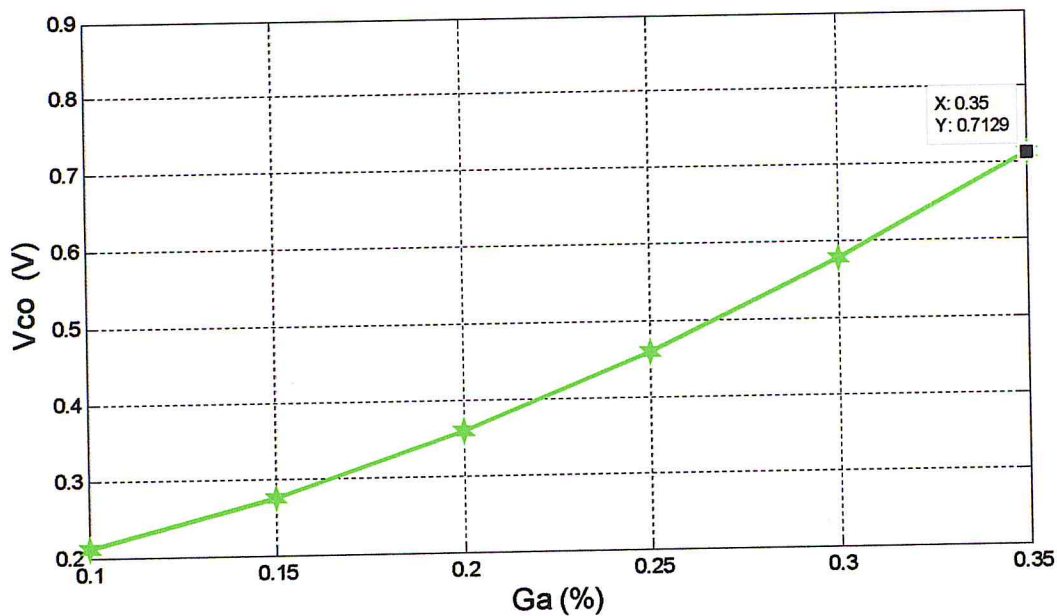


Figure III-4: Variation du courant de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration de gallium.

D'après la *figure III-4*, la tension de circuit ouvert augmente avec l'augmentation de la concentration de gallium, elle atteint environ 0.71V pour une concentration de 35%.

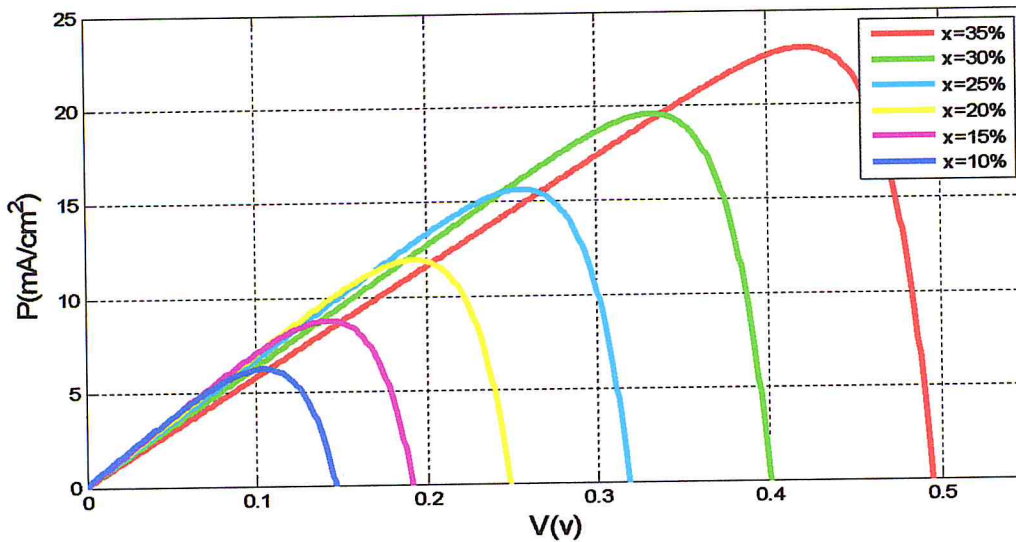
### III.4. La puissance

La puissance électrique  $P$  disponible aux bornes d'une cellule solaire est donnée par la relation suivante :

$$P = V * I$$

(III-7)

La *figure III-5* représente la variation de la puissance délivrée en fonction de la tension pour différentes fractions de gallium. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{max}$ .

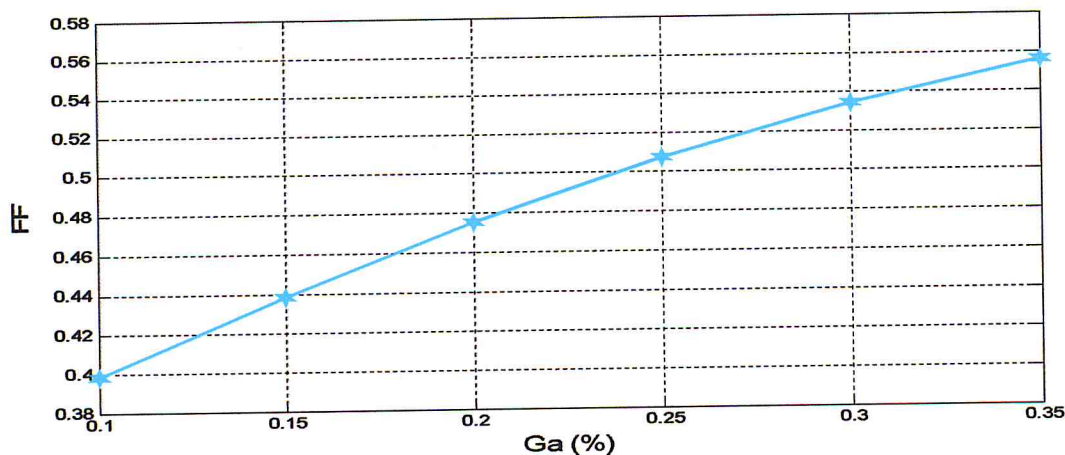


**Figure III-5:** Variation de la puissance en fonction de la tension pour plusieurs concentrations de gallium.

La puissance maximale délivrée par la cellule solaire est de l'ordre de quelques milliwatts, la *figure III-5* montre une augmentation importante dans la puissance délivrée ainsi que la tension avec l'incorporation de gallium.

### III.5. Le facteur de forme

Le facteur de forme est un rapport entre la puissance maximale et la puissance idéale de la cellule solaire. La *figure III-6* illustre la variation de ce rapport en fonction de la concentration de gallium.



**Figure III-6:** Variation du facteur de forme en fonction des concentrations de gallium.



La *figure III-6* reflète l'évolution croissante du facteur de forme en fonction de la concentration de gallium pour atteindre une valeur de 0.55 pour une concentration de 35%.

### III.6. Le rendement $\eta$

Le rendement est l'un des paramètres les plus importants caractérisant la cellule solaire. Un rapport entre la puissance électrique fournie par la cellule et la puissance incidente.

Dans les conditions de référence STC (Standard Test Condition), c'est-à-dire sous un ensoleillement de  $1000\text{w/m}^2$ , une température de  $25^\circ\text{C}$  et un spectre AM1.5, la variation du rendement de conversion en fonction de la concentration de gallium a pu être tracé et illustré dans la *figure III-7*.

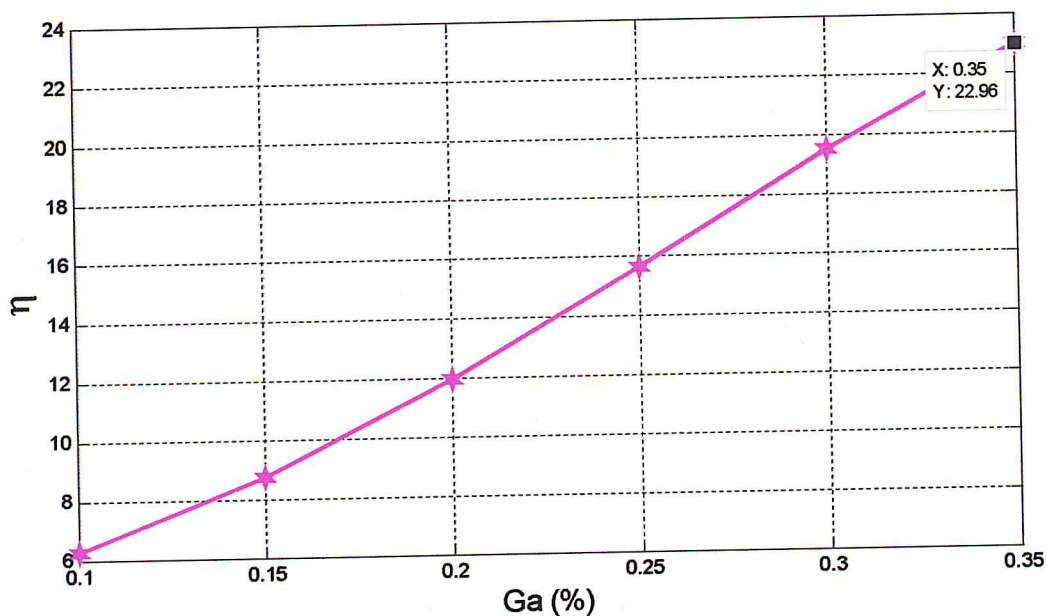


Figure III-7: Variation du rendement en fonction des concentrations de gallium.

La *figure III-7* montre que le rendement évolue en fonction de la concentration de gallium. Il atteint un rendement de 22.96 % pour une concentration de 35%.

Dans la littérature, des cellules à simples jonctions en matériau III-V, le plus haut rendement a été présenté avec du GaAs par l'institut pour les systèmes à énergie solaire de Fraunhofer (FhG-ISE), avec 29,1 % sous 117 soleils [20].

A ce jour, Jani et al. [41] ont rapporté les meilleures performances avec une cellule montrant 2,4 V de  $V_{co}$ , 3,7 mA/cm<sup>2</sup> de  $J_{cc}$  et un FF de 0,78. Pour obtenir ces valeurs, ils ont utilisé le spectre d'un soleil amplifié dans la gamme UV, sans pourtant donner sa puissance incidente. Si on utilise la puissance au niveau AM0, on obtient une puissance maximum de 5,14 mW/cm<sup>2</sup> (ou un rendement de 5,14 %).

Nous nous rapprochons du rendement expérimental pour une concentration de 10% de gallium. Le tableau III-1 récapitule les résultats obtenus lors de cette étude.

Concentration de gallium x	35	30	25	20	15	10
Le courant $J_{cc}$ (mA)	57.94	63.42	67.18	70.13	72.46	74.16
La tension $V_{co}$ (V)	0.712	0.576	0.458	0.357	0.275	0.210
Le facteur de forme FF (%)	0.555	0.533	0.507	0.475	0.438	0.398
Le rendement $\eta$ (%)	22.96	19.52	15.61	11.92	8.736	6.213

Tableau III-1: Les résultats obtenus pour  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et le rendement pour différentes concentrations de gallium.

### III.7. Conclusion

Ce dernier chapitre a pour objet, la simulation des caractéristiques électriques de la cellule solaire à base d' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}/\text{GaN}$ .

Cette simulation a montré l'influence de l'incorporation du gallium sur les paramètres électriques de la cellule :

Une bonne caractéristique courant-tension ainsi qu'un bon rendement avec des petites teneurs en gallium ont été obtenu lors de cette étude.



*Conclusion*

# Conclusion

Le nitrure d'indium gallium présente des caractéristiques structurelles et optiques très intéressantes suite à son large gap d'énergie interdite pouvant augmenter son absorption, permettant ainsi de couvrir toute la gamme du spectre solaire.

L'incorporation du gallium avec de faibles concentrations a montré de bonnes caractéristiques (optiques et électriques). Pour 10% de gallium nous avons 90% d'indium, une forte concentration engendrant un désaccord de maille très important, formant ainsi des déformations et des défauts au sein du matériau InGaN.

Notre étude théorique a pu enregistrer une bonne caractéristique courant-tension et un bon rendement de l'ordre de 23% pour l' $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ .

Partout dans le monde l'Energie Solaire connaît un regain d'intérêt, ce qui a motivé notre étude. Malgré son faible rendement par rapport aux combustibles fossiles, l'énergie photovoltaïque est non seulement valable sur le long terme mais c'est surtout la meilleure alternative aux énergies fossiles.

La révolution solaire est en marche et notre étude en est un témoignage.

# *Annexes*



## A.1. Caractéristiques des matériaux massifs

Parameters	GaN	InN
$a_{ic}$ (Å) at $T=300$ K	4.50	4.98
$E_g^{\Gamma}$ (eV)	3.42	0.77
$\alpha(\Gamma)$ (meV/K)	0.593	0.245
$\beta(\Gamma)$ (K)	600	624
$E_g^X$ (eV)	4.52	2.51
$\alpha(X)$ (K)	0.593	0.245
$\beta(X)$ (meV/K)	600	624
$E_g^L$ (eV)	5.59	5.82
$\alpha(L)$ (K)	0.593	0.245
$\beta(L)$ (meV/K)	600	624
$\Delta_{so}$ (eV)	0.017	0.006
$m_e^*(\Gamma)$	0.15	0.12
$m_l^*(X)$	0.5	0.48
$m_t^*(X)$	0.3	0.27
$\gamma_1$	2.67	3.72
$\gamma_2$	0.75	1.26
$\gamma_3$	1.10	1.63
$m_{so}^*$	0.29	0.3
$E_p$ (eV)	25.0	25.0
$F$	-0.92	-0.92
VBO (eV)	-2.64	-2.38
$a_c$ (eV)	-2.2	-1.85
$a_v$ (eV)	-5.2	-1.5
$b$ (eV)	-2.2	-1.2
$d$ (eV)	-3.4	-9.3
$c_{11}$ (GPa)	293	187
$c_{12}$ (GPa)	159	125
$c_{44}$ (GPa)	155	86

**Tableau A.1 :** Paramètres des nitrures binaire GaN, InN pour une structure Zinc-blende [42].

## A.2. Tableau périodique

	I																		VIII
1	H 1	II										III	IV	V	VI	VII			He 2
2	Li 3	Be 4										B 5	C 6	N 7	O 8	F 9			Ne 10
3	Na 11	Mg 12										Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17			Ar 18
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Ce 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35		Kr 36
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53		Xe 54
6	Cs 55	Ba 56	Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85		Rn 86
7	Fr 87	Ra 88	Lr 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Uun 110	Uuu 111	Uub 112							

Tableau A.2 : Tableau périodique des éléments.

# Liste des figures :

## CHAPITRE I

- Figure I-1 :** Diagramme énergétique des semi-conducteurs de type P et N avant (a), et après (b) mise en contact... ..page 8
- Figure I-2 :** Diagramme énergétique d'une jonction P-N lors d'une polarisation en directe (a) et en inverse (b)... ..page 9
- Figure I-3 :** Diagramme énergétique d'une jonction P-N sous éclairage, en situation de circuit-ouvert. 1) Création d'une paire électron-trou ; 2) Séparation des charges par la jonction P-N ; 3) Collecte des porteurs... ..page 10
- Figure I-4 :** Le gap direct et le gap indirect où  $k$  : le vecteur d'onde associé à un électron... .. 11
- Figure I-5 :** Réseau cristallin dans la structure Zinc-blende [8]... .. 12
- Figure I-6 :** Densité spectrale du rayonnement solaire [10]... .. 14
- Figure I-7 :** La distribution spectrale selon la masse d'air... .. 16
- Figure I-8 :** schéma de la structure d'une cellule PV... .. 18  
a) phénomène de photo génération b) collecte des porteurs pour différentes longueurs d'ondes.
- Figure I-9:** Structure photovoltaïque standard [18]... .. 19
- Figure I-10 :** La caractéristique typique d'une cellule photovoltaïque pour un éclairage et une température donnés... .. 23
- Figure I-11 :** schéma équivalent d'une cellule idéale... .. 25

## CHAPITRE II

- Figure II-1 :** Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, exemple du GaN:(a) [100], (b) [110], (c) [111] [20]... .. 32
- Figure II-2 :** Variation du paramètre de maille de l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  en fonction de la concentration de gallium... .. 33
- Figure II-3 :** Illustration des deux types de contraintes... .. 34
- Figure II-4 :** Variation du désaccord paramétrique en fonction de la concentration d'indium..... 35
- Figure II-5 :** Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de gallium... .. 37
- Figure II-6 :** Evolution du gap d'énergie interdite de l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  en fonction de la concentration de gallium en introduisant le paramètre de courbure « b »... .. 39
- Figure II-7 :** Structure de bande d'un semi-conducteur à gap directe. a) non contraint b) en compression c) en tension... .. 40
- Figure II-8 :** Décalages énergétiques induits par la contrainte hydrostatique en fonction de la concentration de gallium... .. 42



**Figure II-9 :** décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement pour chacune des bandes constituant la bande de valence en fonction de la concentration de gallium... ..42

**Figure II-10 :** Evolution de l'énergie du gap contraint après éclatement pour l' $In_{1-x}Ga_xN$  en fonction de la concentration de gallium... .. 44

**Figure II-11 :** l'évolution du coefficient d'absorption ; une en fonction de la concentration de gallium pour différentes énergies de photons incidents fixes... ..46

**Figure II-12 :** l'évolution du coefficient d'absorption ; en fonction des longueurs d'ondes des photons incidents pour différentes concentrations de gallium... ..46

**Figure II-13 :** l'évolution de l'indice de réfraction; en fonction des concentrations de gallium.....49

### CHAPITRE III

**Figure III-1 :** Variation de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde pour différentes concentrations de gallium... ..51

**Figure III-2:** Caractéristique courant-tension pour différentes concentrations de gallium... ..53

**Figure III-3:** Variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la concentration de gallium... ..54

**Figure III-4:** Variation du courant de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration de gallium.....55

**Figure III-5:** Variation de la puissance en fonction de la tension pour plusieurs concentrations de gallium... ..56

**Figure III-6:** Variation du facteur de forme en fonction des concentrations de gallium... ..56

**Figure III-7:** Variation du rendement en fonction des concentrations de gallium... ..57

### Liste des tableaux :

**Tableau I-1 :** Extrait du tableau périodique qui représente l'emplacement des semi-conducteur III-V... ..11

**Tableau III-1:** Les résultats obtenus pour  $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et le rendement pour différentes concentrations de gallium... ..58

# *Bibliographie*

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Zhang L, Jiang FD, Feng JY (2003) Sol Energy Mater Sol Cells 80:483
- [2] Al-Bassam AAI (1999) Physica B 266:192
- [3] Dhanam M, Balasundaraprabhu R, Jayakumar S, GopalakrishnanP, Kannan MD (2002) Phys Stat Sol 191:149
- [4] Adurodijia FO, Kim SF, Kim SD, Song JS, Yoon KH, Ahn BT (1998) Sol Energy Mater Sol Cells 55:225
- [5] DUCHATELET Aurélien. «Synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se 2 pour cellules solaires par électrodépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium.», Thèse de doctorat, Université Lille 1, France, 2012.
- [6] Henry Mathieu & Hervé Fanet. «Physiques des semiconducteurs et des composants électroniques », DUNOD, 6e édition.
- [7] Benaïcha Mouna. «Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque», Université Colonel Hadj Lakhdar, Batna, 2007.
- [8] LANGUY Fabian. «Caractérisation de nanocolonnes d' $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_{(x)}\text{N}$  en vue d'étudier l'origine de la haute conductivité de l'InN», Laboratoires : LPME (FUNDP, Namur) et ISOM (UPM, Madrid), 2007.
- [9] Pierre Bessemoulin et Jean Oliviéri. 'Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette', Météo-France, Service central d'exploitation de la météorologie Toulouse, La Météorologie 8eme série - n°31 - septembre 2000.
- [10] Dariga meekhun , réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation de réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique. Université de Toulouse, thèse de doctorat 2010.
- [11] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible». Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [12] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho «Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ». IEEETransaction on powr electronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May 2009.



- [13] Thibaut Desrues « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [14] Rémi Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Angers , 2003.
- [15] HELALI Kamelia « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative ». Mémoire de magister en électronique, de l'UMMTO (Tizi-Ouzou).
- [16] Ecole d'Eté d'Optoélectronique, PHYSIQUE DES SEMICONDUCTEURS III-V S. LAVAL Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS (URA 022), Bat. 220. Université Paris Sud, F-91405 Orsay Cedex, France.
- [17] Les principe de l'énergie solaire photovoltaïque, Ingénieur de formation. Directeur du pôle Recherche et Développement du bureau d'études GAEA Groupe, spécialisé dans le domaine de l'environnement et notamment de l'énergie renouvelable, 2008.
- [18] J.S. Kim, B. Lagel, E. Moons, N. Johansson, I.D. Baikie, W.R. Salaneck, R.H. Friend, F. Cacialli : "Kelvin probe and ultraviolet photoemission measurements of indium tin oxide work function: a comparaison". Synthetic Metals 111-112 (2000) 311-314.
- [19] LEKHAL Brahim.«Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky», thèse de Magistere, Université de Batna, 2009.
- [20] Vanessa GORGE. «Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V», thèse de DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS-SUD 11, 2012.
- [21] Yacine MAAROUF.«Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco.», Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider–Biskra, 2013.
- [22] REMACHE Louardi. «Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements anti-réfléchissants.», Thèse de Doctorat, Université Mentouri–Constantine, 2011.
- [23] DIB Wassila.«modelisation des structures photovoltaïques aspects fondamentaux et appliques», thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2010.
- [24] J.E.Kroeze, T.J.Savenjie, M.J.W.Vermeulen et J.M.Warman, J.Phys. Chem. B 2003, 107, 7696.

- [25] N Brown: Solar Junction Breaks Concentrated Solar World Record with 43.5% Efficiency, 2012.
- [26] BOURAIYOU Assia. «Elaboration et caractérisation des couches minces  $\text{CuInSe}_2$  par électrodéposition.» Thèse de Doctorat, Université Mentouri–Constantine, 2009.
- [27] Wu, J., et al. Superior radiation resistance of  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system. *Journal of Applied Physics*. 2003, Vol. 94, 6477.
- [28] <http://thesestm.free.fr/ch1/thCHAP1-3.htm>
- [29] KERKAR Fouzia. «Calcul du gain optique d'un puits quantique à base de  $\text{GaInNAs/GaAs}$  pour son utilisation dans les télécommunications optiques émettant à une longueur d'onde de  $1.3 \mu\text{m}$ », UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA, 2006.
- [30] K. Köksal, B. Gönül and M. Oduncuoglu. «Critical layer thickness of  $\text{GaIn(N)As(Sb)}$  QWs on  $\text{GaAs}$  and  $\text{InP}$  substrates for (001) and (111) orientations», *Eur. Phys. J. B69*, 211–218 (2009).
- [31] Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 106, 011101.
- [32] Wu, J., et al. Universal bandgap bowing in group-III nitride alloys. *Solid State Commutations*. 2003, Vol. 127, 411.
- [33] Yvan CUMINAL. «Réalisation et étude de diodes lasers à base de  $\text{GaSb}$  émettant vers  $2,3 \mu\text{m}$  pour application à l'analyse des gaz», thèse de DOCTORAT, UNIVERSITE MONTPELLIER II, Octobre 1997.
- [34] NICHIPORUK OLEKSIY. «Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités», Institut national des sciences appliquées de LYON, 2005.
- [35] Omkar K. Jani. «DEVELOPMENT OF WIDE-BAND GAP  $\text{InGaN}$  SOLAR CELLS FOR HIGH-EFFICIENCY PHOTOVOLTAICS», Georgia Institute of Technology August, 2008.
- [36] Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61.
- [37] Ioffe Physyco-Technical Institutue.  $\text{GaN}$  - Gallium nitride. Electronic archive. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties. [Online] [Cited: 11 16, 2011.] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/index.html>.



[38] J.C. Rimada, L. Hernández, J.P. Connolly, K.W.J. Barnham: «Conversion efficiency enhancement of AlGaAs quantum well solar cells», Microelectronics Journal 38, 2007, pp 513–518.

[39] RAHMOUNI Mawahib: «Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d'améliorer leur rendement», thèse de Doctorat, Université d'Oran, Janvier 2010.

[40] J.C. Rimada, L. Hernández, J.P. Connolly, K.W.J. Barnham: «Conversion efficiency enhancement of AlGaAs quantum well solar cells», Microelectronics Journal 38 (2007) 513–518.

[41] Jani, O., et al. Design and characterization of GaN/InGaN solar cells. Applied Physics Letters. 2007, Vol. 91, 132117.

[42] I. Vurgaftman and J. R. Meyer, L. R. Ram-Mohan. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. Applied Physics Review, 2001 American Institute of Physics, DOI: 10.1063/1.1368156

