

MA-530-49-1

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة  
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

كلية العلوم  
FACULTE DES SCIENCES  
قسم الفيزياء  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

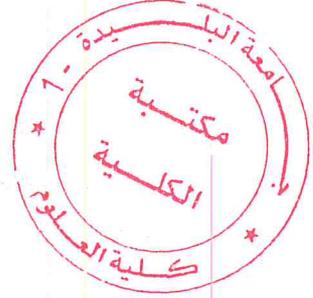
MEMOIRE DE MASTER  
Spécialité : Energies renouvelables  
Option : Photovoltaïque

Présenté par :

Mohamed Yacine ZEFFOUNI

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER EN PHYSIQUE

ETUDE ET SIMULATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE  
A BASE DE InGaN (SEMI-CONDUCTEUR III-V)  
POUR L'AMELIORATION DE SON RENDEMENT



Présenté devant le jury constitué de :

Mr EL BEY Moussa

Maitre assistant A

Président

Mr AISSAT Abdelkader

Professeur

Promoteur

Mr ALIANE Hassen

Maitre assistant A

Examineur

MA-530-49-1

## REMERCIEMENTS ET DEDICACES

Je tiens à remercier, en premier lieu, mon promoteur Pr AISSAT Abdelkader pour la confiance qu'il a mit en moi en me proposant ce sujet, ainsi que pour ses orientations, ses connaissances et surtout sa patience avec moi.

Je remercie vivement les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon mémoire. Votre participation à mon jury de soutenance a été un grand honneur pour moi.

Je remercie aussi tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Un remerciement tout particulier pour la personne qui a rendu cela possible.

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père, qui j'espère aurait été fier de moi

Je le dédie aussi à ma mère et à toute ma famille

Sans oublier mes enfants. J'espère que ce travail sera pour eux un moteur pour la course au savoir.

Je n'oublie pas de citer ma femme (sinon . . .) pour sa patience et ses encouragements.

Et en fin de compte j'ai soutenu avant toi.

## ملخص

الطاقة الشمسية، خصوصا الخلايا الكهروضوئية أصبحت طاقة المستقبل. و الدراسات على المواد الشبه الناقلة V-III فتحت الطريق إلى آفاق جديدة. على سبيل المثال، تم تخفيض فجوة الطاقة في InGaN إلى 0.7 eV الشي الذي سمح لتطوير سبائك تغطي تقريبا الطيف الشمسي بأكمله، وبالتالي زيادة كفاءة الخلايا الضوئية. مع هذا الاعتبار، اتخذنا نموذجا خلية الضوئية على أساس InGaN على ركيزة GaN، وبعد أن عرفنا معالمها الرئيسية، قمنا بمحاكاة طريقته العملية باستخدام البرنامج MATLAB. هذا ما سمح لنا للخروج بنموذج لخلية كهروضوئية مع مجموعة من المعلمات المادية على تركيز الإنديوم والغاليوم في السبيكة وبالتالي الحصول على الأداء والاستجابة الطيفية الأمثل.

## Résumé :

L'énergie solaire et en particulier l'énergie photovoltaïque est en passe de devenir l'énergie du futur. Et les études menées sur les semi conducteurs III-V ont ouvert la voie à de nouvelles perspectives. Pour exemple, l'énergie de gap de l'InGaN a été réduite à 0.7 eV permettant de développer des alliages couvrant pratiquement tout le spectre solaire et de ce fait augmenter le rendement des cellules photovoltaïques.

Dans cette optique, nous avons pris comme modèle une cellule photovoltaïque à base de InGaN sur un substrat de GaN, et après avoir défini ses principales caractéristiques, nous avons simulé son fonctionnement à l'aide du logiciel MATLAB.

Ce qui nous a permis de modéliser une cellule avec un ensemble de paramètres physiques portant sur la concentration de l'Indium et du Gallium dans l'alliage et obtenir ainsi un rendement et une réponse spectrale optimum.

## Abstract

Solar energy, especially photovoltaic is becoming the energy of the future. And studies of III-V group semiconductors have opened the way to new prospects. For example, the energy gap of the InGaN was reduced to 0.7 eV giving the opportunities to develop alloys covering virtually the entire solar spectrum and thus increasing the efficiency of photovoltaic cells.

With this in mind, we took as a model a photovoltaic cell based on InGaN on GaN substrate, and having defined its main features, we simulated operation using MATLAB.

This allowed us to model a cell with a set of physical parameters on the concentration of indium and Gallium in the alloy and thus obtain an optimum performance and spectral response

## LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

AM	Air mass (masse d'air)
$h$	Constante de Planck
$\lambda$	Longueur d'onde
H	La densité de puissance des photons
E	L'énergie de photon incident
$\Phi$	Flux de photons
$\nu$	Fréquence de la lumière
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$V_n$	Potentiel dans le matériau N
$V_p$	Potentiel dans le matériau P
K	La constante de Boltzmann
T	Température
$n_i$	La concentration de porteurs libres intrinsèques
$p_0$	La concentration de trous à l'équilibre
$N_d$	La concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N
$N_a$	La concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P
$N_c$	Densité d'états au bord de la bande de conduction
$N_v$	Densité d'états au bord de la bande de valence
$V_0$	Le potentiel de diffusion
V	Le potentiel de polarisation imposé aux bornes de la jonction
I	Le courant de saturation
n	Le facteur d'idéalité
F	Flux des photons incidents
$L_n$	Longueur de diffusion des électrons dans le matériau P
$D_n$	Le coefficient de diffusion des électrons
$L_p$	Longueur de diffusion des trous dans le matériau N
$D_p$	Le coefficient de diffusion des trous
$J_0$	Courant de saturation
$\tau_n$	Durée de vie des porteurs minoritaires pour les électrons
$\tau_p$	Durée de vie des porteurs minoritaires pour les trous
$P_i$	Puissance d'éclairement reçue par unité de surface

S	La surface de la cellule PV
b	Le paramètre de courbure
$\mu$	La mobilité des porteurs
$\sigma$	La section efficace de capture
$N_{\text{défaut}}$	La densité de défauts
n	La densité d'électrons libres
$B_{\text{radiatif}}$	Constante qui dépend du matériau
$B_{\text{Auger}}$	Constante qui dépend du matériau
$\theta$	Angle de rayon lumineux par rapport à la normale
$I_r$	L'intensité réfléchie
$I_i$	L'intensité incidente
In	Indium
Ga	Gallium
N	Azote
$x_j$	Profondeur de la jonction
$B_c$	Bande de conduction
$B_v$	Bande de valence
$E_g$	Energie de la bande interdite
$E_c$	Energie de la bande de conduction
$E_v$	Energie de la bande de valence
$\Delta E_c$	Décalage de bande de conduction
$\Delta E_v$	Décalage de bande de valence
$\alpha$	Coefficient d'absorption
n	Indice de réfraction
q	Charge élémentaire
$J_n$	La densité de courant d'électrons
$J_p$	La densité courant de trous
$J_d$	La densité de courant photoélectrique
$J_{\text{tot}}$	La densité de courant totale
$J_{\text{obs}}$	Le courant d'obscurité
$J_{\text{cc}}$	Densité de court-circuit
$V_{\text{co}}$	Tension de circuit ouvert
$V_m$	Tension maximale correspondant à $P_{\text{max}}$
$I_m$	Courant maximale correspondant à $P_{\text{max}}$
$I_{\text{cc}}$	Courant de court-circuit
FF	Facteur de forme

$\eta$	Rendement
$c$	Vitesse de la lumière
$\epsilon_0$	Permittivité du vide
$m_0$	Masse d'un électron
$q_0$	Charge élémentaire
$a$	Paramètre de maille d'un cristal dans le plan $\bar{A}$
$B$	Module élastique
$c$	Paramètre de maille d'un cristal selon l'axe $c$
$C_{11}$	Constante élastique selon l'axe $x$
$C_{12}$	Constante élastique dans le plan $(x,y)$
$C_{13}$	Constante élastique dans le plan $(x,z)$
$C_{33}$	Constante élastique selon l'axe $z$
$e_{33}$ et $e_{31}$	Coefficients piézoélectriques
$\epsilon_1$	Déformation dans le plan
$\epsilon_3$	Déformation selon l'axe $c$
$b$	Paramètre de courbure dans la loi de Vegard
$k$	Vecteur d'onde
$m_e$	Masse d'un électron dans la bande de conduction
$m_e^*$	Masse effective d'un électron dans la bande de conduction
$m_h$	Masse d'un trou dans la bande de valence
$m_h^*$	Masse effective d'un trou dans la bande de valence

# Liste des figures et tableaux

## Liste des figures

### Introduction générale

**Figure I-1** Production totale d'énergie primaire. ....Page 01

### Chapitre 1 : Définitions et état de l'art

**Figure 1-1** : Schéma représentatif du nombre d'Air Masse. .... Page 05

**Figure 1-2** : Densité de puissance spectrale du rayonnement solaire. .... Page 06  
hors atmosphère (AM0) et sous une atmosphère avec une incidence de  $41.8^\circ$  (AM1.5)

**Figure 1-3** : Schéma illustrant les bandes d'énergie dans des matériaux. .... Page 09  
isolants, conducteurs, et semi-conducteurs

**Figure I.4** : Transition inter-bande d'électrons dans un semi-conducteur. ....Page 10

**Figure 1-5** : Schéma de création d'une jonction P-N. .... Page 11

**Figure I.6**: Structure d'une cellule (à gauche) et son diagramme de .....Page 12  
bande (à droite)

**Figure 1.7** : caractéristique courant-tension  $I = f(V)$  en obscurité ..... Page 13  
et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque

**Figure 1-8** : Part de l'énergie utile du spectre solaire lors de sa ..... Page 15  
conversion photovoltaïque

**Figure 1.9** : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. ....Page 17

**Figure 1.10** – Evolution des technologies photovoltaïques. .... Page 19

**Figure 1-11** : Cellule photovoltaïque en silicium **a.** monocristallin. .... Page 20  
et **b.** multi cristallin

**Figure 1-12** : Structure épitaxiale détaillée d'une cellule à triples jonctions. .... Page 22

**Figure 1-13** : Concentrateur solaire **a.** Schéma de fonctionnement ..... Page 22  
et **b.** Illustration

**Figure 1.14**: l'efficacité et le coût pour la première, deuxième .....Page 24  
et troisième génération photovoltaïque

**Figure 1-15** : **a.** Structure du silicium amorphe hydrogéné, .....Page 25  
**b.** Structure d'une cellule PIN

**Figure 1-16** : Structure d'une cellule type CdTe/CdS. .... Page 26

## CHAPITRE 2 : Etude du matériau semi conducteur III-V $Ga_xIn_{(1-x)}N$

- Figure 2.1 :** Structure wurtzite selon plusieurs directions, ..... Page 31  
exemple du GaN : (a) [0001], (b) [1120], (c) [1010]
- Figure 2.2 :** Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, ..... Page 31  
exemple du GaN:(a) [100], (b) [110], (c) [111]
- Figure 2.3 :** Variation du paramètre de maille de  $Ga_{(1-x)}In_xN$  en fonction ..... Page 32  
de la concentration d'indium (x)
- Figure 2.4 :** Diagramme de bande du GaN ..... Page 33
- Figure 2.5 :** Diagramme de bande de l'InN ..... Page 33
- Figure 2.6 :** Couche totalement contrainte a) cas ( $a_{epitax} > a_{sub}$ ) ..... Page 34  
compression, b) cas ( $a_{epitax} < a_{sub}$ ) allongement
- Figure 2.7 :** Propagation de dislocation dans la couche épitaxiée épaisse ..... Page 34
- Figure 2.8 :** Variation de l'épaisseur critique en fonction de la ..... Page 36  
concentration d'indium.
- Figure 2.9 :** Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct ..... Page 36  
a) non contraint b) contraint en compression c) contraint en tension
- Figure 2.10 :** Variation de l'énergie de gap de la structure contrainte du ..... Page 40  
 $Ga_{(1-x)}In_xN / GaN$  en fonction de la concentration indium
- Figure 2.11 :** Schéma de la recombinaison Shockley-Read-Hall avec ..... Page 42  
les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous
- Figure 2.12 :** Schéma de la recombinaison radiative ..... Page 42
- Figure 2.13 :** Schéma de la recombinaison Auger ..... Page 43
- Figure 2.14 :** Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan ..... Page 44

## CHAPITRE 3 : Simulation et résultats

- Figure 3.1 :** Structure InGaN d'une cellule solaire uni-jonction. .... Page 47
- Figure 3.2 :** Variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de ..... Page 48  
l'énergie des photons
- Figure 3.3 :** Variation de l'énergie de gap en fonction de la ..... Page 48  
concentration d'Indium
- Figure 3.4 :** Caractéristiques courant-tension de la structure  $Ga_{(1-x)}In_xN$  ..... Page 49  
pour plusieurs concentrations d'indium
- Figure 3.5 :** Variation du courant court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la ..... Page 50  
concentration d'indium x
- Figure 3.6 :** Variation de la tension circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la ..... Page 51  
concentration de l'indium

<b>Figure 3.7</b> : Puissance délivrée par la cellule pour plusieurs concentrations d'indium	Page 52
<b>Figure 3.8</b> : Variation du facteur de forme FF en fonction de la concentration d'indium	Page 52
<b>Figure 3.9</b> : Représentation du rendement en fonction de la concentration de l'indium	Page 53
<b>Figure 3.10</b> : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration $x = 50\%$ à AMG 1.5	Page 54
<b>Figure 3.11</b> : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration $x = 60\%$ à AMG 1.5	Page 54
<b>Figure 3.12</b> : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration $x = 70\%$ à AMG 1.5	Page 55
<b>Figure 3.13</b> : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration $x = 80\%$ à AMG 1.5	Page 55

## ANNEXE

<b>Figure A.1</b> : Tableau périodique des éléments	Page 60
<b>Figure A.2</b> : Données et constantes physiques	Page 61

## Liste des tableaux

### CHAPITRE 2 : Etude du matériau semi conducteur III-V $Ga_xIn_{(1-x)}N$

<b>Tableau 2.1</b> : Paramètres structuraux $a$ , $c$ et $u$ pour le GaN et l'InN	Page 30
<b>Tableau 2.2</b> : Paramètre de maille $a$ des matériaux binaires GaN et InN.	Page 32

## ANNEXE

<b>Tableau A.1</b> – Paramètres de la structure en wurtzite des éléments binaires GaN et InN	Page 63
<b>Tableau A.2</b> - Paramètres de la structure en zinc blend des éléments binaires GaN et InN	Page 64

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS ET DEDICACES.....	II
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	IV
Liste des figures et tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Définitions et état de l'art.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Le soleil et le rayonnement solaire.....	4
1.2.1 Le soleil.....	4
1.2.2 La densité de puissance spectrale.....	5
1.2.3 Le coefficient d'absorption.....	6
1.3 Les cellules photovoltaïques.....	7
1.3.1 Le développement du photovoltaïque.....	7
1.3.2 La notion de gap.....	8
1.3.3 La jonction P-N.....	10
1.3.4 Principe de fonctionnement :.....	11
1.3.5 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :.....	12
1.3.6 Le rendement théorique.....	14
1.3.7 Facteurs limitant le rendement (pertes physiques et technologiques):.....	15
1.3.7.1 Pertes physiques :.....	15
1.3.7.2 Pertes technologiques :.....	16
1.3.8 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque:.....	17
1.4 Les différentes technologies photovoltaïques.....	18
1.4.1 La technologie du silicium cristallin.....	18
1.4.1.1 Le silicium mono- et multi-cristallin.....	20
1.4.1.2 Les limitations du silicium cristallin.....	20
1.4.2 La technologie des semi-conducteurs III-V.....	21
1.4.2.1 Les cellules multi-jonctions.....	21
1.4.2.2 Les concentrateurs.....	22
1.4.2.3 Les limitations des semi-conducteurs III-V.....	23
1.4.3 Les technologies en films minces.....	23
1.4.3.1 Le silicium amorphe.....	24
1.4.3.2 Le tellure de cadmium, CdTe.....	26
1.5 Conclusion :.....	27
CHAPITRE 2 : ETUDE DU MATERIAU SEMI-CONDUCTEURS III-V $GaxIn1 - xN$ .....	29
2.1 Introduction.....	29
2.2 Description du Nitrure d'Indium Gallium.....	29

2.3	Caractéristiques structurelles.....	30
2.4	Caractéristiques Electrique :.....	32
2.4.1	Notion de couche contrainte et épaisseur critique :.....	34
2.4.1.1	Couche contrainte :.....	34
2.4.1.2	Epaisseur critique $\epsilon_c$ :.....	35
2.4.2	Effet de la contrainte sur les semi-conducteurs III-V:.....	36
2.4.2.1	Effet de la contrainte sur le gap [73] :.....	37
2.4.3	Longueur de diffusion.....	41
2.4.4	Mécanismes de recombinaison.....	41
2.4.4.1	Recombinaisons Shockley-Read-Hall.....	42
2.4.4.2	Recombinaisons radiatives.....	42
2.4.4.3	Recombinaisons Auger.....	43
2.4.5	Propriétés optiques.....	43
2.4.5.1	Indice de réfraction.....	44
2.4.5.2	Absorption.....	45
2.5	Conclusion.....	45
CHAPITRE 3 : SIMULATION ET RESULTATS.....		47
3.1	Introduction.....	47
3.2	Paramètres de la cellule photovoltaïque à base du matériau InGaN.....	47
3.2.1	Le coefficient d'absorption.....	47
3.2.2	L'énergie de la bande interdite (gap).....	48
3.2.3	Caractéristiques courant-tension.....	49
3.2.4	Courant de court-circuit.....	50
3.2.5	Tension de circuit ouvert.....	51
3.2.6	Puissance et puissance maximale délivrée.....	51
3.2.7	Le facteur de forme.....	52
3.2.8	Le rendement.....	53
3.2.9	Calcul de la couverture spectrale.....	53
3.3	Conclusion.....	56
CONCLUSION GENERALE.....		58
ANNEXE 1.....		60
Annexe 1.1	: Tableau de Mendeleïv.....	60
Annexe 1.2	: Données diverses.....	61
ANNEXE 2.....		62
ANNEXE 3.....		62
ANNEXE 4.....		63
Annexe 4.1	: Paramètres de la structure en wurtzite des éléments binaires utilisés.....	63
Annexe 4.2	: Paramètres de la structure en zinc blend des éléments binaires utilisés.....	64
Références bibliographiques.....		65

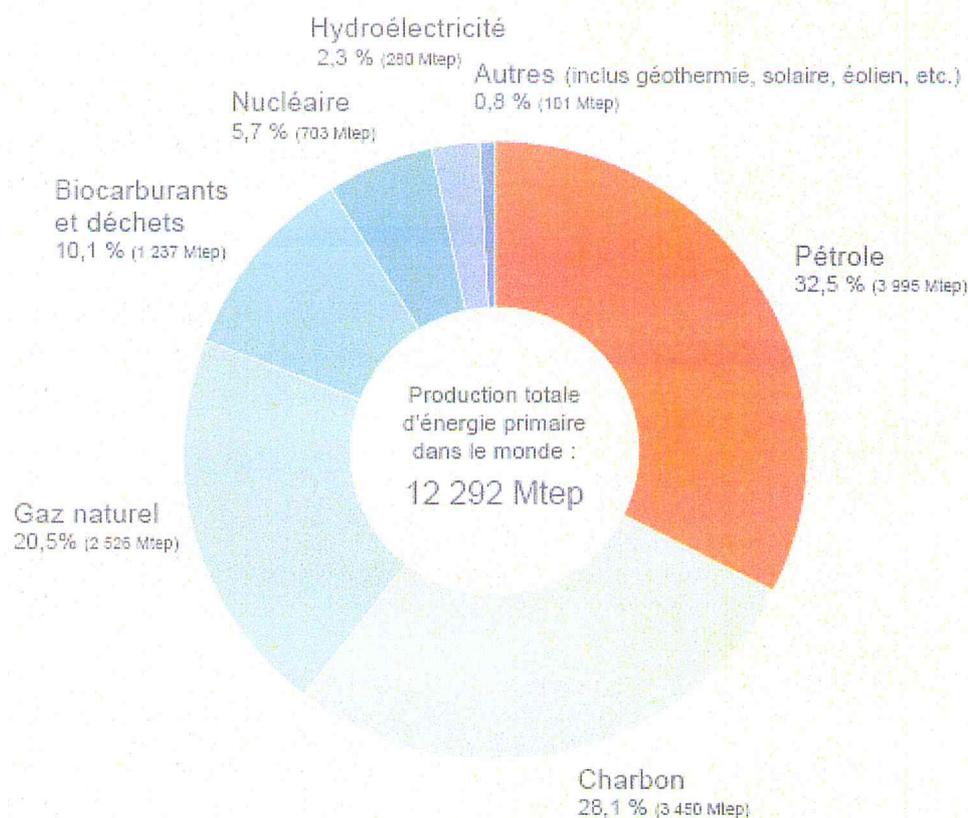
# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

Le défi majeur de ce 21<sup>ème</sup> siècle est celui de l'autosuffisance énergétique de tous les pays du globe y compris ceux possédant les énergies dites fossiles car elles ne sont ni éternelles ni renouvelables.

Les guerres et les conflits qui explosent partout dans la planète en sont le meilleur indicateur. Sans parler des réflexions qui sont développées sur ce que nous allons léguer aux générations futures comme énergie exploitable et milieu environnemental.

En 2010, la production mondiale d'énergie à partir de sources fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) représente 80 % de la production globale [1]. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.



**Figure I-1** Production totale d'énergie primaire [1]

En vertu du Protocole de Kyoto, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8% en dessous de leurs niveaux de 1990 sur la période 2008-2012 [2]. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse doivent jouer un rôle important pour atteindre cet objectif. Dans ce contexte, en septembre 2001, l'Union Européenne a adopté la Directive relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable sur le marché intérieur de l'électricité [3]. L'objectif de cette directive est la promotion et l'exploitation à l'avenir du potentiel des sources d'énergie renouvelable.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Leur exploitation n'engendre pas d'émissions polluantes. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Parmi ces énergies de l'avenir, l'énergie solaire photovoltaïque qui permet de convertir directement le rayonnement du soleil en électricité et qui occupe une grande place dans la recherche, et connaît une croissance de plus en plus importante depuis 1990. Cette recherche est orientée sur deux axes essentiels, augmentation du rendement de la cellule, et la diminution du coût de production) [4].

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût. Cependant, depuis quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales. Les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (sur au moins 20 ans). De nouveaux matériaux ont vu le jour, tel que le Nitrure d'Indium Gallium « InGaN » qui a subi des recherches approfondies depuis 2002 en tant que matériau photovoltaïque. En faisant varier la composition de nitrure d'indium et de nitrure de gallium au sein de l'InGaN, la bande interdite de ce matériau semi-conducteur peut être changée. La gamme de bande interdite de l'InGaN coïncide avec la partie visible du spectre solaire. Ainsi, une cellule solaire à haut rendement peut être développée par l'utilisation de multicouches de l'InGaN [5].

C'est cette dernière que nous allons traiter dans ce mémoire avec la modélisation, la simulation et la caractérisation d'une cellule photovoltaïque à base de nitrure d'Indium Gallium.

L'étude présentée dans ce mémoire va s'articuler sur quatre chapitres

- Le chapitre 1 sera consacré à l'étude bibliographique, et on y présentera les différentes grandeurs et équations donnant les caractéristiques courants-tensions des hétérojonctions qui constituent notre structure ainsi que le principe du photovoltaïque.
- Le chapitre 2 portera sur les semi conducteurs de types III-V
- Le chapitre 3 sera consacré à la simulation et aux résultats
- Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale.

# **CHAPITRE 1**

## **DEFINITIONS ET ETAT DE L'ART**

## **Chapitre 1 : Définitions et état de l'art**

### **1.1 Introduction**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

### **1.2 Le soleil et le rayonnement solaire**

#### **1.2.1 Le soleil**

Le soleil est l'étoile de notre système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune, composée essentiellement d'hydrogène (74% de la masse) et d'hélium (24% de la masse).

L'énergie solaire, produite par les réactions nucléaires qui se déroulent au cœur du soleil, transmise par rayonnement rend la vie possible sur terre par apport d'énergie lumineuse (lumière) et d'énergie thermique (chaleur) [6]

On distingue dans le soleil diverses couches parmi lesquelles le noyau ou cœur, la zone radiative, la zone de convection, la photosphère (qui émet la majeure partie de la lumière solaire), la chromosphère et sa partie extérieure, la couronne. La température régnant dans le noyau est de l'ordre de 15 millions de Kelvins. Elle décroît dans les zones radiatives et convectives. Dans la photosphère, qui constitue la surface visible du soleil, elle est de l'ordre de 5800 K en moyenne.

Le demi grand axe de l'orbite de la terre autour du soleil, couramment appelé « distance terre-soleil », égal à 149 597 870 Km [7], est la définition originale de l'unité astronomique (ua). Il faut 8 minutes et 19 secondes pour que la lumière du soleil parvienne jusqu'à la terre [6].

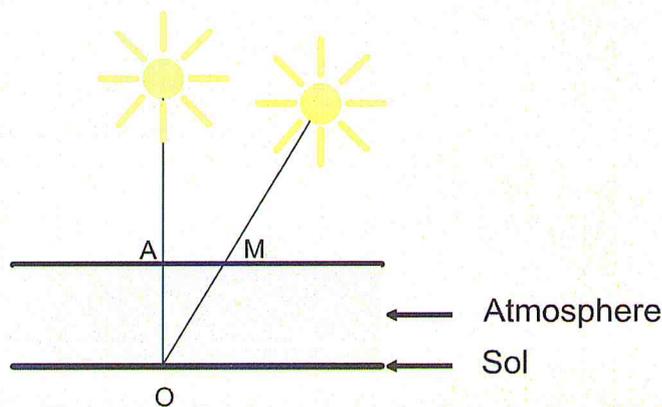
## 1.2.2 La densité de puissance spectrale

Afin de comprendre le fonctionnement d'une cellule solaire, il est nécessaire d'avoir un aperçu de la densité d'énergie disponible avant conversion. En entrant dans l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire est réfléchié dans l'espace (environ 30%) et une autre est partiellement absorbée. Ainsi, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet tandis que la vapeur d'eau absorbe une partie du rayonnement infrarouge. Le rayonnement au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de notre atmosphère [8].

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit la notion de masse atmosphérique ou nombre d'air masse : AMx.

Dans cette expression, "x" représente le nombre d'atmosphères traversées par le rayonnement. Sur la **figure 1-1**, "h" représente l'angle d'incidence des rayons lumineux en fonction de la position du soleil par rapport au sol. Les distances "OA" et "OM" correspondent à l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire respectivement lorsque le soleil est au zénith, et lorsque qu'il est incliné. Le nombre d'atmosphère "x" est défini par la relation suivante :

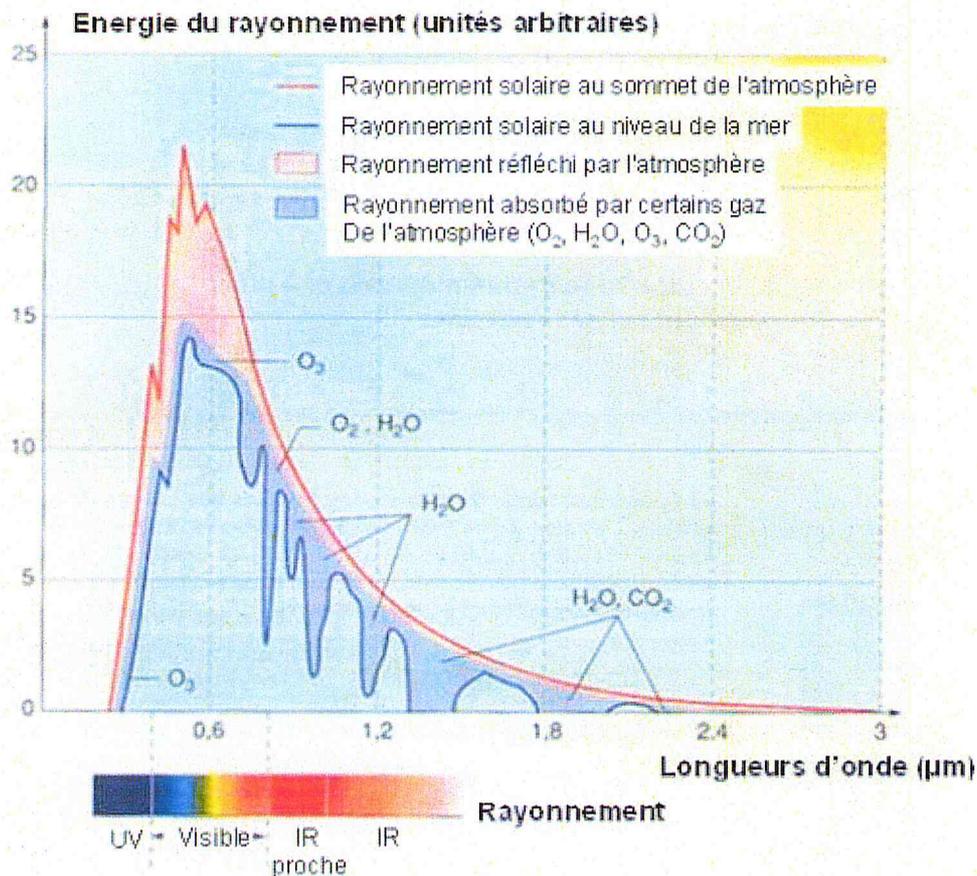
$$x = \frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (1.1)$$



**Figure 1-1** : Schéma représentatif du nombre d'Air Masse [9]

De ce fait, AM0 correspond donc au rayonnement hors atmosphère, et AM1 au rayonnement lorsque le soleil est au zénith. Le spectre AM1.5 correspond au spectre de la lumière solaire après avoir traversé une épaisseur d'air pur correspondant à 1.5 fois l'épaisseur de l'atmosphère. Cette situation se présente en pratique lorsque le ciel est très clair et que le soleil se trouve à un angle  $h = 41.8^\circ$  au dessus de l'horizon.

La **figure 1-2** montre la densité de puissance spectrale du rayonnement solaire. Elle représente la puissance lumineuse incidente par unité de surface et par unité de longueur d'onde, pour les cas où  $x = 0$  (AM0), et  $x = 1.5$  (AM1.5).



**Figure 1-2 :** Densité de puissance spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère (AM0) et sous une atmosphère avec une incidence de  $41.8^\circ$  (AM1.5) [10]

Le spectre AM1.5 est choisi comme référence par la communauté scientifique pour l'évaluation des performances des cellules solaires. Il est caractérisé par une densité de puissance incidente de  $1000 \text{ W/m}^2$  à une température de  $25^\circ\text{C}$ .

### 1.2.3 Le coefficient d'absorption

D'un point de vue énergétique, le rayonnement solaire est constitué de photons de longueurs d'ondes  $\lambda$  (en mètre (m)) transportant une énergie  $E$  (en Joule (J)) selon la relation

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

$h$  : constante de Planck  $6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$   
 $c$  : vitesse de la lumière  $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$   
 $\nu$  : fréquence en Hz

Sachant que  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , on peut alors établir une relation directe entre l'énergie d'un photon (en électron volt (eV)) et sa longueur d'onde  $\lambda$  (en micromètre ( $\mu\text{m}$ )) :

$$E(\text{eV}) = \frac{1.2419}{\lambda} \quad (1.3) \quad \lambda : \text{longueur d'onde } (\mu\text{m})$$

Dans une cellule solaire, l'effet photovoltaïque provient du fait qu'une partie du flux lumineux est restituée sous forme d'énergie électrique. La part de l'énergie lumineuse absorbée par le matériau constituant la cellule suit la loi suivante [11] :

$$E_{abs} = E_{inc} (1 - e^{-\alpha d}) \quad (1.4)$$

$E_{abs}$  : énergie absorbée en J  
 $E_{inc}$  : énergie incidente en J  
 $d$  : épaisseur du matériau en cm  
 $\alpha$  : coefficient d'absorption en  $\text{cm}^{-1}$

Pour une épaisseur donnée, plus le coefficient d'absorption " $\alpha$ " est élevé, plus l'énergie absorbée est grande. Ce coefficient dépend exclusivement de la nature du matériau et de la longueur d'onde de la lumière incidente, " $\alpha$ " est un paramètre très important qui caractérise la capacité d'absorption du spectre lumineux d'un matériau donné. L'épaisseur optimale du matériau absorbant est alors déterminée à partir de ce coefficient.

## 1.3 Les cellules photovoltaïques

### 1.3.1 Le développement du photovoltaïque

Le terme "photovoltaïque" vient du grec "photos" qui signifie *lumière* et de "Volta" nom du physicien Italien qui découvrit la pile électrique en 1800. Son principe a été découvert par un physicien Français, E. Becquerel en 1839 [12] qui est le premier à observer un courant électrique lorsque l'on éclaire des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongées dans une solution acide. Il fallut ensuite attendre 1877 pour que W. Adams et R. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium [13], La première cellule solaire a été réalisée en 1883 par C. Fritts grâce à une jonction solide à base de sélénium et d'or. Son rendement était d'environ 1% [14]. C. Fritts fut le premier à croire à l'immense potentiel de l'énergie solaire. Ce phénomène a été présenté pour la première fois par H. Hertz en 1887 [15].

Mais il ne fut reconnu par la communauté scientifique qu'à partir de 1905, lorsque A. Einstein expliqua physiquement l'effet photoélectrique [16] en utilisant le concept de particule de lumière, appelé aujourd'hui photon, et celle des quanta d'énergie initialement introduit par M. Planck. Il explique alors que ce phénomène est provoqué par l'absorption de photons lors

de l'interaction du matériau avec la lumière, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1921.

La recherche dans le domaine du photovoltaïque progressa très lentement jusqu'en 1941, avec la découverte par R. Ohl de la première jonction P-N dans le silicium [17]. Ensuite, en 1954, les chercheurs D. Chapin, C. Fuller, et G. Pearson de "Bell Téléphone" réalisèrent la première cellule photovoltaïque à base de silicium cristallin de rendement supérieur à 6% [18]. Cette étape marquera véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque. A l'époque, le prix très élevé des cellules solaires limitait leur application au domaine spatial. Des progrès rapides ont ainsi été engendrés et le premier satellite équipé d'un système photovoltaïque "Vanguard I" fut lancé en 1958 [19]. "Hoffmann Electronics" élaborera ces panneaux et présenta en 1960 une cellule solaire avec un rendement record de 14%. L'évolution des rendements de cellules à base de silicium fut ensuite ralentie jusqu'en 1973, où la première crise pétrolière marqua la société et le monde industriel. Pour des raisons d'indépendance énergétique, un intérêt fut porté sur l'énergie photovoltaïque et son développement terrestre. Ce marché en plein essor dominé par le silicium cristallin (80% de la production) voit apparaître les premières centrales photovoltaïques et la production industrielle de panneaux solaires à usage domestique. Le prix des cellules solaires a considérablement diminué et est passé de 100 \$/Watt en 1970 à 20 \$/Watt en 1980 pour atteindre en 2010 environ 2 \$/Watt.

Cet essor a également permis une avancée considérable de la recherche scientifique tant sur les rendements que sur la structure des cellules photovoltaïques. On peut ainsi décliner différentes technologies comme les cellules en couches minces, ou encore les cellules mono- et multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs épitaxiés. Depuis peu, des technologies émergentes comme les cellules organiques ou à pigments photosensibles commencent à se développer. Les spécificités de ces différentes technologies ainsi que leur état de l'art sont présentés dans la prochaine partie [20].

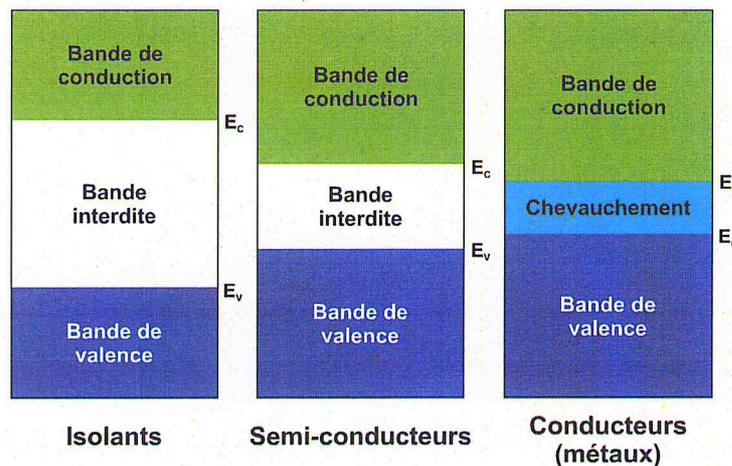
### **1.3.2 La notion de gap**

La théorie des bandes [21], est un modèle qui permet de déterminer l'énergie permise des électrons. D'après ce modèle, si on considère le cas d'un atome isolé, les électrons occupent des niveaux d'énergie discrets  $E_1, E_2, \dots, E_n$ . Dans un cristal, constitué d'un assemblage régulier d'atomes, les électrons occupent toujours des niveaux d'énergie discrets mais en raison de l'interaction entre les atomes (liaisons qui assurent la cohésion de l'édifice), ces niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergies, (correspondant aux niveaux d'énergie possibles pour les électrons), entre lesquelles s'intercalent des bandes interdites, comme le montre la **figure 1.3**.

On distingue trois bandes caractéristiques :

- la bande de valence, dans laquelle les électrons sont liés à plusieurs atomes et assurent la cohésion du cristal,
- la bande de conduction, dans laquelle les électrons sont libres et assurent la conduction du courant électrique,
- et la bande interdite, ou "gap", qui sépare les bandes de conduction et de valence.

L'énergie de la bande interdite est notée  $E_2$ .



**Figure 1-3 :** Schéma illustrant les bandes d'énergie dans des matériaux isolants, conducteurs, et semi-conducteurs [20]

Lorsque la température est proche du zéro absolu, la bande de valence est la dernière bande complètement occupée par des électrons. La bande de conduction est de ce fait la bande suivante permise. En ce qui concerne la largeur du gap, elle caractérise le comportement conducteur, isolant, ou semi-conducteur d'un matériau. Pour un métal (par exemple le cuivre), les bandes de valence et de conduction se chevauchent. A contrario, un isolant présentera une bande de conduction très éloignée de la bande de valence (6 eV dans le cas du diamant).

Dans le cas des matériaux semi-conducteurs, l'énergie de la bande interdite est suffisamment faible (compris entre 0.5 à 2 eV) pour permettre aux électrons de valence de transiter vers la bande de conduction. Si un apport énergétique extérieur (thermique et/ou rayonnement électromagnétique), appliqué au matériau, est supérieur à l'énergie de la bande interdite (gap), un courant de conduction électronique est alors généré.

Les matériaux semi-conducteurs constituent les principaux candidats pour la création d'un courant par conversion de l'énergie solaire. Le plus connu reste le silicium avec un gap de 1.12 eV.

Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence le gap est dit direct, les transitions sont donc directes et radiatives (figure 1.4-a).

Dans le cas contraire c'est un Gap indirect. Comme le silicium, (le maximum de la bande de valence ne coïncide pas avec le minimum de la bande de conduction dans l'espace des k), les transitions inter bandes dans ce cas sont inclinées, donc non radiatives car elles impliquent un changement de vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition radiative s'effectue dans le Gap indirect, il faut qu'un photon soit au préalable absorbé (ou émis) par le matériau, afin que le vecteur d'onde de l'électron corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure 1.4-b) [22].

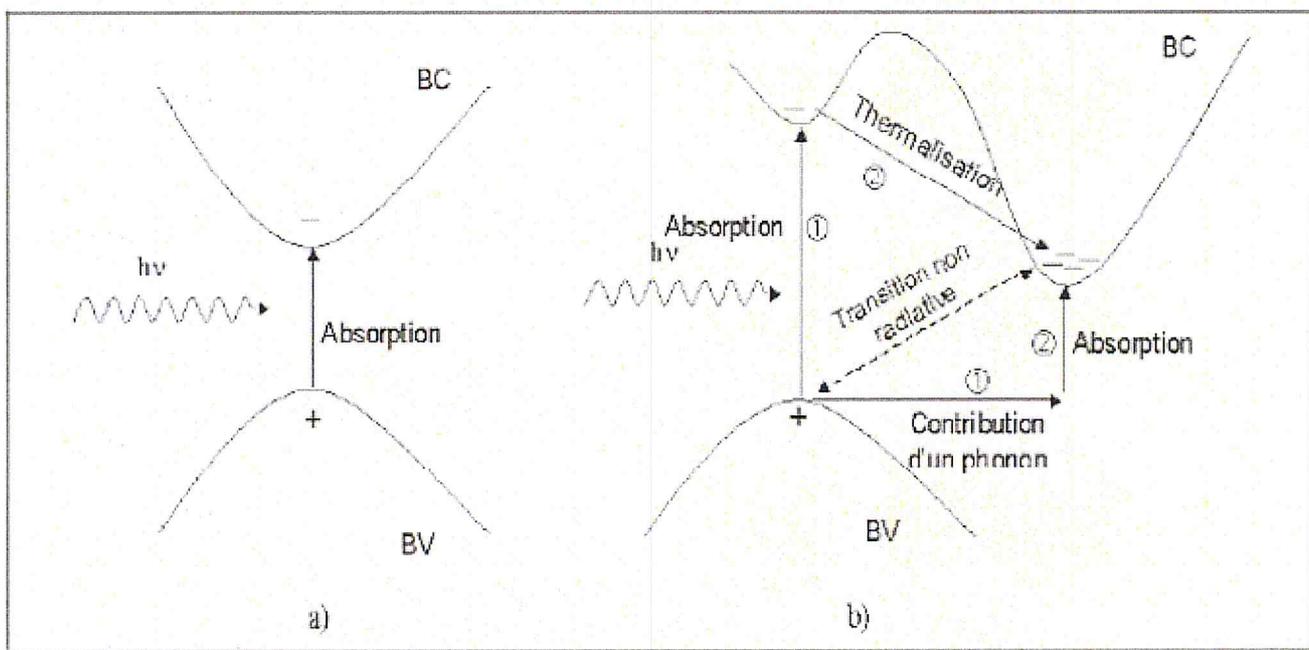


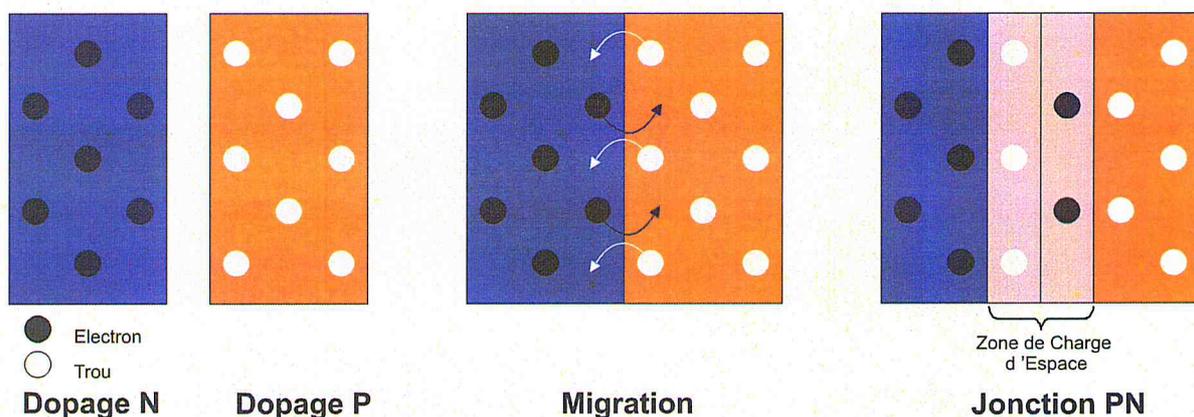
Figure 1.4 : Transition inter-bande d'électrons dans un semi-conducteur.

### 1.3.3 La jonction P-N

Il existe deux sortes de semi-conducteurs, les semi-conducteurs intrinsèques et les semi-conducteurs extrinsèques. Les semi-conducteurs sont dits intrinsèques lorsqu'il s'agit de matériaux purs et que leur comportement électrique ne dépend que de leur structure. Leur conduction est activée seulement par effet thermique. A l'inverse, dans les semi-conducteurs extrinsèques, les propriétés électriques des semi-conducteurs extrinsèques sont activées par dopage, ce qui modifie localement la configuration électronique. Il existe deux types de dopage, le dopage de type N et le dopage de type P. Un semi-conducteur est qualifié de type N lorsque l'on y introduit un léger excès de charges négatives : des électrons, tandis qu'un

semi-conducteur de type P possède un léger excès de charges positives appelées "trous". Par exemple, dans le cas du silicium qui est un atome tétravalent, le dopage N est réalisé par l'addition d'un atome pentavalent (par exemple le phosphore), alors que le dopage P est réalisé par l'addition d'un atome trivalent (par exemple le bore).

La jonction P-N est réalisée au contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N comme le montre la **figure 1-5**. Les électrons et les trous vont alors se recombiner entre eux au niveau de l'interface P-N. Lorsque l'équilibre est atteint, on obtient aux frontières de la jonction une zone chargée négativement du côté P et une zone chargée positivement du côté N. Il y a donc création d'un champ électrique à l'interface de ces deux zones.



**Figure 1-5** : Schéma de création d'une jonction P-N

La grande majorité des cellules solaires génèrent leur courant photoélectrique grâce cette jonction P-N. Si les matériaux réalisant la jonction P-N sont identiques au dopage près, on parle d'homojonction. Lorsque les matériaux de type P et N sont différents, on parle alors d'hétérojonction.

### 1.3.4 Principe de fonctionnement :

Dans une photodiode, le rayonnement augmente le courant inverse par la création de porteurs minoritaires dans les régions neutres et la génération de paires électrons-trous dans la zone de charge d'espace.

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la (figure 1.6). Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions N, P et la zone de charge d'espace.

Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres N et P, les photo-porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique E vers la

région ou ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo courant de diffusion.

Dans la zone de charges d'espaces, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique E, l'électron est propulsé vers la région type N et le trou vers la région de type P. ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité de la lumière.

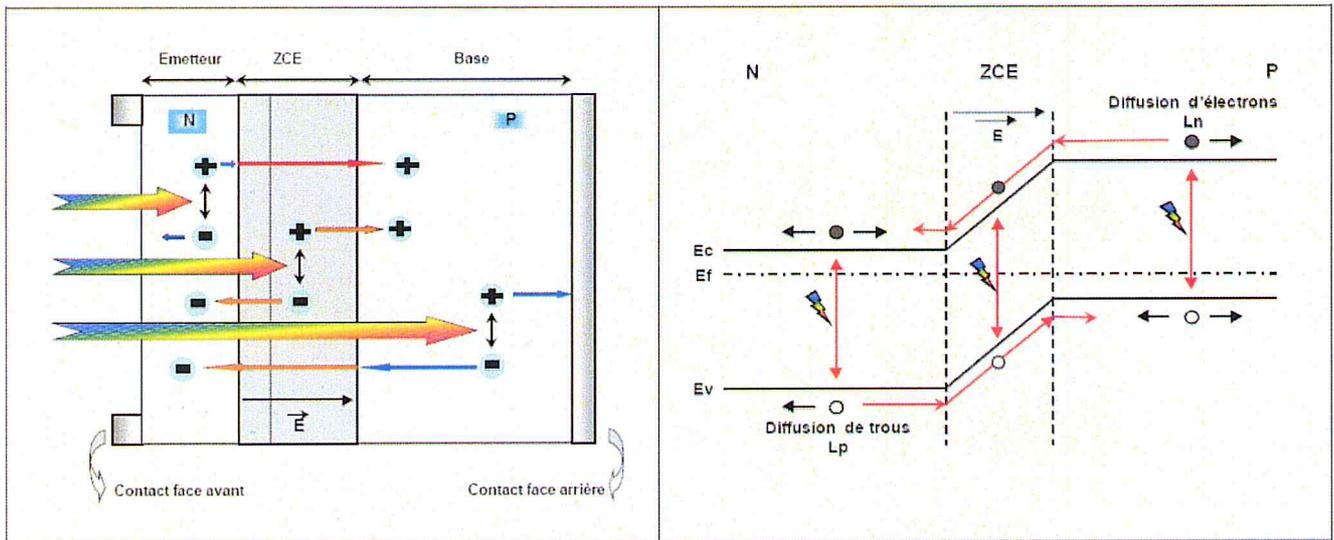


Figure I.6: Structure d'une cellule (à gauche) et son diagramme de bande (à droite) [23].

### 1.3.5 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :

Dans la cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent, le courant d'éclairement (photo-courant  $I_{ph}$ ) et un courant de la diode appelé courant d'obscurité  $I_{obs}$ , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant  $I(V)$  est [24] :

$$I(V) = I_{obs}(V) - I_{ph} \quad (1.5)$$

Avec :

$$I_{obs}(V) = I_s \left( e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad (1.6)$$

$$I_{ph} = q \times \Phi \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha w} \right] \times A \quad (1.7)$$

Ou

$q$  : Charge élémentaire ( $q=1.6 \times 10^{-19}C$ ).

$V$  : Tension aux bornes de la jonction.

$k$  : Constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \times 10^{-23}J.K^{-1}$ ).

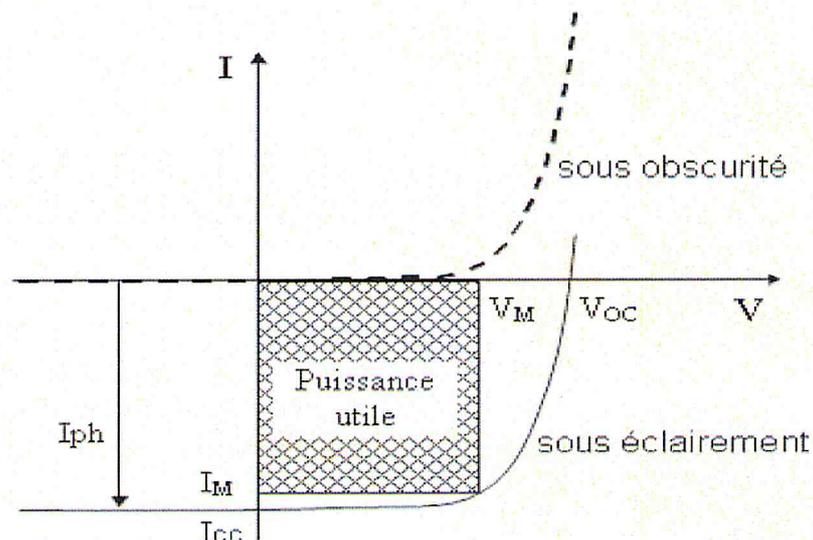
$\Phi$  : Flux incident.

$T$  : Température en (K).

$A$  : Surface le la cellule PV.

$w$  : largeur de la zone de charge d'espace (ZCE)

$I_s$  est le courant de saturation de la diode,  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est réelle). La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique courant-tension a l'allure présentée sur la (figure 1.7).



**Figure 1.7** : caractéristique courant-tension  $I = f(V)$  en obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque [24].

A partir de la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque, on peut déduire les paramètres propres à la cellule et particulièrement :

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V=0$ ).

$V_{oc}$  : Tension en circuit ouvert (obtenu pour  $I=0$ ).

$I_M$  : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

$V_M$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

$\eta$  : Rendement de conversion.

FF : Facteur de forme.

Avec :

$$\eta = \frac{\text{(puissance électrique maximale fournie)}}{\text{(puissance solaire incidente)}}$$

$$\eta = \frac{V_M I_M}{P_i \cdot A} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{CC}}{P_i \cdot A} \quad (1.8)$$

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

$$FF = \frac{\text{(puissance maximale délivrée sur la charge)}}{V_{OC} I_{CC}}$$

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{CC}} \quad (1.9)$$

### 1.3.6 Le rendement théorique

En considérant la jonction P-N décrite dans le paragraphe précédent, il apparaît que l'énergie lumineuse incidente à la structure n'est pas totalement absorbée. Plusieurs mécanismes de perte d'énergie du rayonnement solaire sont à prendre en compte dans le processus de conversion photovoltaïque. Tout d'abord, le gap " $E_g$ " du matériau photo absorbant impose une longueur d'onde de coupure dans le spectre d'absorption (**figure I-8**). Ainsi les photons de longueur d'onde supérieure (d'énergie inférieure à  $E_g$ ) ne seront pas absorbés. On définit ainsi la partie utile du spectre solaire. Ces photons d'énergie inférieure à  $E_g$  traversent le matériau sans être absorbés et donc sans générer de paires électrons-trous. De plus, tous les photons d'énergie supérieure ou égale à  $E_g$  ne sont pas absorbés. Certains d'entre eux sont réfléchis à la surface de la cellule et l'excédent d'énergie apporté par les photons absorbés est en grande partie perdu et cédé au système sous forme de chaleur. Enfin, tout électron excité ne participe pas forcément au courant photoélectrique, des mécanismes de recombinaison des paires électrons-trous sont à prévoir de même que des courants de fuites induits dans la cellule.

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport entre la puissance électrique fournie par le système et la puissance lumineuse du rayonnement incident. Si l'on considère une cellule idéale, c'est-à-dire que tout photon d'énergie supérieure à  $E_g$  est absorbé et que tout électron participe au photo courant (sans recombinaison), et en connaissant le nombre de photons pour chaque longueur d'onde, on peut donc évaluer la puissance électrique maximale issue de la conversion photovoltaïque.

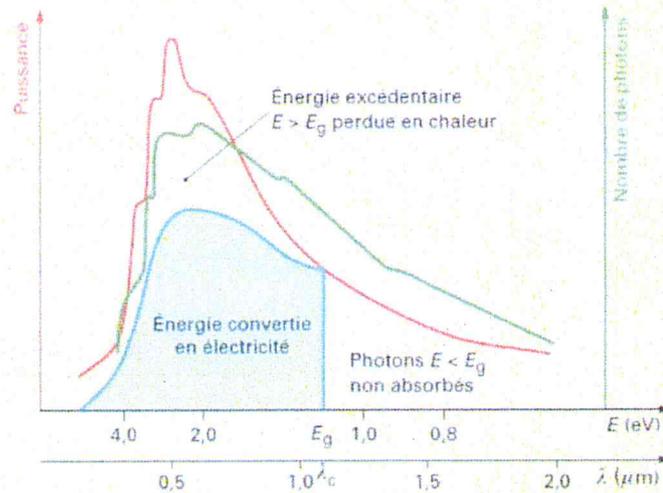


Figure 1-8 : Part de l'énergie utile du spectre solaire lors de sa conversion photovoltaïque [25]

Dès 1956, J. Loferski a évalué le rendement théorique sous les conditions d'un spectre AMO [4]. L'étude la plus connue est celle de W. Shockley et H. Queisser en 1961 qui définit la limite de Shockley-Queisser comme la limite théorique du rendement pour une cellule à simple jonction P-N en fonction du gap [26]. Ces études montrent que les rendements théoriques des systèmes à jonction simple offrent des maxima d'environ 30% pour des gaps allant de 1.1 à 1.6 eV.

### 1.3.7 Facteurs limitant le rendement (pertes physiques et technologiques):

Les différents facteurs de pertes, sont dus soit aux bornes purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix de technologies appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur la limitation intrinsèque du matériau [27].

#### 1.3.7.1 Pertes physiques :

Le photon qui possède une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ( $\lambda_{\text{ph}} > \lambda_g$ ), ne peuvent pas générer des paires électrons-trous et sont donc perdus.

Le photon d'énergie supérieure au gap, ne peuvent générer qu'une seule paire électron-trou, l'excès d'énergie supérieure à la longueur de la bande interdite, est dissipé sous forme de chaleur (thermalisation).

Le facteur de tension ( $\frac{qV_{\text{CO}}}{E_g}$ ) est le rapport de l'énergie maximale développée par la cellule par l'énergie de gap. La tension aux bornes de la cellule n'est qu'une fraction de l'énergie de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction, les meilleures valeurs obtenues de  $V_{\text{OC}}$  sont de l'ordre de 700mV [28].

Le facteur de forme, ne peut dépasser 0.86 [28], car les courbes courant-tension sont générées par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle ( $e^{\frac{qV}{kT}}$ ), donc il n'existe pas de courbes I(V) de forme rectangulaire, même dans le cas d'une cellule idéale (voir la figure 1.15). Ce paramètre dépend également de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction des matériaux utilisés, de la résistivité des contacts métalliques, etc.

Ces facteurs physiques étant considérés comme limitatifs pour une structure donnée de cellules photovoltaïque, les facteurs technologiques sont les seuls acteurs qui peuvent améliorer le rendement de la cellule.

### **1.3.7.2 Pertes technologiques :**

Le rendement de la cellule photovoltaïque dépend à la base du nombre des photons incidents. Cette quantité d'énergie est limitée par le coefficient de réflexion de la surface de la cellule R, qui pondère toutes les équations de photo courant de génération par un facteur (1-R), le coefficient de réflexion peut être optimisé par la mise en œuvre des traitements de surface appropriés et de couche antireflet.

Les contacts métalliques présents sur la face avant de la cellule afin de collecter les porteurs, entraîne des pertes de puissance car ils couvrent des parties de la surface réceptrice de la cellule (effet d'ombre). La largeur de métal, engendre un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur et les pertes de facteur de forme FF provoquées par la résistance série (liée à la largeur de la métallisation).

Il y a des photons, ayant l'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou, mais traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Ce nombre de photons devient important surtout dans les cellules minces d'épaisseur ( $< 100 \mu\text{m}$ ). Ce phénomène réduit le rendement d'absorption, et peut être diminué en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (appelé réflecteur arrière ou miroir arrière « BSR ») [29].

Le rendement de collecte, c'est le rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés, et le nombre des porteurs photo-générés. En effet, certains porteurs se recombinent à la surface ou dans le volume de la cellule photovoltaïque. Ce phénomène est lié directement à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires (le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire). Egalement ; il est possible d'améliorer la collecte par l'utilisation (diffusion) d'un champ arrière  $P^+$  dans le cas de la structure NP (BSF) [30].

Ces phénomènes peuvent être optimisés à l'aide des technologies de fabrication des cellules photovoltaïques.

### 1.3.8 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque:

La Figure 1.9 représente un modèle de la cellule photovoltaïque, prenant en compte les facteurs limitant le rendement, on trouve le générateur de courant  $I_{ph}$ , qui traduit le courant photogénéré ainsi que les résistances complémentaires,  $R_s$  et  $R_p$ , et deux diodes  $D_1$  et  $D_2$ .  $R_L$  est la résistance de charge [31].

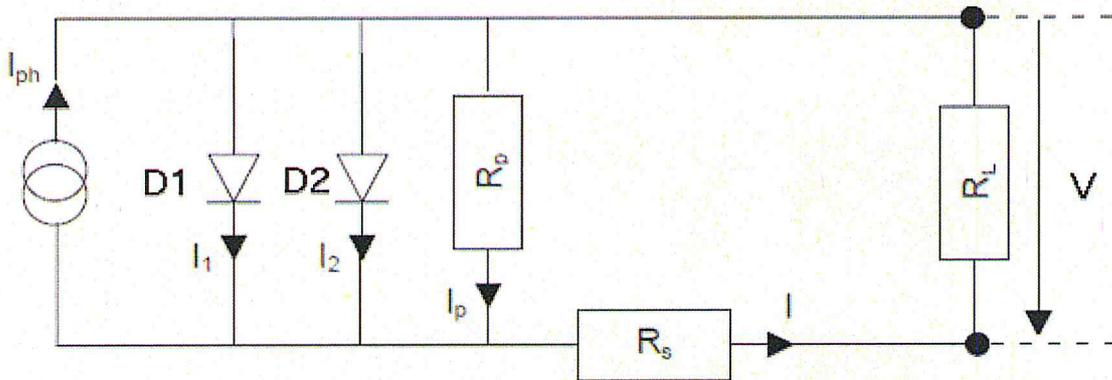


Figure 1.9 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

L'équation de courant s'écrit :

$$I = I_1 + I_2 + I_p - I_{ph}.$$

$$I = I_1 \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right) + I_2 \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (1.10)$$

La résistance série  $R_s$  modélise la résistance des différentes couches de la cellule (émetteur, base et contacts métallique). Pour limiter l'impact de cette résistance sur le courant de la cellule, il faut que sa valeur soit la plus faible possible. Ceci peut être réalisé en optimisant la surface de contact métal/semi-conducteur et en réduisant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (de court-circuit)  $R_p$  traduit, quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

La première diode qui a un facteur d'idéalité  $n_1 \approx 1$  correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur de la cellule.  $I_1$  C'est le courant de saturation de ce phénomène.

$I_2$  est le courant de génération-recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec  $I_2$  le courant de saturation de ce phénomène et  $n_2 \approx 2$  le facteur d'idéalité de la deuxième diode.

## **1.4 Les différentes technologies photovoltaïques**

A ce jour, de nombreuses technologies existent pour la réalisation des cellules photovoltaïques. Leurs propriétés, leurs structures ainsi que leurs performances sont très différentes. Cette partie résume brièvement les spécificités de chacune de ces technologies.

En préambule, la figure 1-10 montre l'étendue de l'évolution de leur rendement au fil des ans. Cet état de l'art réalisé par le NREL s'articule autour de quatre familles technologiques : la filière du silicium cristallin, la technologie III-V, les technologies nouvelles et émergentes et la technologie des films minces. Les rendements de cellules solaires annoncés dans ce chapitre seront des rendements appliqués aux cellules et non aux modules. Un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques constitue un module qui présentera un rendement plus faible qu'une cellule unique à cause de sa taille plus importante.

### **1.4.1 La technologie du silicium cristallin**

Le silicium est un semi-conducteur appartenant au groupe IV(A) du tableau périodique, c'est un atome tétravalent. La jonction P-N est réalisée par le dopage du silicium en introduisant soit un élément du groupe V(A), pentavalent (par exemple : P, As, Bi, Sb) afin de produire des charges négatives (type N) ; soit un élément du groupe III(A), trivalent (par exemple : Al, Ga, B) pour inclure des "trous" ou charges positives (type P). Le silicium cristallin est le matériau le plus employé dans le domaine du photovoltaïque. On comptabilise déjà plus de 70 ans de recherche intensive sur ce matériau. Il a littéralement inondé le marché mondial (plus de 87%) et dépasse de loin les autres technologies en termes de production industrielle et de rapport qualité/prix. Le silicium peut également être utilisé à l'état amorphe.



Best Research-Cell Efficiencies

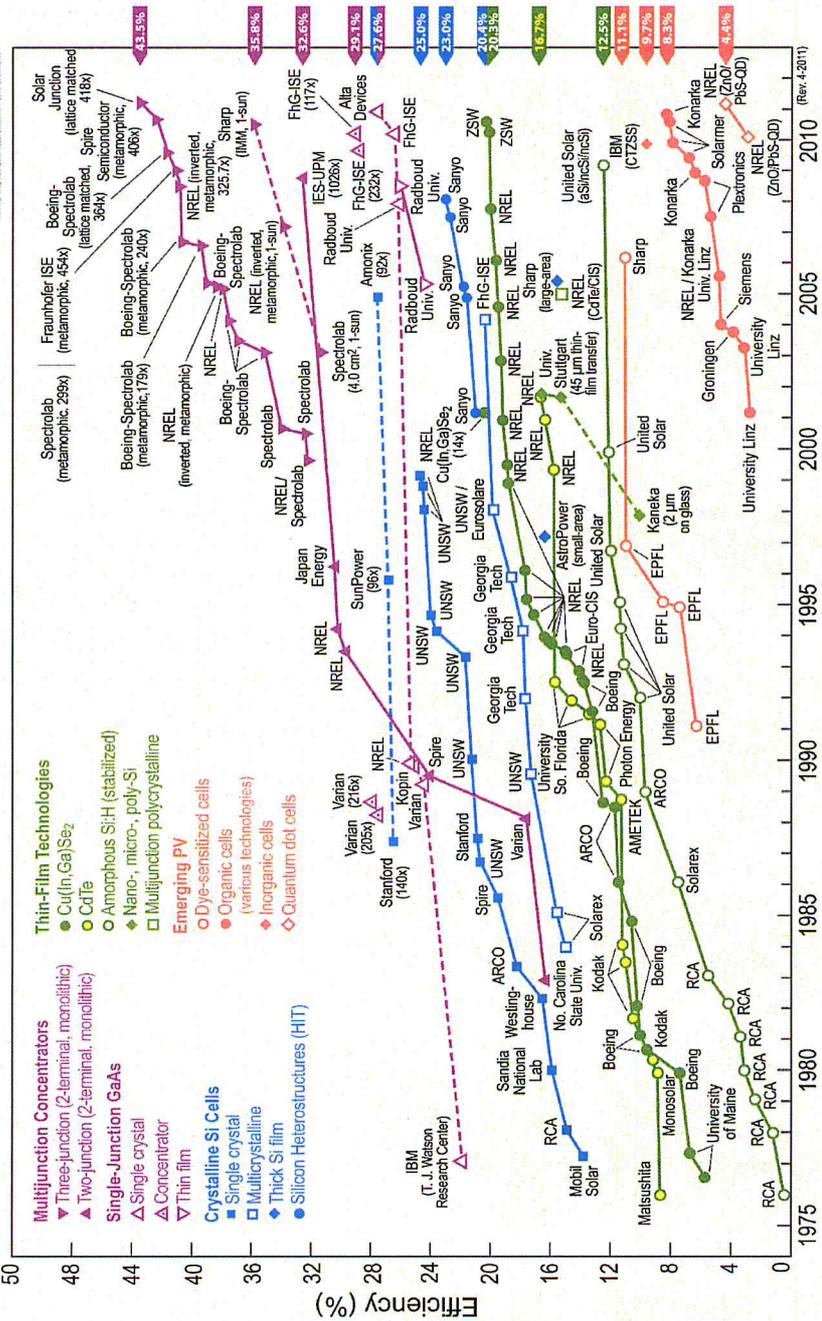
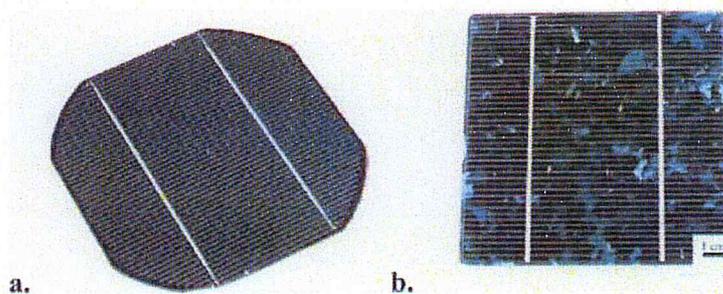


Figure 1.10 – Evolution des technologies photovoltaïques

### 1.4.1.1 Le silicium mono- et multi-cristallin

Il est possible de réaliser des cellules à partir de silicium, soit *monocristallin*, soit *multicristallin*. La production des "wafers" de silicium monocristallin (fines tranches de silicium) se fait par la découpe de lingots de silicium eux même obtenus principalement par la technique de Czochralski [9, 32] qui consiste à étirer des barreaux cylindriques à partir de silicium fondu. Comme le montre la **figure 1-11 a.**, les cellules obtenues sont de couleur gris bleuté et présentent un aspect uniforme. Le silicium multi cristallin quant à lui, résulte de la refonte des déchets provenant du tirage de monocristaux ou du silicium métallurgique purifié. Son procédé économise de la matière car les wafers produits sont directement de formes carrés, plus faciles à agencer, et le rendement en matière est bon. Les cellules réalisées à partir de silicium multi cristallin n'ont pas un aspect uniforme (**figure 1-11 b.**), on observe des motifs créés par l'assemblage des cristaux.

Les cellules à base de silicium monocristallin possèdent les meilleurs rendements 25.0% [33, 34] contre 20,4% pour le silicium poly cristallin [35]. Ce dernier est la technologie la plus répandue avec environ 50% du marché mondial, car elle offre des coûts de fabrication maîtrisés. Cependant, son procédé de fabrication reste très onéreux et énergivore.



**Figure 1-11** : Cellule photovoltaïque en silicium **a.** monocristallin et **b.** multi cristallin

### 1.4.1.2 Les limitations du silicium cristallin

La technologie du silicium cristallin a envahi le marché industriel en s'implantant dans toutes les applications terrestres. Il est peut-être le plus compétitif dans l'installation de modules à grande échelle. Il reste cependant peu qualifié pour les applications électroniques. Les raisons sont multiples, tout d'abord, son procédé de fabrication est peu adapté à la miniaturisation et sa technologie en serait trop onéreuse. De plus, le silicium cristallin est un

matériau présentant un gap indirect de 1.12 eV qui correspond à une transition électronique indirecte assistée par un phonon entre les bandes de valence et de conduction du silicium cristallin. L'émission de phonons, inhérente au gap indirect du silicium cristallin, s'accompagne d'une dissipation thermique. Ce matériau présente de ce fait, un coefficient d'absorption très faible (de l'ordre de  $10^3 \text{ cm}^{-1}$  au lieu de  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  pour la plupart des autres technologies) et nécessite donc des épaisseurs de matériaux importantes pour absorber efficacement le spectre lumineux incident (100 à 200  $\mu\text{m}$ ). A titre de comparaison, les films minces (matériaux à gap direct) présentent des épaisseurs de matériaux photo-absorbants comprises entre 1 et 2  $\mu\text{m}$ . Ainsi, les épaisseurs optimales pour des cellules solaires à base de silicium cristallin ne sont pas compatibles avec le souhait de miniaturiser la cellule solaire et de faciliter son intégration dans le module énergétique d'un capteur communicant.

### **1.4.2 La technologie des semi-conducteurs III-V**

Les semi-conducteurs III-V, constitués par l'association de deux éléments des groupes III(A) et V(A), sont considérés comme des matériaux photovoltaïques à haut rendement. Par exemple les cellules à simple jonction d'arséniure de gallium GaAs possèdent le record mondial de rendement de 28.8% en 2012 [36].

#### **1.4.2.1 Les cellules multi-jonctions**

D'une manière plus générale, les composés III-V offrent une multitude de gaps allant de 0.16 eV pour InSb à 2.24 eV pour GaP permettant ainsi de balayer l'ensemble du spectre solaire. Ils sont souvent utilisés pour former des cellules à jonctions multiples. Le principe de ces cellules multi-jonctions repose sur une meilleure absorption du spectre solaire réalisée par un empilement de plusieurs jonctions P-N de gaps différents. Chacune de ces jonctions est dédiée à une partie du spectre solaire afin de garantir sans recouvrement une division spectrale efficace. La jonction P-N avec le gap le plus élevé est placée en surface pour absorber les photons issus des plus faibles longueurs d'ondes (les plus énergétiques), et les autres jonctions se disposent par gap décroissant afin d'absorber les photons issus des longueurs d'ondes plus élevées. L'efficacité de la cellule est ainsi améliorée avec l'élévation de la limite théorique du rendement (supérieur à 50%). On obtient alors des rendements record à 34.1% [37].

### 1.4.2.2 Les concentrateurs

En combinant une technologie multi-jonctions avec un système optique basé sur la concentration du rayonnement solaire à l'aide de lentilles de Fresnel, les performances des cellules ainsi fabriquées sont grandement améliorées. Ces concentrateurs intensifient le rayonnement solaire, ils sont évalués en fonction d'un facteur multiplicatif indiquant la valeur de l'intensité lumineuse reçue par la cellule solaire. On obtient par cette technique les valeurs de rendement les plus élevées pour les cellules III-V à triples jonctions allant jusqu'à 43.5% pour un équivalent de 418 fois la puissance solaire reçue (418 soleils) [38] (contre 34.1% pour un éclairage de 1 soleil).

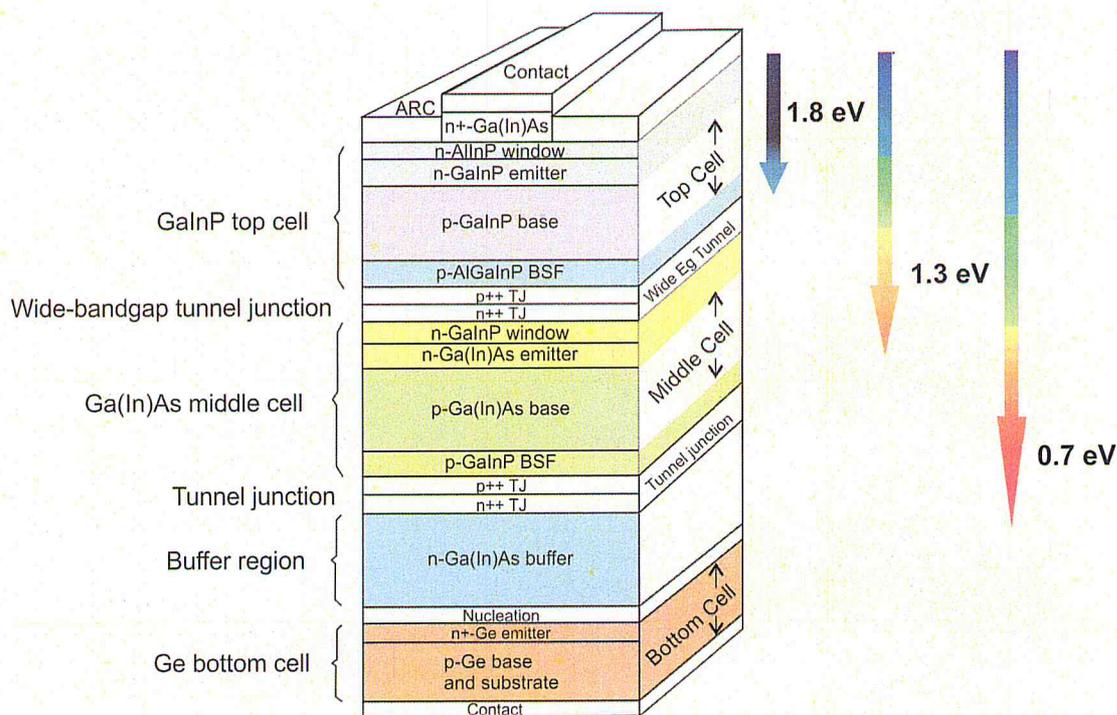


Figure 1-12 : Structure épitaxiale détaillée d'une cellule à triples jonctions

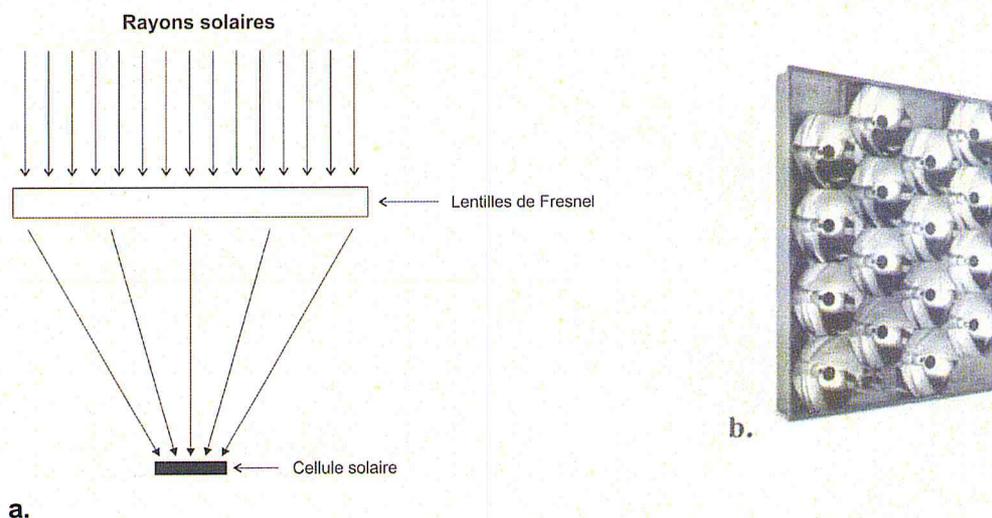


Figure 1-13 : Concentrateur solaire a. Schéma de fonctionnement et b. Illustration

Cette exploitation n'est intéressante que dans les zones de fort rayonnement direct comme la zone méditerranéenne ou encore le domaine spatial. De plus, il est nécessaire d'avoir un mécanisme fiable de suivi du soleil par le dispositif de concentration. Enfin, la forte intensité lumineuse produite implique des contraintes thermiques très élevées.

#### **1.4.2.3 Les limitations des semi-conducteurs III-V**

La technologie des semi-conducteurs III-V se montre très efficace en terme de rendement et semble donc très séduisante dès lors qu'une miniaturisation des dispositifs est envisagée. Cependant, outre la disponibilité des matériaux (indium, gallium...) la composant, la croissance épitaxiale de ce type de cellule multi-jonctions reste un challenge difficile à maîtriser et très onéreux. Dans une cellule photovoltaïque multi-jonctions, il s'avère nécessaire de placer des jonctions tunnels entre chacune des jonctions P-N permettant d'acheminer sans perte les porteurs photo générés dans les zones P-N aux extrémités de la cellule (collecteurs de courant). Une autre difficulté technologique consiste à adapter le courant photo généré dans chacune des jonctions P-N car la jonction la moins efficace imposera son courant aux deux autres (dans le cas d'une cellule triple jonctions). Ces cellules restent donc difficiles à mettre en œuvre voir même impossible à réaliser par des techniques à bas coûts [20].

#### **1.4.3 Les technologies en films minces**

En raison de leur faible épaisseur (1 à 2  $\mu\text{m}$ ), la technologie "film mince" est basée sur l'utilisation de semi-conducteurs inorganiques possédant un gap direct contrairement au silicium cristallin. Ils peuvent donc absorber efficacement le rayonnement solaire incident sur une plus faible épaisseur que les cellules en silicium cristallin et possèdent un coefficient d'absorption plus élevé (environ  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ). Ainsi, ils sont moins sensibles au réchauffement et plus aptes à l'intégration.

La part des cellules solaires en couches minces dans le marché mondial du photovoltaïque dépasse à présent les 10%. Le coût de fabrication de ces cellules bien qu'encore trop élevé, est inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (figure 1.14). Parmi l'ensemble des technologies "films minces" étudiées, trois filières prédominent : le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe) et la filière chalcopirite ( $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ )

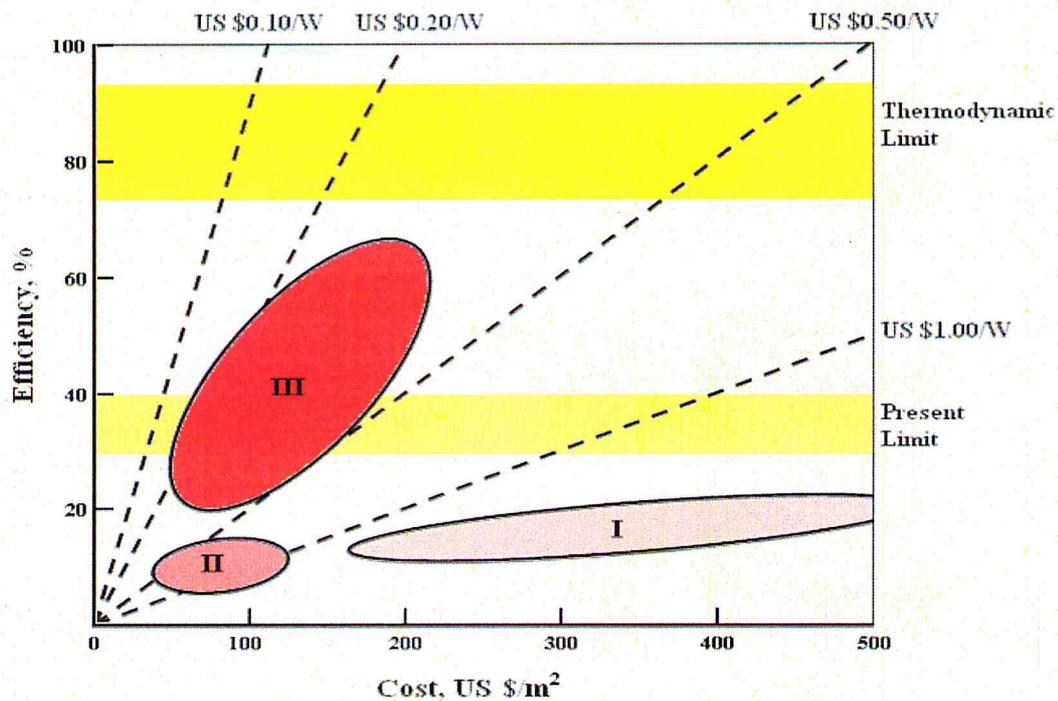


Figure 1.14: l'efficacité et le coût pour la première, deuxième et troisième génération photovoltaïque [39].

#### 1.4.3.1 Le silicium amorphe

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si) apparaît dans les années 1970, lorsque W. E. Spear et P. E. Lecomber s'aperçoivent qu'il est possible de contrôler le dopage P ou N du silicium avec des hydrures [40]. Le silicium amorphe est constitué d'atomes qui ne s'arrangent pas de façon ordonnée. De nombreuses liaisons pendantes créent des défauts électroniques susceptibles d'altérer les propriétés électroniques du matériau (**figure 1-15 a.**). Une passivation de ces liaisons par un traitement sous hydrogène permet de diminuer les défauts résiduels inhérents aux liaisons pendantes, favorisant ainsi son utilisation dans le domaine de l'électronique. On parle alors de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H). Il s'agit d'un matériau présentant un gap de 1.7 eV et un coefficient d'absorption d'environ 100 fois supérieur à celui du silicium cristallin ce qui lui permet d'être déposé en couches minces. Le a-Si:H peut être déposé chimiquement en phase vapeur assistée par un plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapour Déposition : PECVD) et la structure de la cellule est de type PIN (**figure 1-15 b.**). La couche intrinsèque "I" est formée en phase vapeur grâce à l'utilisation du silane pur (SiEL) ou dilué avec un autre gaz (par exemple H<sub>2</sub>). La formation des couches dopées P ou N est assurée par un mélange du silane avec des hydrures de natures différentes. En général du diborane (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) est utilisé pour le dopage de type P et de la phosphine (PH<sub>3</sub>) est utilisée pour le dopage de type N. Le gap du silicium amorphe, initialement de 1.7 eV, peut également être modulé. Des atomes de carbone introduits sous forme de méthane (CH<sub>4</sub>) provoquent un élargissement du gap, tandis que des atomes de germanium introduits sous forme de

germane ( $\text{GeH}_4$ ) provoquent sa diminution. Par cette modulation de gaps, il est possible de réaliser des cellules à jonctions doubles ou triples.

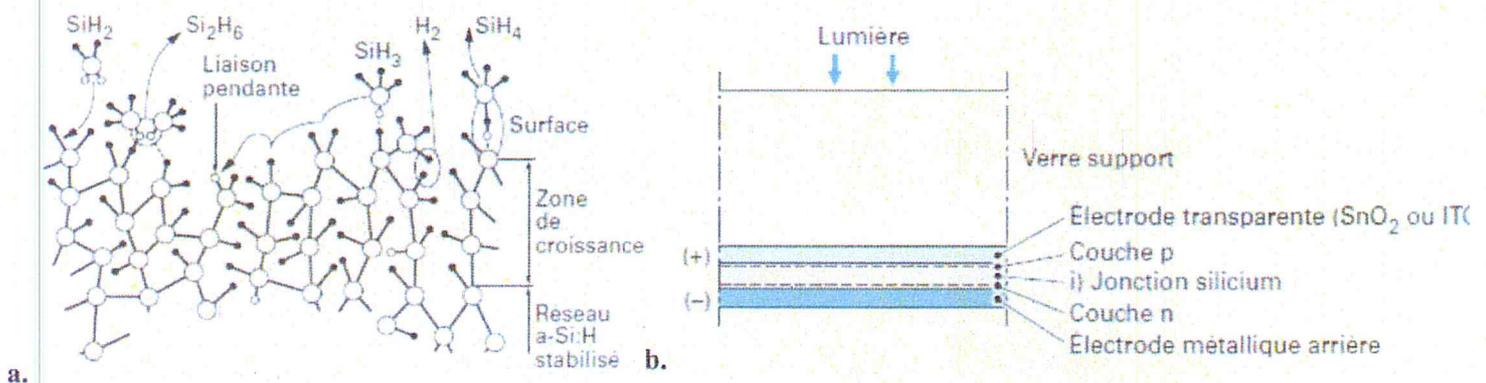


Figure 1-15 : a. Structure du silicium amorphe hydrogéné, b. Structure d'une cellule PIN [41]

Le silicium amorphe, bien qu'il constitue une part importante des cellules solaires en couches minces, souffre de plusieurs limitations. Tout d'abord, les effets de recombinaison à l'interface sont nombreux et limitent le rendement. Mais l'inconvénient majeur de ce matériau réside en sa dégradation rapide sous illumination au cours du temps. Cet effet est observé dès 1977 et porte le nom des chercheurs qui l'ont découvert : l'effet Staebler-Wronski [42]. Cette dégradation est attribuée à la dissociation aléatoire des liaisons Si-Si ou Si-H. Plus important dans les cellules à simple jonction que dans les cellules à jonctions multiples, il peut rapidement faire chuter les performances des cellules jusqu'à 20 à 25% de leur puissance initiale. Il peut également être réversible dans certains cas, c'est pour cette raison que l'on parle de rendement stabilisé pour ce type de cellule. Jusqu'à présent, le rendement stabilisé d'une cellule simple jonction à base de silicium amorphe atteint 10,1% (2009) [43] et 13,4% en 2012 par la société "LG Electronics" (figure 1-10). Il existe également d'autres technologies de films minces à l'étude utilisant le silicium comme principal élément. Par exemple, une technologie basée sur une couche mince de silicium cristallin poreuse d'une épaisseur de 43  $\mu\text{m}$  (appelée "thin film transfer" Si) a atteint un record de 19,1% en 2011 [44]. On peut également citer les cellules photovoltaïques nano-Si, micro-Si, ou encore poly-Si. Celles-ci sont essentiellement utilisées pour former des cellules à jonctions multiples avec le silicium amorphe afin de tenter de diminuer sa dégradation au cours du temps. Elles présentent un rendement culminant à 12,4% en 2011 [45].

### 1.4.3.2 Le tellure de cadmium, CdTe

Le tellure de cadmium (CdTe) est un semi-conducteur de type II-VI. Ces propriétés semi-conductrices ont été étudiées à partir des années 1950 [46-47]. Le CdTe possède un gap de 1.45 eV proche de la valeur idéale. Les premières cellules à base de CdTe sont réalisées dans les années 1960 en déposant du sulfure de cadmium CdS de type N sur un monocristal de CdTe de type P. Leur rendement avoisine les 5% [48]. Quelques années plus

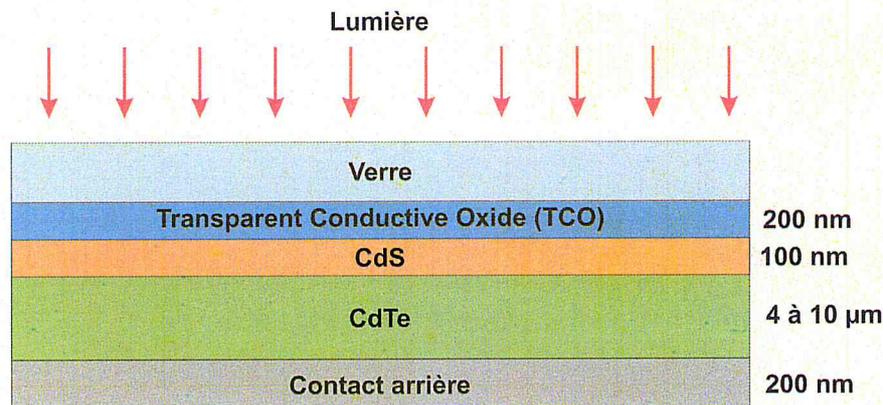


Figure 1-16 : Structure d'une cellule type CdTe/CdS

tard apparaissent les premières cellules en couches minces de CdTe avec un rendement légèrement supérieur à 2% [49]. Leur structure reste proche de celle d'aujourd'hui (figure 1-16). Un substrat de verre sert de support à la fabrication sur lequel est déposé successivement un oxyde transparent conducteur (Transparent Conductive Oxide : TCO), une fine couche de CdS puis de CdTe pour finir par le contact métallique.

Cette hétérojonction CdTe/CdS fut par la suite l'objet de nombreuses études dans les années 1980, conduisant à des cellules à 10% de rendement [50]. Un rendement record de 16.5% était attribué au NREL depuis 2001 [51]. Celui-ci a tout dernièrement été dépassé par une cellule CdTe d'un rendement de 17.3% réalisée par First Solar en 2011 [52]. Ce matériau a longtemps prédominé dans la filière des films minces, souvent qualifié d'alternative au silicium afin de produire des cellules solaires à faible coût de fabrication. Il est même produit industriellement depuis une dizaine d'années. Le CdTe possède l'avantage d'absorber environ 90% des photons transmis sur quelques micromètres. Son système binaire est également plus facile à obtenir que d'autres systèmes ternaires ou quaternaires.

Cependant, depuis l'arrivée des composés de type chalcopyrite qui conduit à l'obtention de rendements plus élevés, cette filière est restée au second plan. De plus, certains problèmes subsistent. Tout d'abord, l'inter diffusion de CdS et CdTe fait chuter les performances de la cellule. Cette inter diffusion est directement liée à un fort taux de

recombinaison à l'interface CdS-CdTe. Un autre problème, difficile à résoudre, est la formation d'un contact ohmique entre le CdTe et le contact métallique arrière. Ce problème vient du fait que le dopage de type P du CdTe reste faible à cause de sa tendance naturelle à l'auto compensation. Afin de minimiser la résistance de contact, on peut utiliser des métaux ayant un potentiel très élevé, mais de tels métaux coûtent chers. Une autre solution consiste à déposer une fine couche de carbone ou d'un semi-conducteur à base de Te comme HgTe ou ZnTe:Cu. Ces problèmes techniques sont les principales limitations de cette filière, mais un problème d'ordre environnemental bien plus grave limite son développement. La toxicité du cadmium a été mise en évidence par la directive européenne RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) publiée en 2003 [53]. Elle interdit le cadmium, le plomb ainsi que d'autres substances toxiques dans les produits électroniques (avec certaines exceptions) à compter de juillet 2006. Certains pays comme les Pays Bas ou le Japon ont déjà totalement interdit son usage. Le risque n'est pas lié à l'utilisation de tels modules du fait de la très faible concentration en cadmium, mais à la manipulation en usine lors de l'élaboration des cellules ainsi que lors du futur recyclage de ces produits.

### 1.5 Conclusion :

Ce chapitre, nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, et de déduire la caractéristique courant tension et de présenter la nature des principaux facteurs limitant le rendement de conversion avec une modélisation de cette dernière par un circuit électrique.

Cependant, le facteur majeur qui limite le rendement des cellules solaires se situe au niveau de la couche métallique :

- Pertes résistives importantes au sein de la cellule.
- Tous les métaux qui sont très conducteurs ne sont pas transparents dans le visible.
- Les matériaux qui possèdent une grande transparence dans le visible ne sont pas bons conducteurs.

**CHAPITRE 2**  
**ETUDE DU MATERIAU**  
**SEMI-CONDUCTEUR III-V  $Ga_xIn_{(1-x)}N$**

## CHAPITRE 2 : ETUDE DU MATERIAU SEMI-CONDUCTEUR III-V $Ga_xIn_{(1-x)}N$

### 2.1 Introduction

Aujourd'hui, la production d'électricité photovoltaïque est largement dominée par le silicium avec 95 % des panneaux photovoltaïques installés (monocristallin, poly cristallin et couche mince) [54]. Cependant, ces panneaux commerciaux souffrent d'un faible rendement moyen, environ 13 % (entre 12 et 18 % pour le monocristallin, entre 12 et 15 % pour le poly cristallin et entre 6 et 9 % pour les couches minces [55]). C'est pourquoi de nombreuses recherches se tournent sur l'augmentation de l'efficacité des panneaux en silicium (nanostructures, couches minces, etc.) et sur des matériaux alternatifs possédant un meilleur rendement (CdTe, CIGS, GaAs, etc.). Généralement, ces nouveaux matériaux sont déposés en couches minces (quelques centaines de nanomètres), mais présentent toujours des rendements intéressants, réduisant ainsi les coûts de production.

Parmi ces nouveaux matériaux les semi-conducteurs III-V qui sont des matériaux composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev [56] (ANNEXE). Parmi tous les éléments possibles, les éléments les plus légers (comme le bore, l'aluminium ou l'azote) donnent des composés à large bande interdite. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à caractère métallique. On considèrera dans cette thèse essentiellement des composés à base de gallium et d'indium qui seront utilisés pour notre structure. L'intérêt de ces composés est encore renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par la combinaison d'éléments appartenant à ces colonnes III et V. On obtient ainsi des alliages ternaires de type  $Ga_xIn_{(1-x)}N$  et même quaternaires du type  $In_xGa_{(1-x)}As_yP_{(1-y)}$ .

### 2.2 Description du Nitrure d'Indium Gallium

L'alliage InGaN fut étudié dans un premier temps pour des applications de diodes électroluminescentes (LED) et de capteurs UV [57]. Depuis le début des années 2000, il est étudié pour le photovoltaïque [58] [59] [60] [61] grâce à son large et modulable gap d'énergie interdite (énergie à partir de laquelle le matériau répond le plus efficacement à la lumière incidente). En effet, l'InN absorbant dans l'infrarouge avec un gap de 0,7 eV (1771 nm) [62] et le GaN absorbant dans l'ultra-violet avec un gap de 3,39 eV (366 nm) [62], l'InGaN peut couvrir une grande partie du spectre solaire. On peut donc, par exemple, facilement concevoir des cellules solaires multi-jonctions à base d'InGaN simplement en changeant la

concentration d'indium dans le GaN. De telles structures simplifieraient ainsi les procédés de fabrication des cellules et en diminueraient ainsi les coûts, tout en produisant de hauts rendements de conversion photovoltaïque. D'après les calculs théoriques, une cellule triple-jonctions pourrait atteindre les 70 % de rendement [63] ce qui la rendrait économiquement avantageuse pour des applications terrestres.

Dans ce chapitre, on va étudier l'impact de la concentration d'indium sur les caractéristiques physique de l'alliage  $Ga_{(1-x)}In_xN$  contraint sur un substrat de GaN afin d'obtenir la concentration optimale qui donne les meilleures propriétés à la structure  $Ga_{(1-x)}In_xN/ GaN$ .

### 2.3 Caractéristiques structurelles

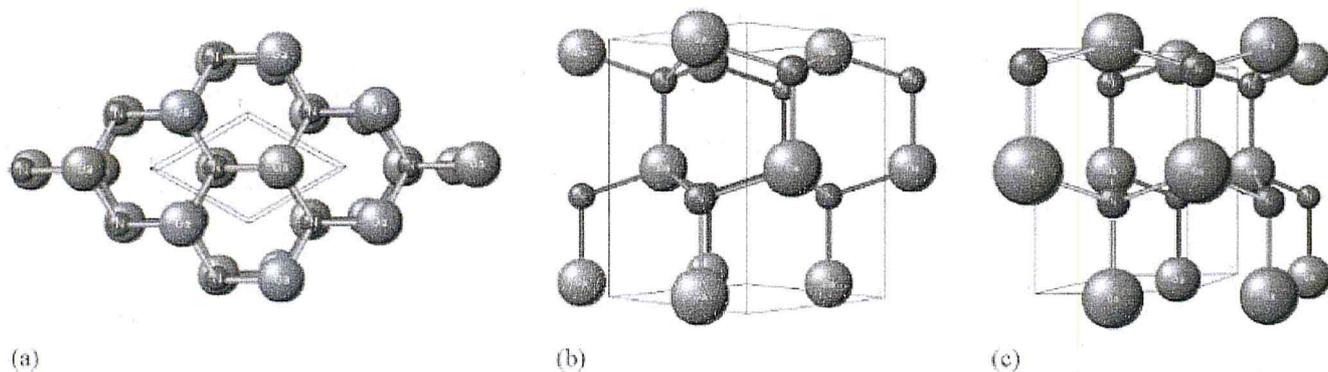
Dans les conditions ambiantes, la structure des nitrures-III est la wurtzite, une structure hexagonale. Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un côté hexagonale  $a$ , la hauteur de la maille élémentaire  $c$ , et le paramètre interne  $u$  décrivant la séparation des sous-réseaux des anions (N-3) et des cations (Ga+3) selon l'axe  $c$  [64]. Ce dernier est défini comme étant la longueur de la liaison cation-anion divisée par  $c$ . Il est égal à 0,375 pour un cristal wurtzite idéal. Le tableau 2.1 présente ces paramètres pour le GaN et l'InN.

	$a(A^\circ)$	$C(A^\circ)$	$u$
GaN	3.189	5.185	0.377
InN	3.54	5.70	0.378

**Tableau 2.1** : Paramètres structuraux  $a$ ,  $c$  et  $u$  pour le GaN et l'InN [65].

A noter que ces valeurs sont celles des matériaux massifs et qu'elles peuvent différer pour des couches épitaxiées à cause, notamment, de contraintes, de défauts et d'impuretés.

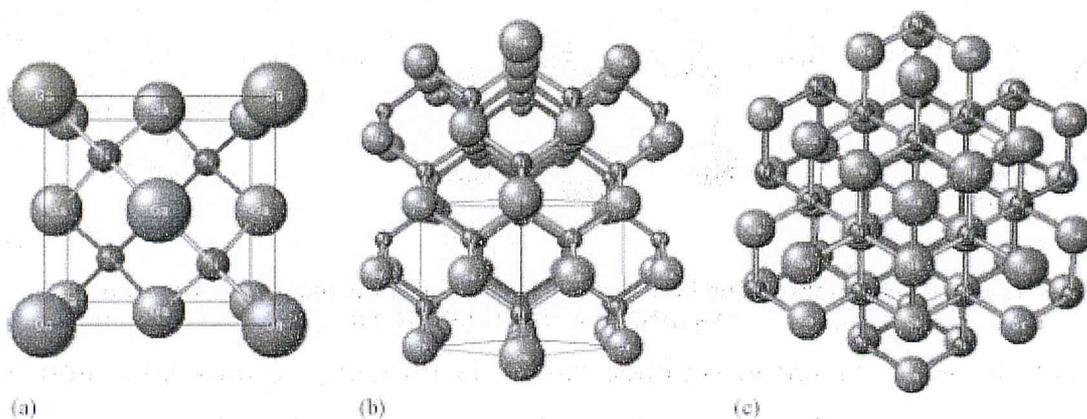
La figure 2.1 illustre la structure wurtzite en prenant l'exemple du GaN selon les directions [0001], [1120], [1010], où les grosses sphères représentent les atomes de gallium et les plus petites les atomes d'azote.



**Figure 2.1 :** Structure wurtzite selon plusieurs directions, exemple du GaN : (a) [0001], (b) [1120], (c) [1010] [66].

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

La structure zinc-blende, en prenant l'exemple du GaN, est présentée dans la figure 2.2 selon différentes directions.



**Figure 2.2 :** Structure cubique zinc-blende selon différentes directions, exemple du GaN:(a) [100], (b) [110], (c) [111] [66].

Par rapport à la structure hexagonale, celle-ci présente théoriquement de meilleures propriétés électriques comme une plus grande mobilité, des propriétés isotropiques (dues à sa symétrie cubique) et un fort gain optique. Cependant, ces avantages n'ont pas été observés expérimentalement à cause des difficultés à produire un matériau unphasique, avec une faible densité de défaut [66].

Le paramètre de maille d'une telle structure dépend de la nature des éléments chimiques mis en jeu. Une maille cristalline est d'autant plus grande que le numéro atomique des éléments les constituants est grand. Ainsi dans le cas d'une structure ternaire  $Ga_{(1-x)}In_xN$ , l'incorporation d'indium dans la maille cristalline de GaN augmente le paramètre de maille  $a$  de l'alliage. Pour  $Ga_{(1-x)}In_xN$ , on considère cette variation comme quasi-linéaire et donnée par la loi de Vegard (figure 2.3) [67] :

$$a_{Ga_{(1-x)}In_xN} = xa_{InN} + (1 - x)a_{GaN} \quad (2.1)$$

Le tableau 2.2 [68] donne le paramètre de maille des alliages binaires semi-conducteurs III-V utilisés dans ce travail.

	GaN	InN
a (nm)	0.45	0.49

Tableau 2.2: Paramètre de maille a des matériaux binaires GaN et InN.

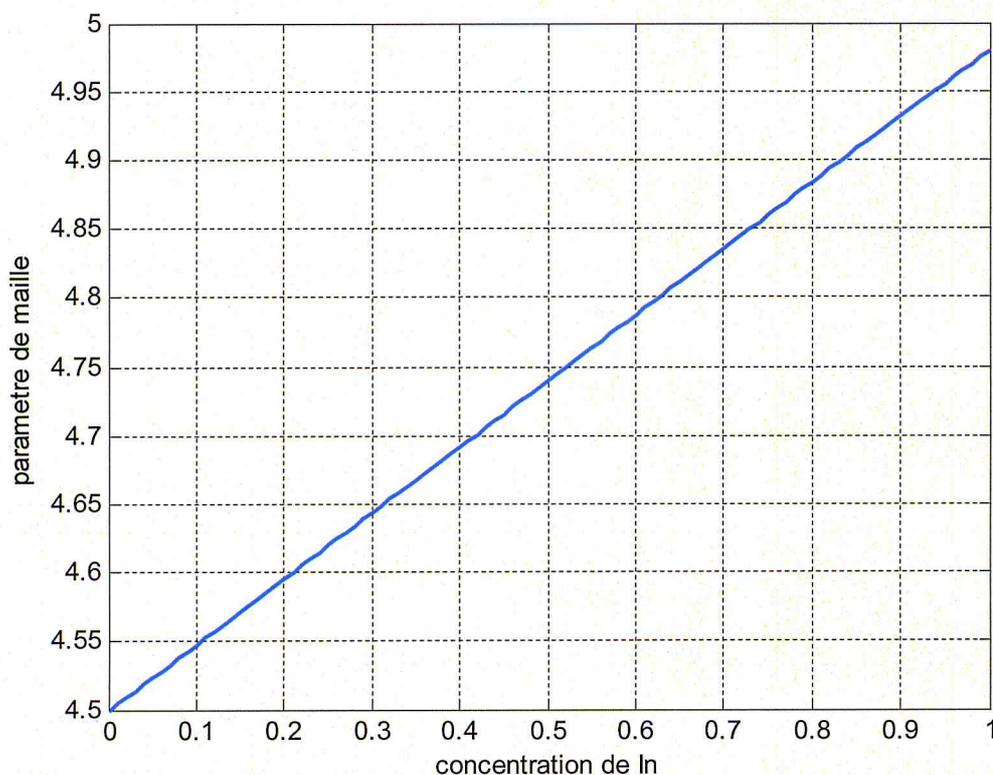


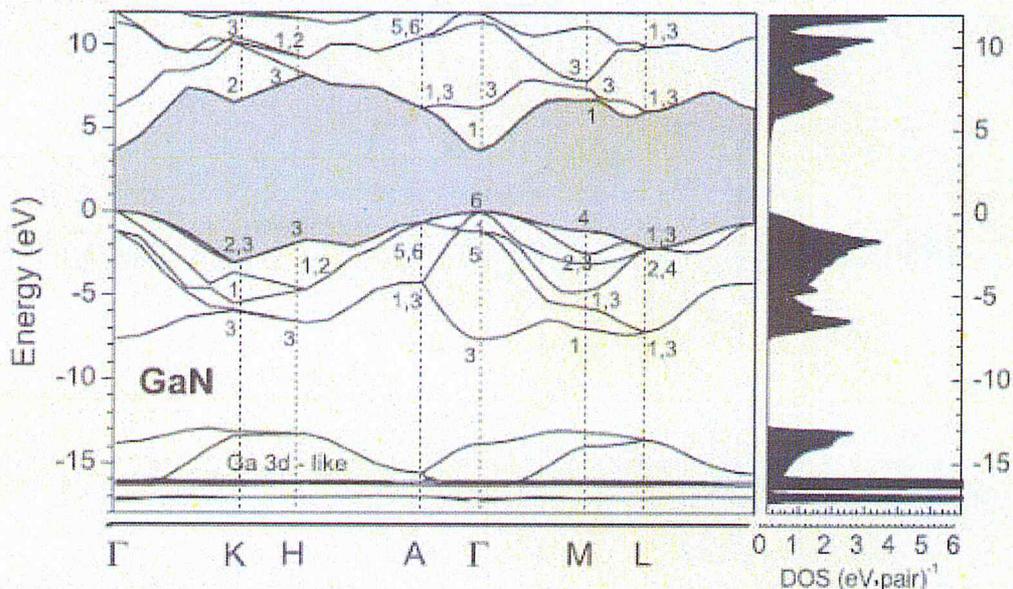
Figure 2.3 : Variation du paramètre de maille de  $Ga_{(1-x)}In_xN$  en fonction de la concentration d'indium (x).

## 2.4 Caractéristiques Electrique :

Ces semi-conducteurs ont des liaisons en partie covalentes avec la mise en commun d'électrons entre l'atome « élément III » et l'atome « élément V ». La périodicité dans le cristal conduit à une distribution des états énergétiques sous la forme de bandes définies par la résolution de l'équation de Schrödinger. L'allure des bandes est généralement la même pour tous les composés III-V considérés. Leur structure de bandes est directe. C'est-à-dire que le

minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde  $k$  dans la structure de bandes.

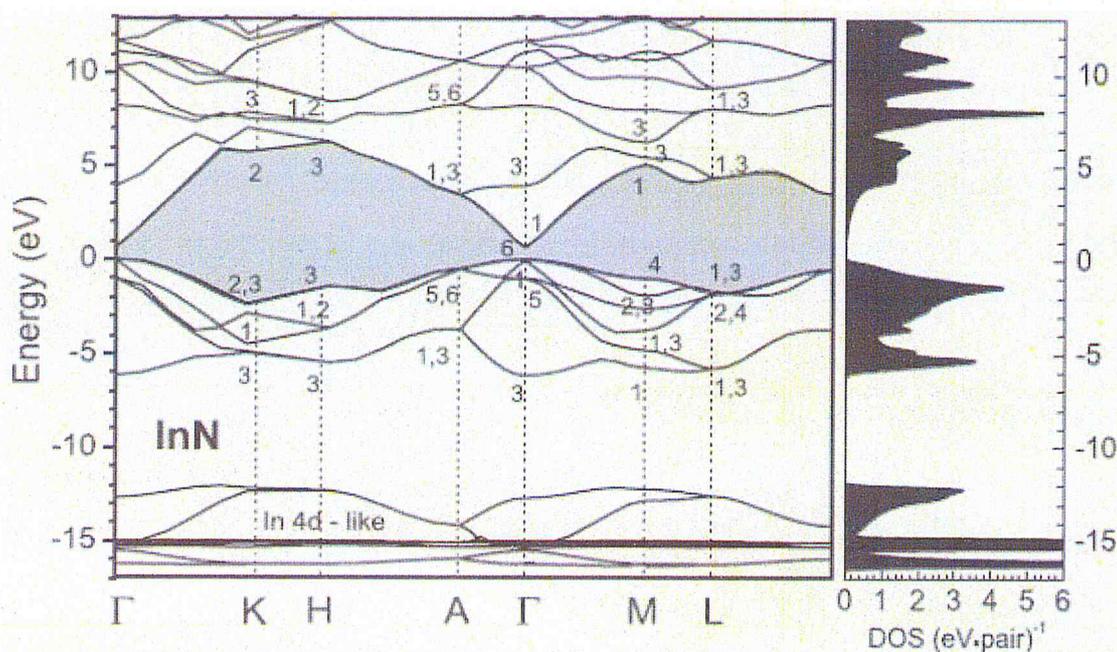
Le gap d'énergie interdite est de 3,39 eV (366 nm) pour le GaN et de 0,7 eV (1771 nm) pour l'InN à température ambiante (300 K) [69]. Le diagramme de bande du GaN est montré dans la Figure 2.4.



**Figure 2.4 :** Diagramme de bande du GaN [70].

Le GaN est un matériau à gap direct, le minimum de sa bande de conduction est donc aligné au maximum de sa bande de valence dans l'espace des vecteurs d'onde.

La Figure 2.5 présente le diagramme de bande de l'InN calculé avec la méthode empirique de pseudopotentiels. Comme pour le GaN, la bande de valence de l'InN est divisée en trois branches à cause des interactions spin-orbite et de la symétrie du cristal.



**Figure 2.5 :** Diagramme de bande de l'InN [70].

## 2.4.1 Notion de couche contrainte et épaisseur critique :

### 2.4.1.1 Couche contrainte :

Lors de l'épitaxie d'un matériau sur un substrat de paramètre de maille différent, un désaccord paramétrique est généré. Ce désaccord peut être rattrapé de deux façons différentes [71] :

- Dans le cas où les couches épitaxiées sont suffisamment fines, la maille du matériau épitaxié (ANNEXE) se déforme de manière élastique de telle sorte que le paramètre de maille s'accorde au paramètre du substrat dans la direction parallèle à l'interface. Dans la direction perpendiculaire à l'interface de croissance le réseau se déforme en s'allongeant ou se comprimant selon que le paramètre de maille de la couche est plus petit ou plus grand que celui du substrat. Dans ce cas la couche est considérée comme étant totalement contrainte (figure 2.6).

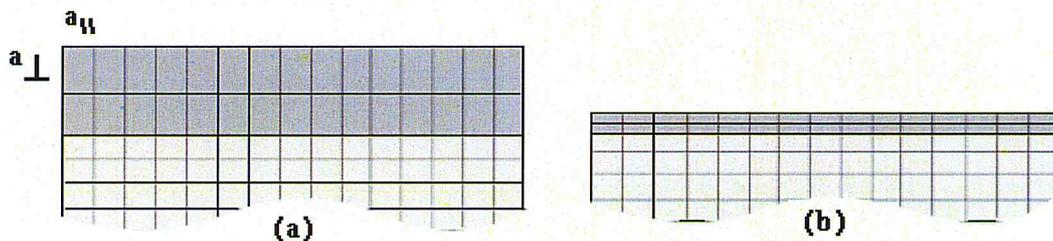


Figure 2.6 : Couche totalement contrainte

a) cas ( $a_{epitax} > a_{sub}$ ) compression, b) cas ( $a_{epitax} < a_{sub}$ ) allongement.

- Dans le cas d'une couche épitaxiées plus épaisse, la déformation de la maille du matériau ne suffit plus à équilibrer l'énergie mécanique engendrée par la croissance. Le désaccord est alors rattrapé par la génération de dislocations à l'interface de croissance. Ces dislocations se propagent du substrat vers l'interface de croissance et la couche commence à relaxer.

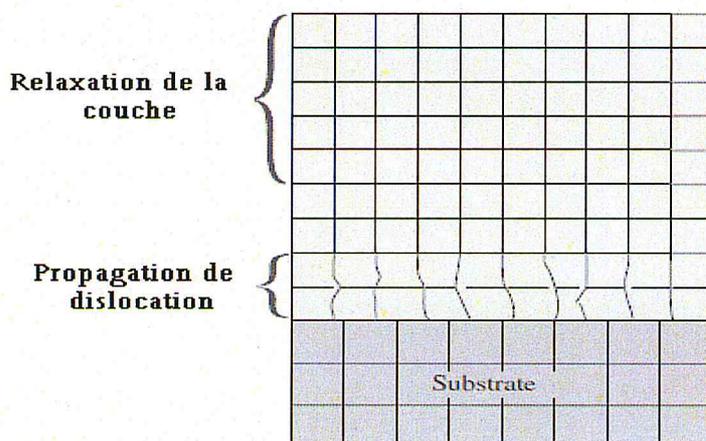


Figure 2.7 : Propagation de dislocation dans la couche épitaxiée épaisse.

### 2.4.1.2 Epaisseur critique $\varepsilon_c$ :

L'épaisseur au delà de laquelle la couche épitaxiée commence à relaxer est appelé épaisseur critique. Cette épaisseur critique dépend des propriétés mécaniques des matériaux (coefficients élastiques  $C_{ij}$ ), ainsi que du degré de désaccord paramétrique  $\Delta_a$  (équation 2.2) entre le substrat et la couche épitaxiée. Si l'épaisseur de la couche épitaxiée dépasse la valeur de l'épaisseur critique, les mailles ne subissent plus les contraintes mécaniques imposées par le substrat et le paramètre de maille atteint celui du matériau massif.

$$\Delta_a = \frac{a_{epit} - a_{sub}}{a_{epit}} \quad (2.2)$$

Pour calculer l'épaisseur critique de notre système  $Ga_{(1-x)}In_xN/GaN$ , on a utilisé le modèle le plus classique, celui de K. Koksall et B. Gonul [72], Qui traite le cas d'un matériau faiblement désaccordé par rapport au substrat (désaccord de maille <2%). Il définit l'épaisseur critique comme l'épaisseur à partir de laquelle une dislocation initialement présente à l'interface de contact se propage latéralement sous l'effet du champ de contrainte. La valeur de l'épaisseur critique  $h_c$  qui en résulte dans le cas d'un matériau de structure sphalérite (blende de zinc) épitaxié sur la surface (001) est donnée par l'équation suivante [72] :

$$h_c = \frac{a_{epit}}{k \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta_a} \times \frac{1 - (0.25 \cdot \gamma)}{(1 + \gamma)} \times \ln \left( \frac{h_c \cdot \sqrt{2}}{a_{epit}} + 1 \right) \quad (2.3)$$

$a_{epit}$  : Paramètre de maille de la couche relaxée.

$\Delta_a$  : Désaccord paramétrique.

$\gamma$  : Coefficient de Poisson donné par :

$$\gamma = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \quad (2.4)$$

$C_{ij}$  : Les coefficients élastiques ( $cm^{-2}$ ).

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

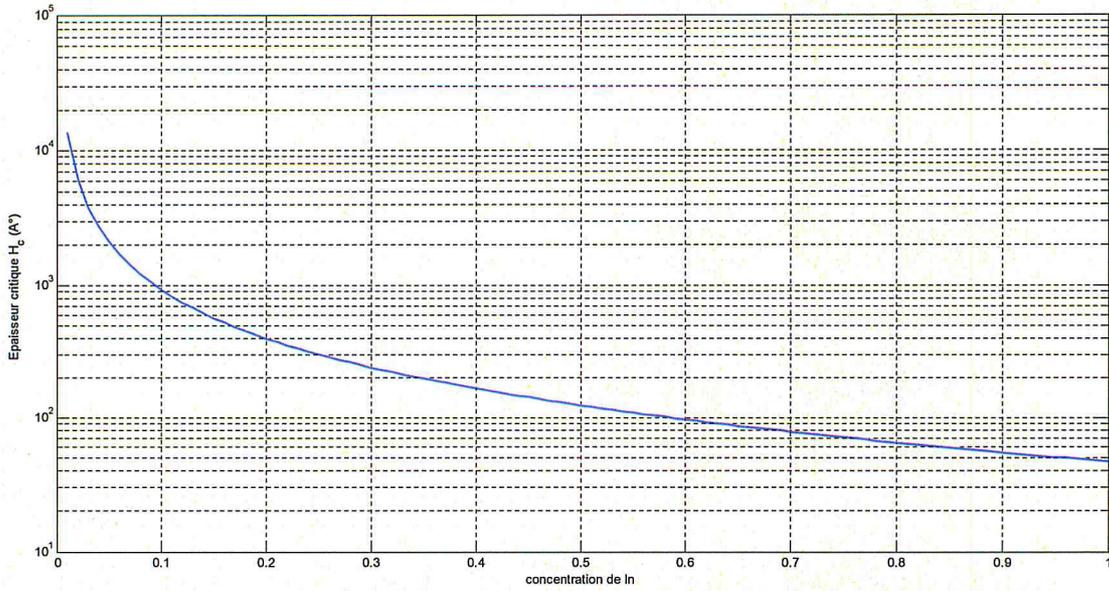


Figure 2.8 : Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium.

### 2.4.2 Effet de la contrainte sur les semi-conducteurs III-V:

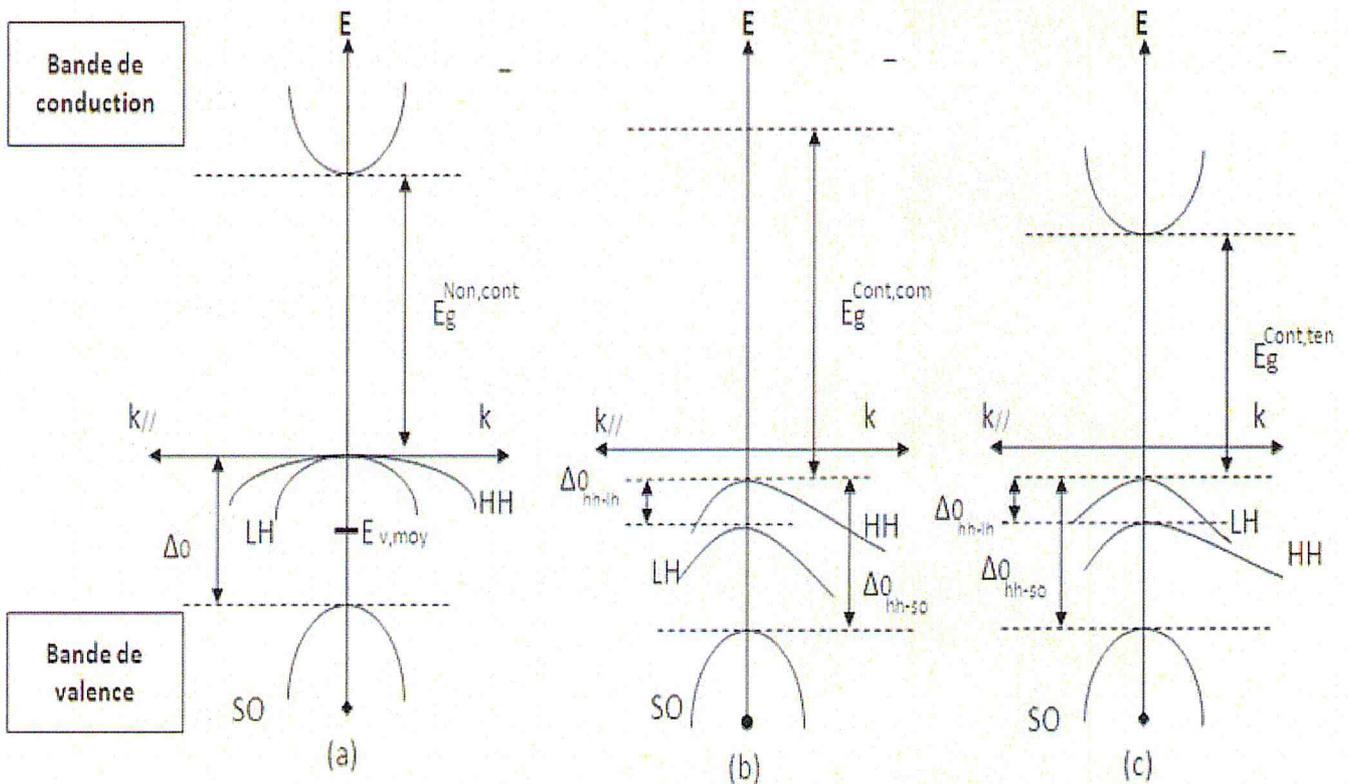


Figure 2.9 : Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct  
 a) non contraint b) contraint en compression c) contraint en tension

### 2.4.2.1 Effet de la contrainte sur le gap :

Les deux composantes parallèle et perpendiculaire du tenseur de la déformation peuvent être définies de la manière suivante : [73]

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{a_{\parallel} - a}{a} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{a_{\perp} - a}{a} \quad (2.6)$$

Pour une structure totalement contrainte:

$$a_{\parallel} = a_{sub} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{\perp} = -2 \times \frac{C_{12}}{C_{11}} \times \varepsilon_{\parallel} \quad (2.8)$$

L'effet de la contrainte bi-axiale sur la structure de bandes de la couche épitaxiée est illustré sur la (figure 2.9). Cette figure présente la structure de bandes d'un semi-conducteur à Gap direct dans les trois cas possibles, non contraint, contraint en compression et finalement contraint en tension.

En absence de contrainte, les bandes de trous lourds et de trous légers sont isotropes et dégénérées au centre de la zone de Brillouin (ANNEXE1), et la bande de trous spin-splittée est située à une énergie  $\Delta_0$  en dessous de ces deux bandes. Le centre de gravité de la bande de valence d'énergie moyenne  $E_{V,moy}$  se trouve par conséquent à  $\frac{\Delta_0}{3}$  au dessous du haut de la bande de valence en  $k=0$  (figure 2.9.a).

$$E_{V,moy} = \frac{E_{HH} + E_{LH} + \Delta_0}{3} \quad (2.9)$$

$E_{HH}$ : Energie de la bande de trous lourds.

$E_{LH}$ : Energie de la bande de trous légers.

$\Delta_0$ : Energie de décalage des bandes des trous spin-splittée.

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

La composante hydrostatique, liée à la déformation selon l'axe de croissance, provoque un décalage du centre de gravité de la bande de valence ainsi que le 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  $\Delta_{hh-lh}$  de l'ordre de 60-80 meV pour un désaccord paramétrique de 1%).

Pour une couche épitaxiée soumise à une contrainte bi-axiale de compression, la composante hydrostatique augmente l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction, et la contrainte de cisaillement rend les bandes de valence fortement anisotropes [27] ; la bande de plus haute énergie devient lourde selon  $k_{\perp}$  et légère selon  $k_{\parallel}$  (bande HH). La bande d'énergie inférieure devient elle légère selon  $k_{\perp}$  et lourde selon  $k_{\parallel}$  (bande LH) (figure 2.9.b).

Si la couche est soumise à une contrainte bi-axiale de tension (figure 2.9.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) restant légère selon  $k_{\perp}$  et lourde selon  $k_{\parallel}$ .

Les décalages énergétiques des centres de gravité de la bande de valence et de la bande de conduction en  $K = 0$  induits par la contrainte hydrostatique, varient proportionnellement à la contrainte [73]:

$$\Delta E_{V,moy}^{hyd} = a_v(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.10)$$

$$\Delta E_c^{hyd} = a_c(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.11)$$

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

Les décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement dans chacune des bandes constituant la bande de valence sont les suivants, dans le cas d'une croissance sur substrat(100) [73].

$$\Delta E_{hh}^{cisa} = -\frac{1}{2} \times \delta E^{cisa} \quad (2.12)$$

$$\Delta E_{lh}^{cisa} = -\frac{1}{2} \Delta_0 + \frac{1}{4} \delta E^{cisa} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (2.13)$$

$$\Delta E_{so}^{cisa} = -\frac{1}{2} \Delta_0 + \frac{1}{4} \delta E^{cisa} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (2.14)$$

avec :

$$\delta E^{cisa,100} = 2. b. (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.15)$$

où b est le potentiel de déformation tétragonale.

En prenant comme référence énergétique  $E_{v,moy}$  (équation 2.9), et compte tenu des équations (2.10), (2.11), (2.12), (2.13), on peut définir l'énergie du haut de la bande de valence et l'énergie du bas de la bande de conduction.

$E_v$  : l'énergie du haut de la bande de valence est :

$$E_v = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_{v,moy}^{hyd} + \max(\Delta E_{hh}^{cisa}, \Delta E_{lh}^{cisa}) \quad (2.16)$$

$E_c$  : l'énergie du bas de la bande de conduction est :

$$E_c = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_g + \Delta E_c^{hyd} \quad (2.17)$$

Dans ces expressions  $E_{v,moy}$ , l'éclatement Spin-orbite  $\Delta_0$  et l'énergie de gap sont relatifs au matériau non contraint. via les équations (2.16) et (2.17) on peut déterminer l'équation du Gap contraint  $E_g^{cont}$  :

$$E_g^{cont} = E_c - E_v = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \max(\Delta E_{hh}^{cisa}, \Delta E_{lh}^{cisa}) \quad (2.18)$$

Pour une couche soumise à une contrainte en compression la bande des trous lourds est au dessus de la bande des trous légers (figure 2.9.b) et l'on a :

$$\max(\Delta E_{hh}^{cisa}, \Delta E_{lh}^{cisa}) = \Delta E_{hh}^{cisa}$$

Donc l'équation (2.17) devient pour une couche en compression :

$$E_g^{cont,com} = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{hh}^{cisa} \quad (2.19)$$

La détermination du Gap contraint nécessite la connaissance du Gap non contraint  $E_g$  et l'éclatement spin-orbite  $\Delta_0$  de la couche relaxée, les constantes élastiques  $C_{ij}$  de la couche, les potentiels de déformation hydrostatique  $a_c$  et  $a_v$ , ainsi que le potentiel de déformation tétragonale  $b$ . ces paramètres sont répertoriés en ANNEXE pour les composés III-V binaires.

Dans la cas où la couche contrainte est une solution solide ternaire (exemple  $A_{(1-x)}B_xC$ ), ces paramètres peuvent être déterminés par interpolation linéaire, sauf pour les énergies  $E_g$  et  $\Delta_0$  qui sont déterminées par l'expression suivante :

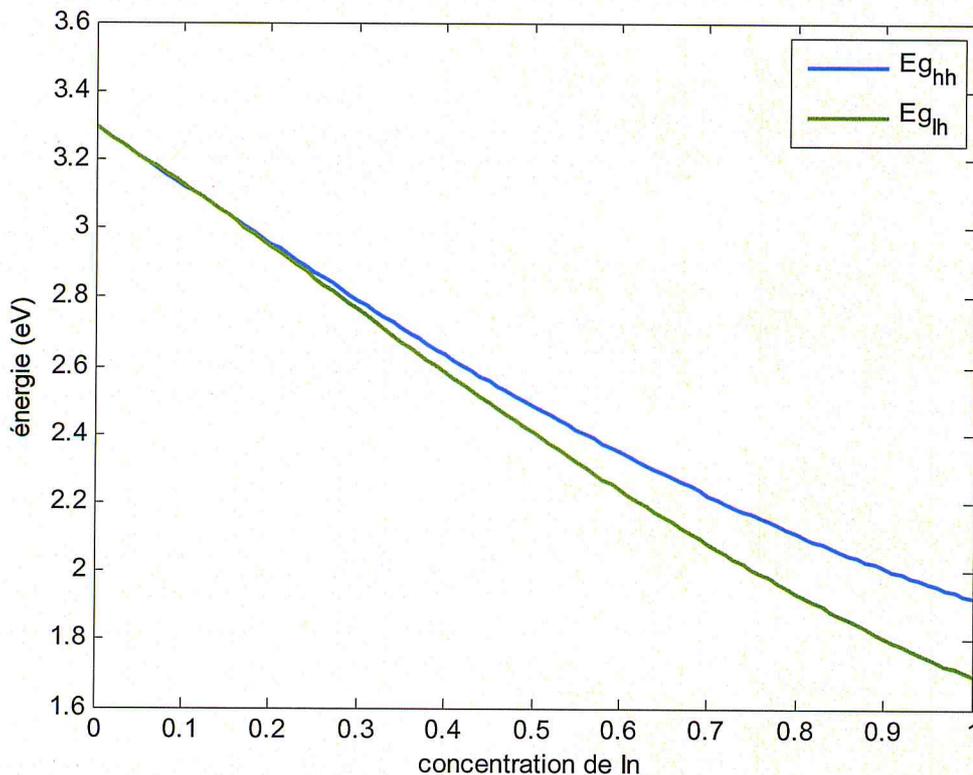
$$E_{A_{(1-x)}B_xC} = (1 - x)E_{AC} + xE_{BC} - x(1 - x)C_{AC-BC}$$

avec :

$E$  : est  $E_g$  ou  $\Delta_0$ .

$C_{AC-BC}$  : Terme de Bowing.

Pour le système  $Ga_{(1-x)}In_xN/GaN$ , la figure (2.10) donne la variation de l'énergie du gap



**Figure 2.10** : Variation de l'énergie de gap de la structure contrainte du  $Ga_{(1-x)}In_xN/GaN$  en fonction de la concentration indium.

### 2.4.3 Longueur de diffusion

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

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (2.21)$$

Avec :

$\tau$  : la durée de vie des porteurs

$D$  : le coefficient de diffusion des porteurs, défini par :

$$D = \frac{kT}{q} \cdot \mu \quad (2.22)$$

Avec :

$\mu$  : la mobilité des porteurs

La longueur de diffusion est un paramètre à connaître lors de la conception d'un composant électronique, comme une cellule solaire. En effet, si les électrodes collectant le courant produit par la cellule sont éloignées d'une distance supérieure à la longueur de diffusion, alors les charges se recombineront avant d'être collectées [74].

### 2.4.4 Mécanismes de recombinaison

Dans l'InN, les électrons et les trous photo générés se recombinent principalement de trois manières : par l'intermédiaire de défauts de manière non radiative, de manière radiative par des transitions inter bandes, et par le phénomène de recombinaison Auger de manière non-radiative. Le taux de recombinaison total peut alors s'écrire :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{défaut}} + \frac{1}{\tau_{radiatif}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} = \sigma \bar{v} N_{défaut} + B_{radiatif} n + B_{Auger} n^2 \quad (2.23)$$

Avec

$\sigma$  : la section efficace de capture

$\bar{v}$  : la vitesse moyenne des porteurs libres

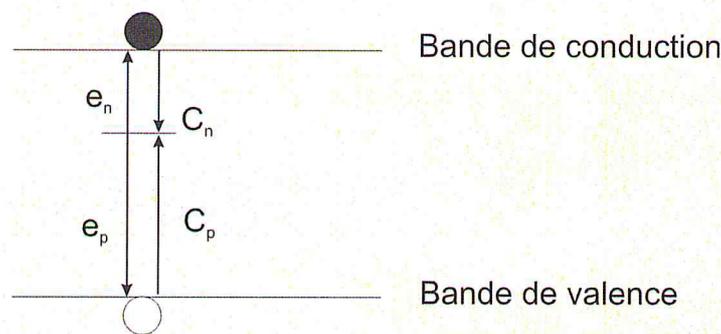
$N_{défaut}$  : la densité de défauts

$n$  : la densité d'électrons libres

$B_{radiatif}$  et  $B_{Auger}$  : des constantes qui dépendent du matériau

### 2.4.4.1 Recombinaisons Shockley-Read-Hall

Le mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) se fait par l'intermédiaire d'un défaut dans le gap (défauts structuraux, impuretés, etc.) qui peut être un centre recombinant pour les porteurs libres. Selon le niveau énergétique introduit par le défaut dans le gap et la section efficace de capture de ce défaut, un type de porteur peut être plus facilement capturé qu'un autre. A noter que le phénomène inverse existe également où un trou ou un électron peuvent être émis. La Figure 2.11 présente ces phénomènes de recombinaison avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous. La probabilité d'occupation du défaut dépend du niveau de Fermi,  $E_f$  [74].

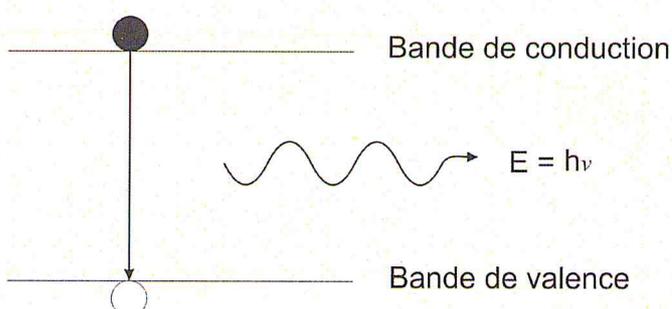


**Figure 2.11** : Schéma de la recombinaison Shockley-Read-Hall avec les coefficients d'émission et de capture des électrons et des trous.

Ce type de recombinaison est très probable dans les matériaux possédant une forte densité de défauts, ce qui est le cas des nitrures.

### 2.4.4.2 Recombinaisons radiatives

La recombinaison radiative par transitions inter bande, ou bande-à-bande, correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence avec émission d'un photon, voir Figure 2.12. L'énergie du photon émis correspondra à l'énergie du gap d'énergie interdite du matériau [74].



**Figure 2.12** : Schéma de la recombinaison radiative.

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

#### 2.4.4.3 Recombinaisons Auger

Lors d'une recombinaison Auger, un électron et un trou se recombinent en transférant leur énergie cinétique à une autre charge libre (électron ou trou). La Figure 2.13 explique ce mécanisme de recombinaison dans le cas d'un transfert à un électron.

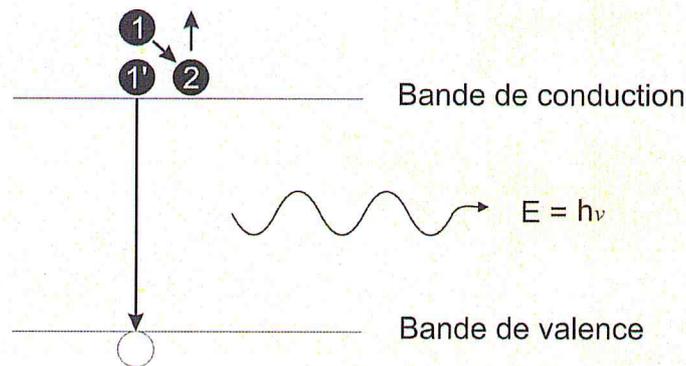


Figure 2.13 : Schéma de la recombinaison Auger.

L'électron «1» transfère son énergie cinétique à l'électron «2», ce dernier a donc une énergie plus grande. L'électron «1» se trouve alors en position «1'» où il va se recombinaison avec un trou en émettant un photon d'énergie  $h\nu$ .

Ce type de recombinaison est peu probable dans les matériaux à grand gap tels que le GaN ou l'InGaN riche en gallium [74].

#### 2.4.5 Propriétés optiques

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

### 2.4.5.1 Indice de réfraction

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

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.24)$$

La vitesse de la lumière dans un matériau n'est pas constante, elle change avec la longueur d'onde. L'indice de réfraction dans le cas du GaN, est égal à environ 2,3 [51]. Pour l'InN, il vaut environ 2,9 dans l'infrarouge.

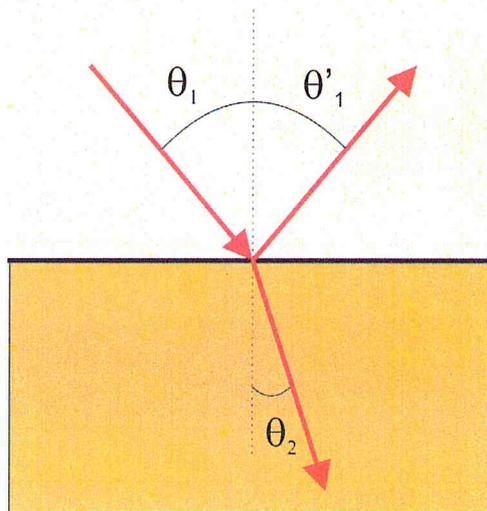
L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.25)$$

Avec :

$n_1$  et  $n_2$  : les indices de réfractons de deux milieux

$\theta_1$  et  $\theta_2$  : les angles des rayons lumineux par rapport à la normale



**Figure 2.14** : Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.

Le rayon incident arrive sur le dioptre avec un angle  $\theta_1$  par rapport à la normale. Une partie du rayon est réfléchié avec le même angle, appelé  $\theta_1'$ , l'autre partie du rayon est transmise avec un angle  $\theta_2$  par rapport à la normale (Dans le schéma  $n_1 < n_2$ , donc  $\theta_1 > \theta_2$ ).

### 2.4.5.2 Absorption

Seule la lumière absorbée est restituée 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 [75].

Le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ), est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau.

Les électrons dans la bande de valence d'un semi-conducteur peuvent absorber des photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite ( $E_g$ ), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption  $\alpha(E)$ , pour une énergie  $E$  supérieure à l'énergie de la bande interdite est donnée par :

$$\alpha = 2,2 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{1,24}{\lambda} - E_g} \quad (2.26)$$

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité tous les aspects de l'alliage Ga<sub>(1-x)</sub>In<sub>x</sub>N sur le substrat GaN tant sur le plan structurel que sur le plan électrique et optique.

Nous avons vu les propriétés structurelles telles que la structure de maille, les couches contraintes et l'épaisseur critique ainsi que leurs effets sur le gap.

Il ressort aussi de ce chapitre que l'alliage Ga<sub>(1-x)</sub>In<sub>x</sub>N sur le substrat GaN est contraint uniquement en compression.

la simulation qui donne la variation de gap en fonction de la concentration en  $x$  de la densité d'indium, montre que le gap de l'alliage diminue avec l'augmentation de la concentration d'indium.

la diminution du gap avec l'augmentation de l'indium influe directement sur le coefficient d'absorption.

# **CHAPITRE 3**

## **SIMULATION ET RESULTATS**

## CHAPITRE 3 : SIMULATION ET RESULTATS

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations effectuées sur la cellule photovoltaïque à base de semi-conducteur III V  $Ga_{(1-x)}In_xN$  sur le substrat GaN effectuée à l'aide du logiciel MATLAB.

Nous avons simulé les différentes caractéristiques structurelle, électrique et optique de l'alliage afin de déterminer ses performances.

Dans notre travail, nous avons étudié et simulé la structure  $Ga_{(1-x)}In_xN$  sur le substrat GaN avec un gap variable entre 0,7 et 3,4 eV. Ce qui nous a permis de déterminer les paramètres qui optimisent cette structure illustrée dans la figure 3.1.

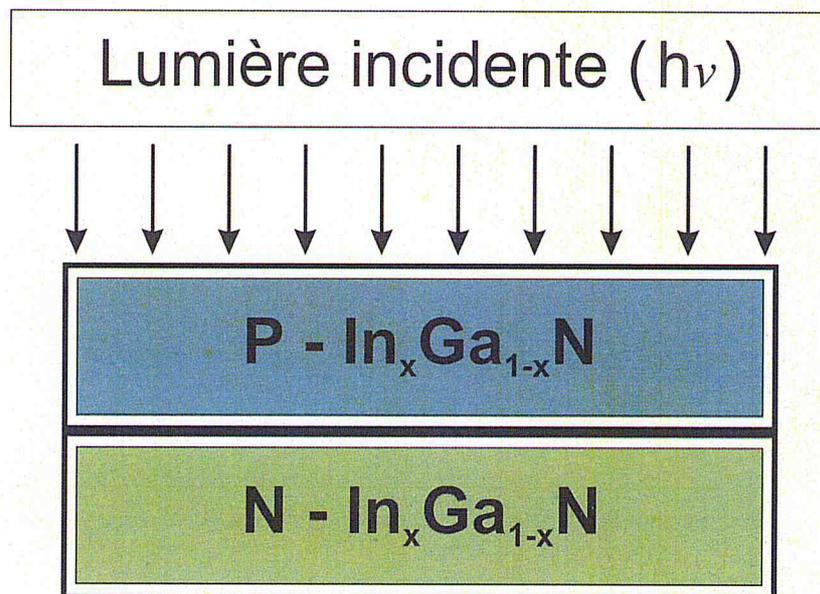


Figure 3.1 : Structure InGaN d'une cellule solaire uni-jonction.

## 3.2 Paramètres de la cellule photovoltaïque à base du matériau InGaN

### 3.2.1 Le coefficient d'absorption

Dans la Figure 3.2, nous avons représenté la variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de l'énergie des photons incidents pour différentes valeurs de la concentration d'indium  $x$ . Le coefficient d'absorption augmente avec l'énergie des photons.

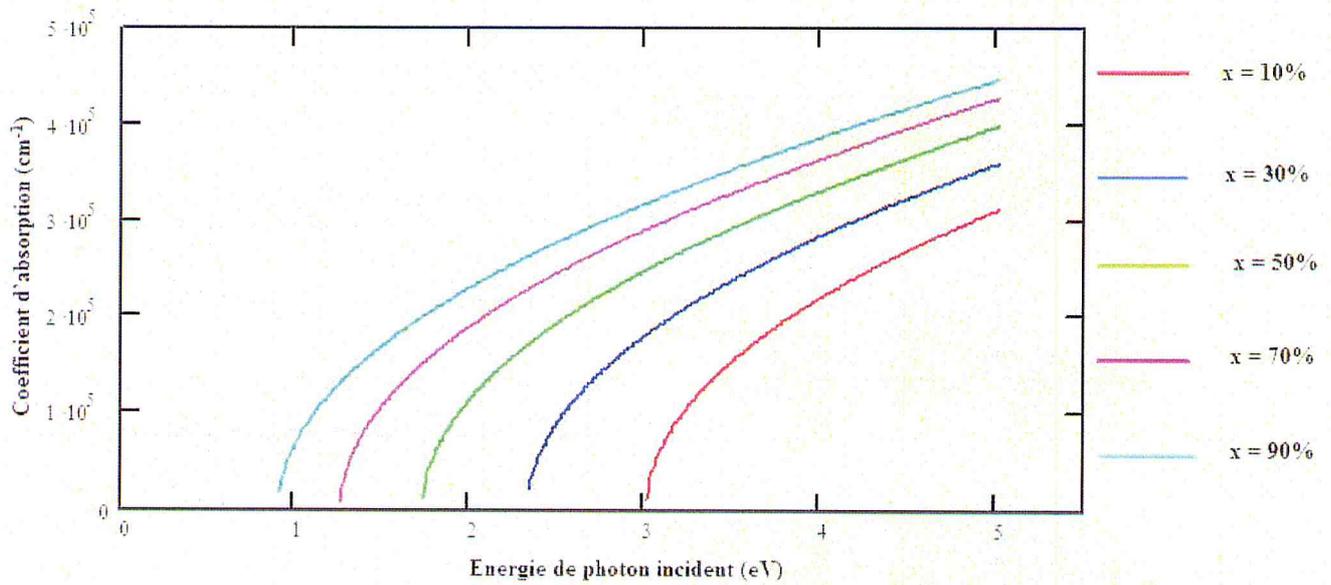


Figure 3.2 : Variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de l'énergie des photons

### 3.2.2 L'énergie de la bande interdite (gap)

Dans la figure 3.3 est illustrée la variation du gap  $E_g$  en fonction de la concentration d'indium  $x$ . Le gap diminue avec la concentration  $x$ , et varie entre 0,7 et 3,4 eV.

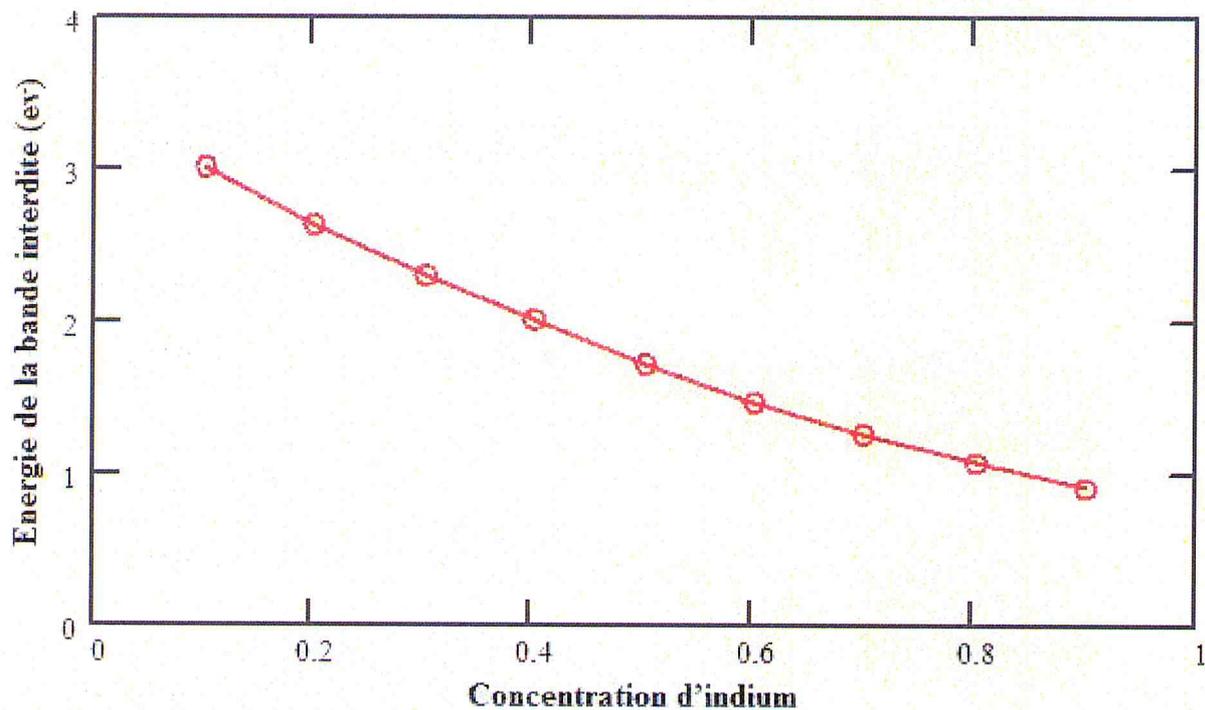
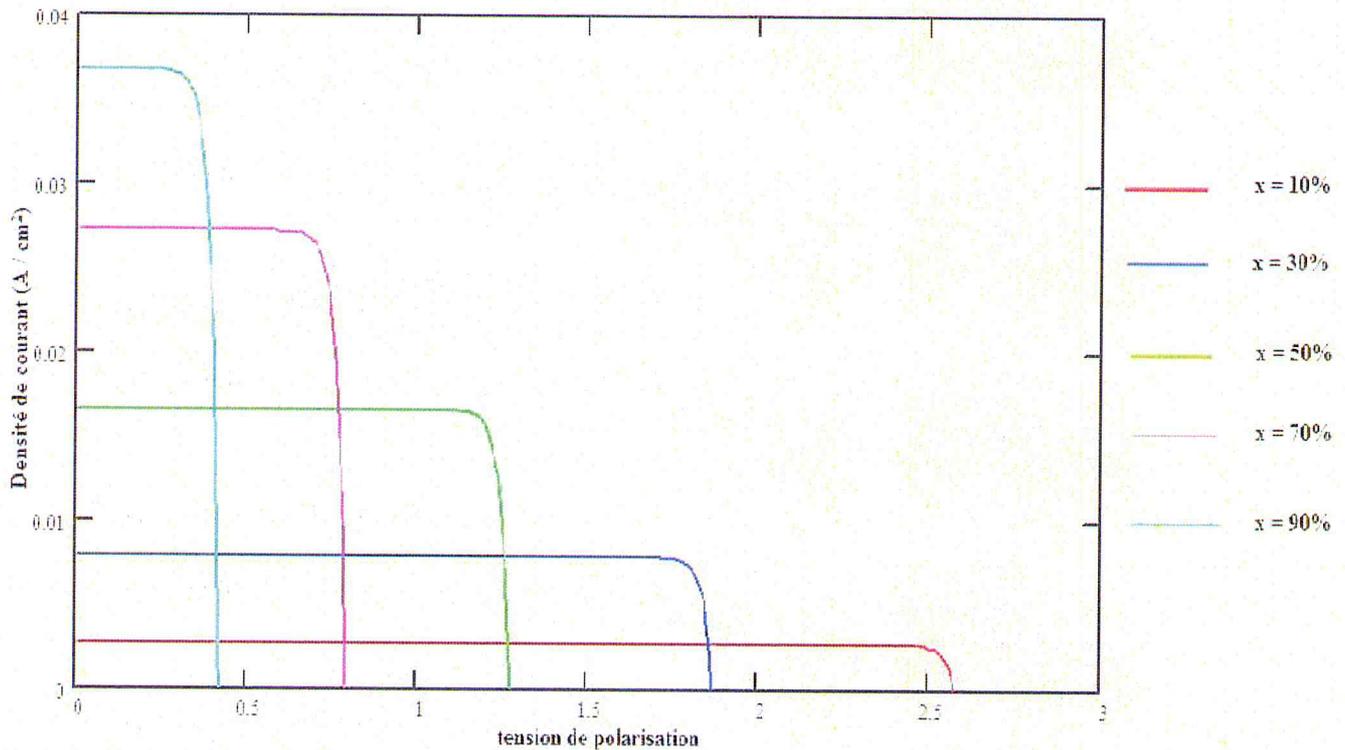


Figure 3.3 : Variation de l'énergie de gap en fonction de la concentration d'Indium.

### 3.2.3 Caractéristiques courant-tension

Dans la figure 3.4 sont représentées les caractéristiques courant-tension pour différentes concentrations d'indium  $x$ . On constate que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varient en sens inverse,  $J_{cc}$  augmente avec la concentration d'indium  $x$  alors que  $V_{co}$  diminue avec  $x$ .



**Figure 3.4 :** Caractéristiques courant-tension de la structure  $Ga_{(1-x)}In_xN$  pour plusieurs concentrations d'indium avec : ( $x_j = 10^{-6}$  cm et  $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17}$   $cm^{-3}$ ).

On constate que la concentration d'indium provoque un changement tangible dans les caractéristiques courant-tension de la cellule. Pour des concentrations d'indium élevées, le courant augmente considérablement en faisant chuter la tension.

### 3.2.4 Courant de court-circuit

Dans cette étape, nous avons fixé les densités d'accepteurs et les densités des donneurs dans la jonction P-N à  $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pour une profondeur de jonction  $x_j = 10^{-6} \text{ cm}$ .

Dans la structure InGaN le courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente avec la concentration d'indium, et atteint des valeurs supérieures à  $0,03 \text{ A/cm}^2$  pour des concentrations d'indium de l'ordre de 80-90 %.

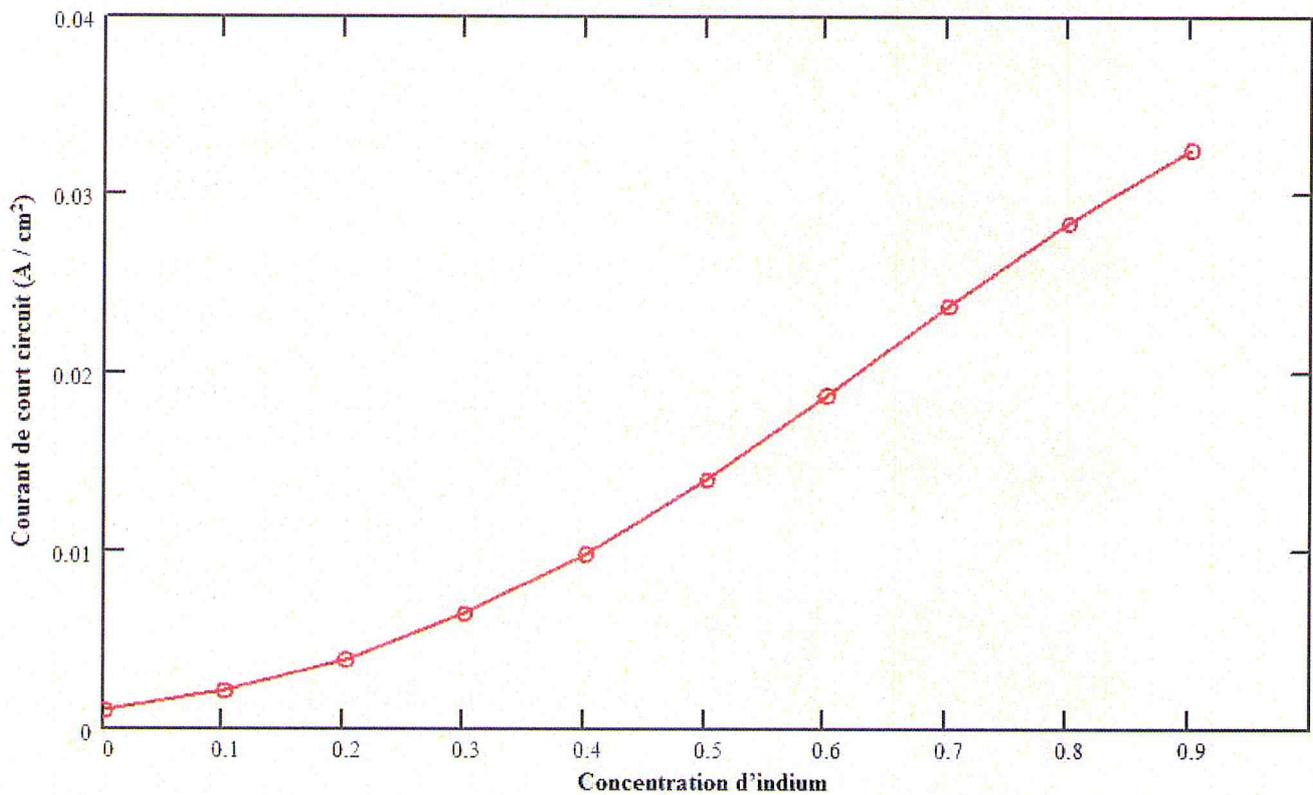
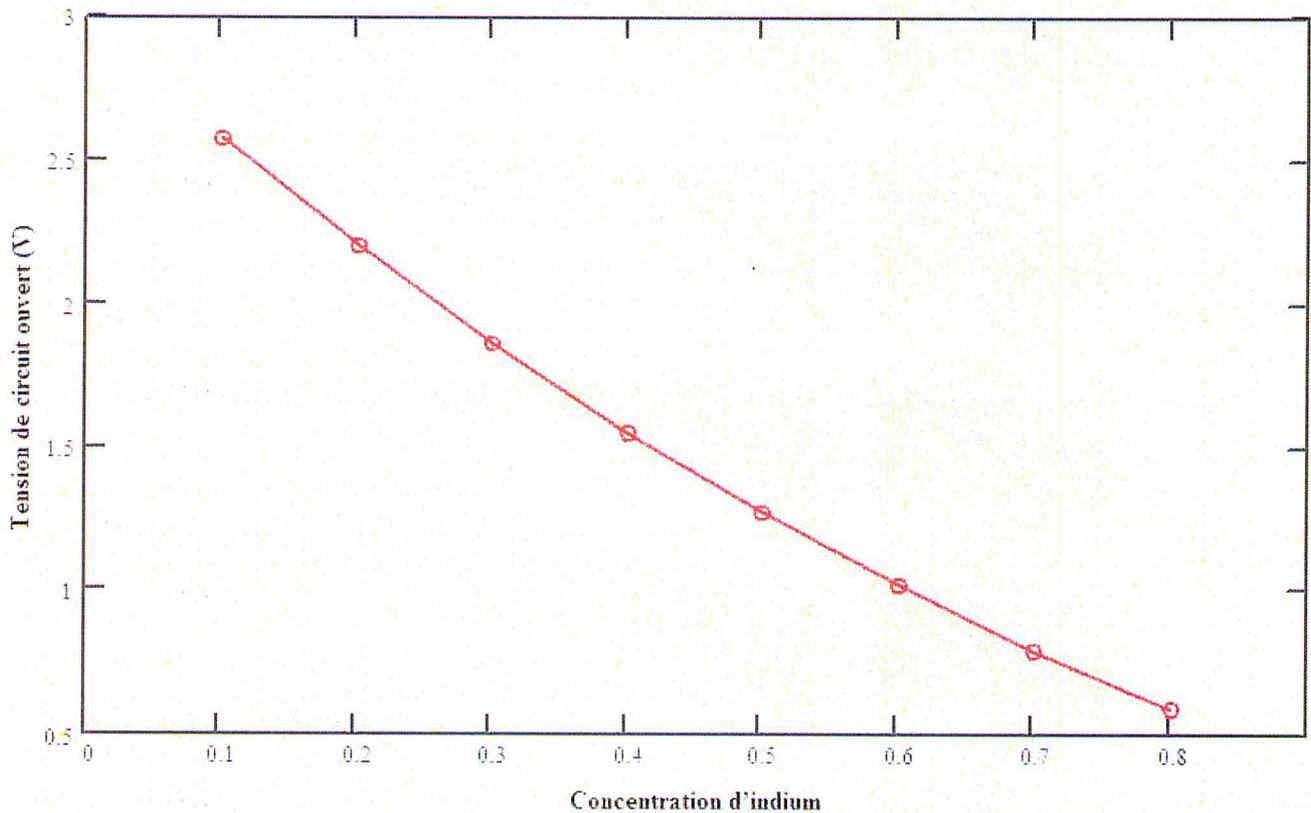


Figure 3.5 : Variation du courant court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la concentration d'indium x.

Avec l'augmentation de la concentration d'indium dans la structure, on observe une importante amélioration au niveau du courant de court-circuit.

### 3.2.5 Tension de circuit ouvert

La figure 3.6 représente la variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration d'indium  $x$ . La tension  $V_{co}$  diminue avec cette dernière.



**Figure 3.6 :** Variation de la tension circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de la concentration de l'indium avec : ( $x_j = 10^{-6}$  cm et  $N_a = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ).

### 3.2.6 Puissance et puissance maximale délivrée

La figure 3.7 représente les variations de la puissance délivrée en fonction de la tension pour différentes concentrations d'indium. Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissances maximales  $P_{max}$ .

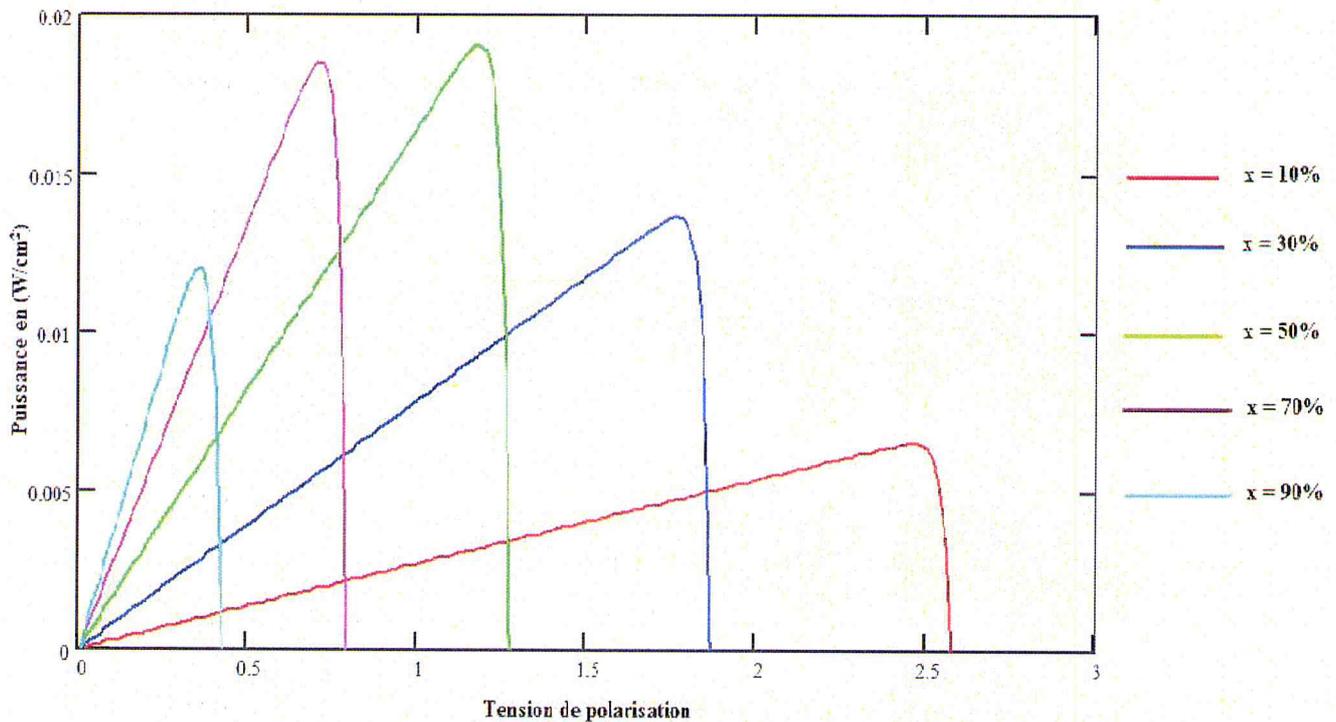


Figure 3.7 : Puissance délivrée par la cellule pour plusieurs concentrations d'indium

### 3.2.7 Le facteur de forme

Le facteur de forme est un paramètre important qui dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction PN, et du matériau utilisé.

Dans la figure 3.8, on remarque que le facteur de forme atteint une valeur de 91% pour une concentration d'indium de l'ordre de 30 – 40%. Mais, a contrario, l'augmentation de la valeur de la concentration d'indium provoque une diminution du facteur de forme.

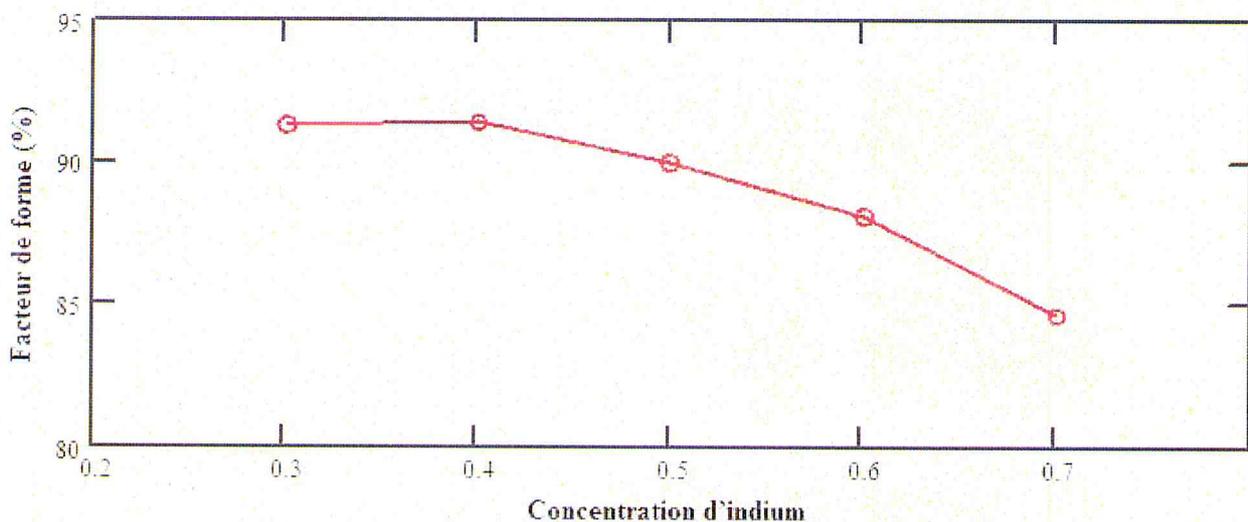


Figure 3.8 : Variation du facteur de forme FF en fonction de la concentration d'indium.

### 3.2.8 Le rendement

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, et la finalité de cette simulation pour pouvoir estimer la qualité de notre cellule.

La figure 3.9 montre la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de la concentration de l'indium. Un rendement d'une valeur maximale de 17,5% est atteint pour une concentration d'indium  $x = 60\%$ .

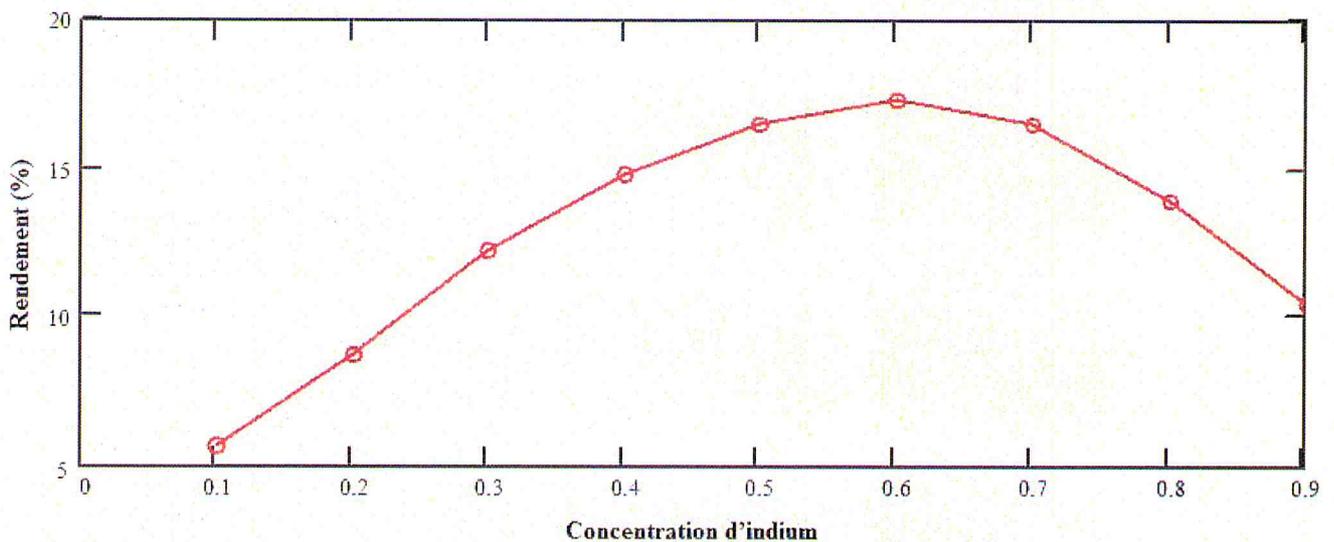
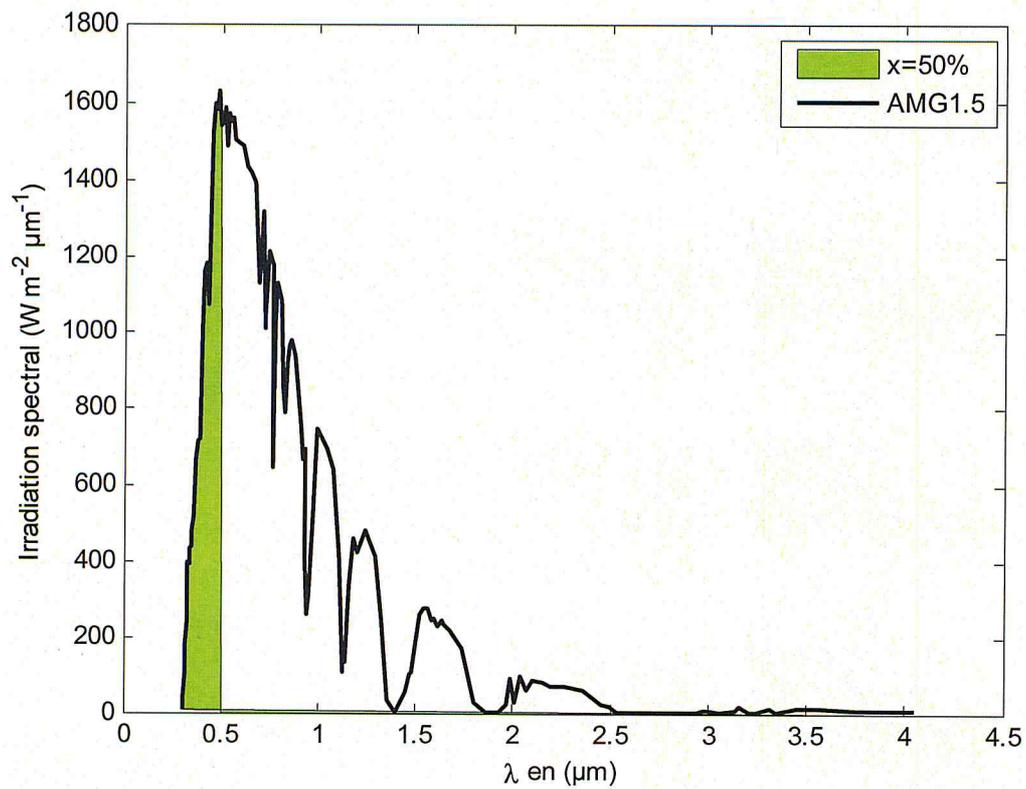


Figure 3.9 : Représentation du rendement en fonction de la concentration de l'indium.

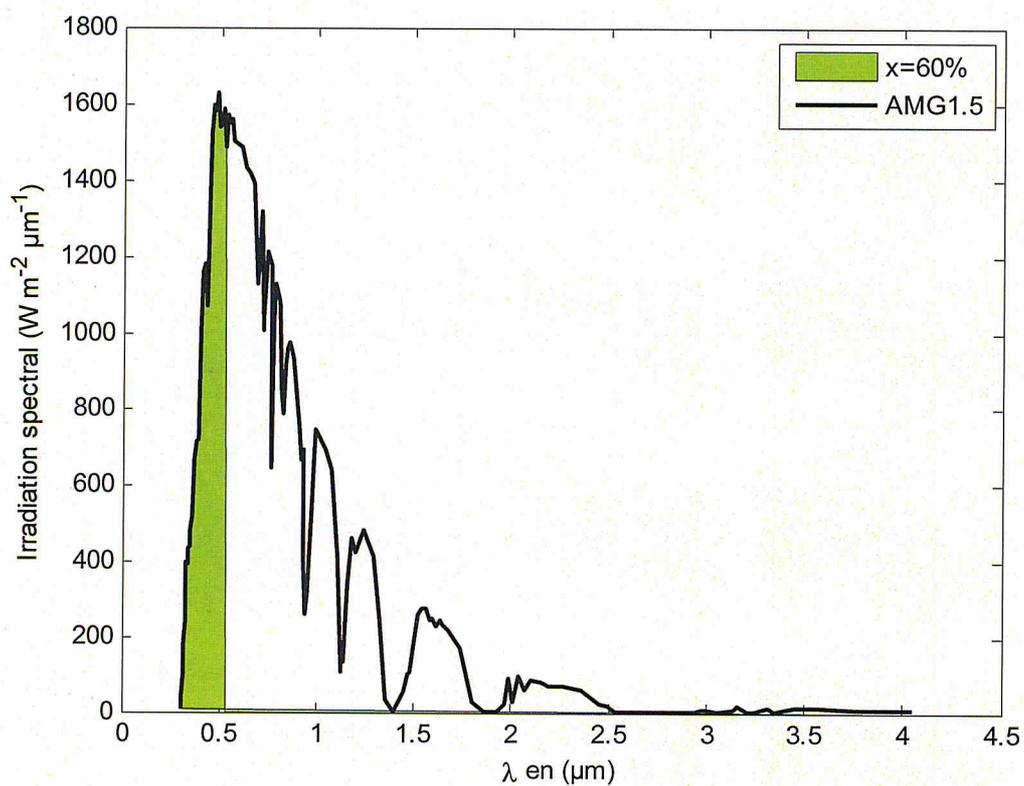
Une cellule photovoltaïque à base d'InGaN avec un rendement théorique de 17,5% est très optimale pour une seule cellule solaire

### 3.2.9 Calcul de la couverture spectrale

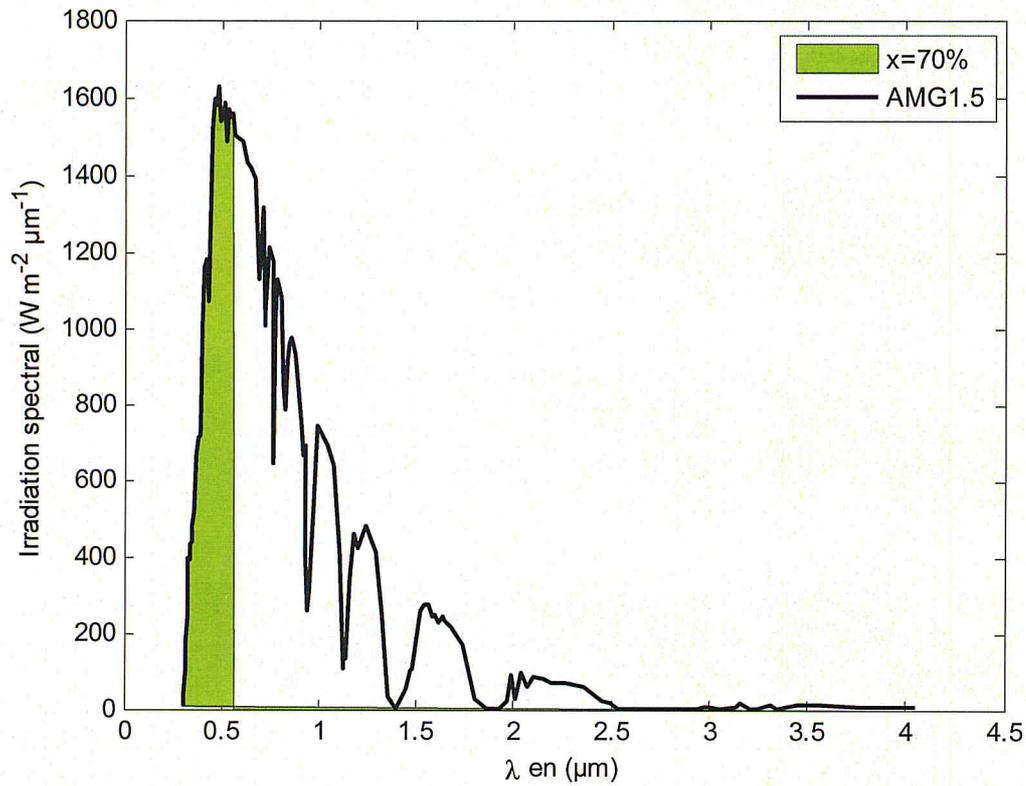
Dans cette partie, nous avons simulé et représenté la couverture spectrale de notre cellule au alentour de la concentration qui donne le rendement optimal pour ce type de structure.



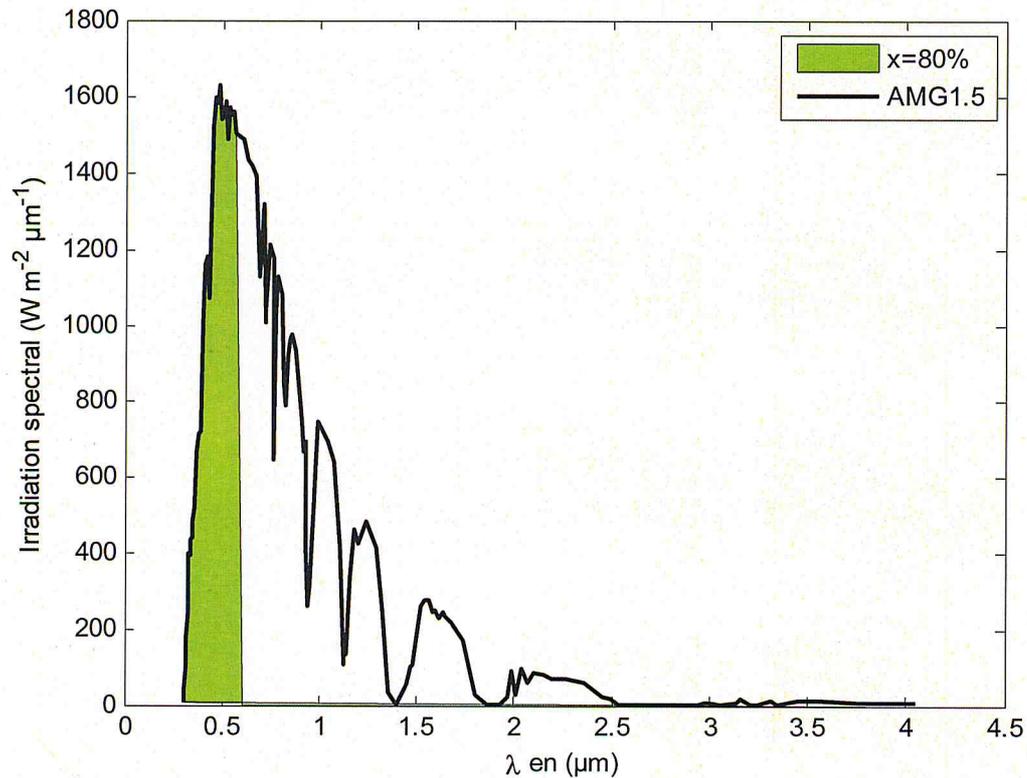
**Figure 3.10** : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration  $x = 50\%$  à AMG 1.5



**Figure 3.11** : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration  $x = 60\%$  à AMG 1.5



**Figure 3.12** : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration  $x = 70\%$  à AMG 1.5



**Figure 3.13** : Représentation de la couverture spectrale de la cellule InGaN avec une concentration  $x = 80\%$  à AMG 1.5

Des figures précédentes, il apparait clairement que notre structure à base d'InGaN n'absorbe pas tous le spectre solaire, mais est limitée à une portion de ce dernier.

Le maximum de la valeur des longueurs d'ondes absorbées varient de  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$  (bleu-vert) pour une concentration d'indium à 50% à  $\lambda = 0,61 \mu\text{m}$  (orange-rouge) pour une concentration d'indium à 80% en passant par  $\lambda = 0,53 \mu\text{m}$  (vert moyen) pour une concentration d'indium à 60%.

### **3.3 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons schématisé les différentes caractéristiques simulées de notre structure  $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{N}$  sur le substrat GaN pour arriver à estimer le rendement de cette dernière.

Il ressort, des différentes figures, que :

- Un rendement de 17,5% est atteint avec un facteur de forme avoisinant les 90%
- La structure étudiée ne couvre qu'une partie du spectre solaire qui va de l'ultra violet vers l'orange-rouge avec une longueur d'onde  $\lambda = 0,61 \mu\text{m}$  pour une concentration d'indium de 80%. A sa valeur maximum de rendement, la couverture spectrale ne dépasse pas le vert ( $\lambda = 0,53 \mu\text{m}$ )

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié la structure d'une cellule photovoltaïque à base de  $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{N}$  sur le substrat GaN.

Dans un premier temps, nous avons présenté le principe de fonctionnement des cellules solaires et les différents facteurs de perte limitant le rendement de conversion.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié l'influence de la concentration d'indium sur les différents paramètres physiques de l'alliage, et la contrainte entre les semi-conducteurs mis en action dans notre structure. Les résultats de simulations qui ont été faites pour le gap, le coefficient d'absorption, l'épaisseur critique, le facteur de forme et le rendement ainsi que la réponse spectrale de la structure.

Pour une concentration d'indium de 60 %, nous avons obtenu un rendement optimal de 17,5 %. Ce qui est très intéressant pour une structure uni-jonction. La limite d'absorption du spectre solaire de notre structure nous amène à la réflexion sur une cellule multi-jonction permettant de couvrir tout le spectre et ainsi atteindre de hauts rendements.

# ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE 1

Annexe 1.1 : Tableau de Mendeleïv

Tableau périodique des éléments

**Légende**

- Electropositivité (échelle de Pauling)
- Nombre d'oxydation (les plus fréquents)
- Densité (à 300 K) (° az. à 273K, 1 atm, en kg/m<sup>3</sup>)
- Température de fusion du corps pur [C]
- Température d'ébullition du corps pur [C]
- Electronegativité (échelle de Pauling)
- Masses atomiques moyennes (si entre parenthèses, masse de l'isotope le plus stable)
- Symbole (solide, liquide, gaz) Éléments synthétiques en italique
- Nom
- Numéro atomique

1 1.008 1 H 1.008 0.000136	2 6.941 3 Li 1.035 0.534	3 9.012 4 Be 9.012 1.824	4 11 11 Na 22.990 0.971	5 12 12 Mg 24.305 1.738	6 13 13 Al 26.982 1.183	7 14 14 Si 28.086 2.336	8 15 15 P 30.974 1.824	9 16 16 S 32.06 2.071	10 17 17 Cl 35.453 3.163	11 18 18 Ar 39.948 4.76	12 19 19 K 39.098 8.563	13 20 20 Ca 40.078 7.85	14 21 21 Sc 44.956 3.48	15 22 22 Ti 47.88 3.76	16 23 23 V 50.942 6.09	17 24 24 Cr 51.996 7.19	18 25 25 Mn 54.938 7.43	19 26 26 Fe 55.847 7.86	20 27 27 Co 58.933 8.90	21 28 28 Ni 58.69 8.90	22 29 29 Cu 63.546 8.96	23 30 30 Zn 65.38 7.14	24 31 31 Ga 69.723 7.31	25 32 32 Ge 72.63 5.35	26 33 33 As 74.922 5.72	27 34 34 Se 78.96 4.81	28 35 35 Br 79.904 4.81	29 36 36 Kr 83.80 3.71	30 37 37 Rb 85.468 3.71	31 38 38 Sr 87.62 2.54	32 39 39 Y 88.906 4.47	33 40 40 Zr 91.224 6.49	34 41 41 Nb 92.906 5.44	35 42 42 Mo 95.94 6.02	36 43 43 Tc 98.906 6.94	37 44 44 Ru 101.07 8.86	38 45 45 Rh 101.07 8.86	39 46 46 Pd 106.367 11.5	40 47 47 Ag 107.868 19.3	41 48 48 Cd 112.411 8.65	42 49 49 In 114.818 7.31	43 50 50 Sn 118.710 7.31	44 51 51 Sb 121.757 6.68	45 52 52 Te 127.603 6.24	46 53 53 I 126.905 4.93	47 54 54 Xe 131.29 5.89	48 55 55 Cs 132.905 3.71	49 56 56 Ba 137.327 3.71	50 57 57 La 138.905 6.67	51 58 58 Ce 140.12 6.67	52 59 59 Pr 140.908 7.29	53 60 60 Nd 144.24 7.29	54 61 61 Pm 144.913 7.29	55 62 62 Sm 150.36 7.29	56 63 63 Eu 151.96 7.29	57 64 64 Gd 157.25 7.29	58 65 65 Tb 158.925 7.29	59 66 66 Dy 162.50 7.29	60 67 67 Ho 164.930 7.29	61 68 68 Er 167.26 7.29	62 69 69 Tm 168.934 7.29	63 70 70 Yb 173.04 7.29	64 71 71 Lu 174.967 7.29	65 72 72 Hf 178.49 13.3	66 73 73 Ta 180.948 13.3	67 74 74 W 183.85 19.3	68 75 75 Re 186.207 21.0	69 76 76 Os 190.23 22.4	70 77 77 Ir 192.22 22.4	71 78 78 Pt 195.08 21.0	72 79 79 Au 196.967 19.3	73 80 80 Hg 200.59 19.3	74 81 81 Tl 204.37 11.5	75 82 82 Pb 207.2 11.5	76 83 83 Bi 208.98 9.8	77 84 84 Po 209 9.8	78 85 85 At 210 9.8	79 86 86 Rn 222 9.8	80 87 87 Fr 223 9.8	81 88 88 Ra 226 9.8	82 89 89 Ac 227 9.8	83 90 90 Th 232.038 11.7	84 91 91 Pa 231.036 11.7	85 92 92 U 238.029 19.3	86 93 93 Np 237.048 19.3	87 94 94 Pu 239.042 19.3	88 95 95 Am 243.061 19.3	89 96 96 Cm 247.071 19.3	90 97 97 Bk 247.071 19.3	91 98 98 Cf 251.083 19.3	92 99 99 Es 252.083 19.3	93 100 100 Fm 257.103 19.3	94 101 101 Md 258.103 19.3	95 102 102 No 259.103 19.3	96 103 103 Lr 260.103 19.3
---	---	---	--	--	--	--	---------------------------------------	--------------------------------------	---	--	--	--	--	---------------------------------------	---------------------------------------	--	--	--	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	---------------------------------------	--	--	---------------------------------------	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	--	--	---	---	---	--	---	--	---	--	--	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	---------------------------------------	---	--	--	--	---	--	--	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---	---	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figure A.1 – Tableau périodique des éléments

### Annexe 1.2 : Données diverses

# Données diverses et formulaire

Éléments par ordre alphabétique		Constantes physiques		Préfixes SI		Unités SI et facteurs de conversion	
Éléments	N°	Éléments	N°	Préfixe	Multiple	Symbole	Multiple
Actinium	89	Charge d'un proton	1,60219 · 10 <sup>-19</sup> C	Téra	10 <sup>12</sup>	T	10 <sup>12</sup>
Aluminium	13	Constante de Boltzmann	1,38066 · 10 <sup>-23</sup> J·K <sup>-1</sup>	Giga	10 <sup>9</sup>	G	10 <sup>9</sup>
Amercium	95	Constante de Faraday	96485 C·mol <sup>-1</sup>	Méga	10 <sup>6</sup>	M	10 <sup>6</sup>
Antimoine	51	Constante de Planck	6,62618 · 10 <sup>-34</sup> J·s	Kilo	10 <sup>3</sup>	k	10 <sup>3</sup>
Argent	47	Constante des gaz	8,31441 J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup>				
Argon	18	Charge d'un électron	1,60219 · 10 <sup>-19</sup> C				
Arsenic	33	Charge d'un neutron	1,67495 · 10 <sup>-27</sup> kg				
Azote	7	Charge d'un proton	1,67265 · 10 <sup>-27</sup> kg				
Baryum	56	Nombre d'Avogadro	6,02205 × 10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup>				
Béryllium	4	Rayon de Bohr	5,292 · 10 <sup>-11</sup> m				
Bismuth	83	Unité de masse atomique	1,66056 · 10 <sup>-27</sup> kg				
Bore	5	Vitesse de la lumière	2,997925 · 10 <sup>8</sup> m·s <sup>-1</sup>				
Bromine	35						
Calcium	20						
Carbone	6						
Chlore	17						
Chrom	24						
Cobalt	27						
Cuivre	29						
Curium	96						
Dubnium	105						
Dysprosium	66						
Einsteinium	99						
Erbium	68						
Étain	50						
Europium	63						
Fer	26						
Fermium	100						
Fluor	9						
Francium	87						
Gadolinium	64						
Gallium	31						
Germanium	32						
Hafnium	72						
Hassium	108						
Hélium	2						
Holmium	67						
Hydrogène	1						
Indium	49						
Iode	53						
Iridium	77						
Krypton	36						
Lanthane	57						
Lawrencium	103						
Lithium	3						
Lutétium	71						
Magnésium	12						
Manganèse	25						

Constante	Symbole	Valeur
Charge d'un proton	e	1,60219 · 10 <sup>-19</sup> C
Constante de Boltzmann	k	1,38066 · 10 <sup>-23</sup> J·K <sup>-1</sup>
Constante de Faraday	F	96485 C·mol <sup>-1</sup>
Constante de Planck	h	6,62618 · 10 <sup>-34</sup> J·s
Constante des gaz	R	8,31441 J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup>
Charge d'un électron	m <sub>e</sub>	9,10953 · 10 <sup>-31</sup> kg
Charge d'un neutron	m <sub>n</sub>	1,67495 · 10 <sup>-27</sup> kg
Charge d'un proton	m <sub>p</sub>	1,67265 · 10 <sup>-27</sup> kg
Nombre d'Avogadro	N	6,02205 × 10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup>
Rayon de Bohr	a <sub>0</sub>	5,292 · 10 <sup>-11</sup> m
Unité de masse atomique	u	1,66056 · 10 <sup>-27</sup> kg
Vitesse de la lumière	c	2,997925 · 10 <sup>8</sup> m·s <sup>-1</sup>

Préfixe	Multiple	Symbole	Préfixe	Multiple	Symbole
Téra	10 <sup>12</sup>	T	Déca	10 <sup>1</sup>	d
Giga	10 <sup>9</sup>	G	Centi	10 <sup>-2</sup>	c
Méga	10 <sup>6</sup>	M	Milli	10 <sup>-3</sup>	m
Kilo	10 <sup>3</sup>	k	Micro	10 <sup>-6</sup>	µ
			Nano	10 <sup>-9</sup>	n
			Pico	10 <sup>-12</sup>	p
			Femto	10 <sup>-15</sup>	f
			Atto	10 <sup>-18</sup>	a

Unités SI et facteurs de conversion	
1 angström [Å]	= 10 <sup>-10</sup> mètre
1 pascal [Pa]	= 1 kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-2</sup>
1 atmosphère	= 101,325 kPa = 760 toms (mmHg)
1 joule [J]	= 1 kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> = 0,23901 calorie
0 kelvin [K]	= -273,15 °C = -459,67 °F
K = °C + 273,15	°C = 5/9 (°F - 32)
°F = 9/5 (°C) + 32	

Figure A.2 – Données et constantes physiques

## ANNEXE 2

L'**épitaxie** est une technique de croissance orientée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux possédant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins. On distingue *l'homo-épitaxie*, qui consiste à faire croître un cristal sur un cristal de nature chimique identique, et *l'hétéro-épitaxie*, dans laquelle les deux cristaux sont de natures chimiques différentes.

L'épitaxie est utilisée pour faire croître des couches minces (quelques nanomètres d'épaisseur). On utilise pour cela une surface parfaitement polie d'un monocristal, le substrat, sur lequel seront déposés d'autres atomes. Le substrat est choisi de façon à avoir des paramètres de maille proches de ceux du cristal que l'on veut obtenir.

## ANNEXE 3

Une zone de Brillouin (ZB) est un sous-ensemble de l'espace réciproque de volume minimal permettant de décrire entièrement les fonctions périodiques (par exemple l'énergie des électrons) dans cet espace.

La première zone de Brillouin est la ZB particulière admettant l'origine des vecteurs d'onde comme centre de symétrie. C'est en fait la maille de l'espace réciproque construite de la façon suivante : joindre l'origine à tous les points du réseau (les plus proches suffisent en pratique), puis construire les plans médiateurs aux segments obtenu.

## ANNEXE 4

## Annexe 4.1 : Paramètres de la structure en wurtzite des éléments binaires utilisés

Paramètres	GaN	InN
$a_{lc}$ (Å) à T = 300K	3.189	3.545
$c_{lc}$ (Å) à T = 300K	5.185	5.703
$E_g$ (eV)	3.507	1.994
$\alpha$ (meV/K)	0.909	0.245
$\beta$ (K)	830	624
$\Delta_{cr}$ (eV)	0.019	0.041
$\Delta_{so}$ (eV)	0.014	0.001
$m_e^{\parallel}$	0.20	0.12
$m_e^{\perp}$	20	0.12
A1	-6.56	-8.21
A2	-0.91	-0.68
A3	5.65	7.57
A4	-2.83	-5.23
A5	-3.13	-5.11
A6	-4.86	-5.96
$E_p$ (eV)	14.0	14.6
F	0	0
VBO (eV)	-2.64	-1.59
$a_1$ (eV)	-6.5	-3.5
$a_2$ (eV)	-11.8	-3.5
$D_1$ (eV)	-3.0	-3.0
$D_2$ (eV)	3.6	3.6
$D_3$ (eV)	8.82	8.82
$D_4$ (eV)	-4.41	-4.41
$D_5$ (eV)	-4.0	-4.0
$D_6$ (eV)	-5.1	-5.1
$c_{11}$ (Gpa)	390	223
$c_{12}$ (Gpa)	145	115
$c_{13}$ (Gpa)	106	92
$c_{33}$ (Gpa)	398	224
$c_{44}$ (Gpa)	105	48
$e_{13}$ (C/m <sup>2</sup> )	-0.35	-0.57
$e_{33}$ (C/m <sup>2</sup> )	1.27	0.97
$P_{sp}$ (C/m <sup>2</sup> )	-0.029	-0.032

Tableau A.1 – Paramètres de la structure en wurtzite des éléments binaires GaN et InN

### Annexe 4.2 : Paramètres de la structure en zinc blend des éléments binaires utilisés

Paramètres	GaN	InN
$a_{lc}$ (Å) à T = 300K	4.50	4.98
$E_g^{\Gamma}$ (eV)	3.299	1.94
$\alpha(\Gamma)$ (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
$Ep$ (eV)	25.0	25.0
$F$	-0.92	-0.92
VBO (eV)	-2.64	-2.38
$a_c$ (eV)	-2.2	-1.85
$a_{\gamma}$ (eV)	-52	-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.2 - Paramètres de la structure en zinc blend des éléments binaires GaN et InN

## Références bibliographiques

- [1] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/chiffres-cles-production-d-energie>
- [2] Marie-Antoinette Mélières *Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE)* [melieres@lgge.obs.ujf-grenoble.fr](mailto:melieres@lgge.obs.ujf-grenoble.fr) et Christelle Girier-Dufournier
- [3] DIRECTIVE 2001/77/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27/09/2001 relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité
- [4] Bouraoui, A., "Elaboration et Caractérisation des Couches minces CuInSe<sub>2</sub> par Electrodeposition", Université Mentouri, Constantin (08/10/2009).
- [5] J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, W. Shan, J. W. Ager III, E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, W. K. Metzger, and Sarah Kurtz. Superior radiation resistance of In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>N alloys : Full-solar-spectrum photovoltaic material system. *Journal of Applied Physics*, 94(10) :6477–6482, 2003.
- [6] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil>
- [7] Bouden Abdmalek « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008
- [8] S. ASTIER, "Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule", Ed. Techniques de l'ingénieur D3935, 2008
- [9] A. Labouret, M. Viloz, "Energie solaire photovoltaïque - 4ème Edition", Ed. Dunod 2009
- [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] A. Labouret, M. Viloz, "Energie solaire photovoltaïque - 4ème Edition", Ed. Dunod 2009
- [12] A.E. Becquerel, "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires", *Comptes Rendus de L'Académie des Sciences* 9, 1839, 561
- [13] W.G. Adams, R.E. Day, "The Action of Light on Selenium", *Proc. Royal Society (London)* A25, 1877, 113
- [14] CE. Fritts, "On a New Form of Selenium Photocell", *Am. J. Sei.* 26,1883,465
- [15] H. Hertz, "On the effect of ultraviolet light upon the electrical discharge", *Annalen der Physik* 31,1887, 983
- [16] A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik* 17, 1905, 132

- [17] R.S. Ohl, "Light-Sensitive Electric Device", U.S. Patent No. 2, 402, 622 ; and "Light-Sensitive Device including Silicon", U.S. Patent No. 2, 443, 542 ; 1941
- [18] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, "A New Silicon P-N Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", J. Appl. Phys. 25,1954,676
- [19] R. Easton, M. Votaw, "Vanguard IIGY Satellite (1958 Beta)", Rev. Sei. Instrum. 30,1959,70
- [20] Yoan BOURLIER, « Etude de films minces de Cu InS<sub>2</sub>, CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>S<sub>2</sub> et Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>, élaborés par voie sol-gel, destinées aux applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Ecole doctorale des sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement, discipline : Optique et lasers – Physico-chimie – Atmosphère, Mai 2013.
- [21] N.W. Ashcroft, N. D. Mermin, "Physique des solides", EDP Sciences 2002
- [22] Singh, j., "Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures". University of Michigan, Cambridge University Press, (2003).
- [23] Fatima ABDO, croissance des couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour application photovoltaïques. Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.
- [24] Soga, T., "Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion", Elsevier, . Nagoya, Japan,(First Edition 2006).
- [25] S. ASTIER, "Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule", Ed. Techniques de l'ingénieur D3935, 2008
- [26] W. Shockley, H.J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", J. Appl. Phys. 32,1961,510
- [27] Rachid BESTAM, « Modélisation et simulation d'une structure à base de semi-conducteur III-V pour le photovoltaïque », mémoire de Magister, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département d'électronique, UNIVERSITE SAAD DAHLED DE BLIDA, Septembre 2011
- [28] Lelievre, J.-F., "Elaboration de SiNx:H par PECVD: Optimisation des Propriétés Optiques, Passivantes et Structurales pour Applications Photovoltaïques", Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (24 avril 2007).
- [29] Abdo, F., "Croissance des Couches minces de Silicium par Epitaxie en Phase Liquide a basse Temperature pour Applications Photovoltaïques", Institut National des Science Appliquées de Lyon, (8 mars 2007).
- [30] Damon-Lacoste, J., "Vers une Ingénierie de Bandes des Cellules Solaires à Hétérojonctions a-Si:h/c-Si. Role Prépondérant de l'Hydrogène", Ecole Polytechnique, Paris, (05/07/2007).
- [31] Silvestre, I. C., "Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice" Universidad Politecnica de Catalunia, barcelona, john wiley & sons, ltd, spain, (2002).

- [32] J. Czochralski, "Ein neues Verfahren zur Messung des. Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle", Z. Physik Chem. 92, 1918, 219
- [33] University of New South Wales, "Highest Silicon Solar Cell Efficiency Ever Reached", Science Daily, 24 Oct. 2008
- [34] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green, F. Ferrazza, "Novel 19.8% efficient "honeycomb" textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells", Appl. Phys. Lett. 73,1998, 1991
- [35] O. Schultz, S.W. Glunz, G.P. Willeke, "Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency", Prog. Photovolt: Res. Appl. 12,2004, 553
- [36] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 40)", Prog. Photovolt: Res. Appl. 20, 2012,606
- [37] A.W. Bett, F. Dimroth, W. Guter, R. Hoheisen, E. Oliva, S.P. Philipps, J. Schöne, G. Siefer, M. Steiner, A. Wekkeli, E. Welsler, M. Meusel, W. Köstler, G. Strobl, "Highest efficiency multi-junction solar cell for terrestrial and space applications", Proc. 24th European PVSEC, Hamburg, 2009,1
- [38] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 39)", Prog. Photovolt: Res. Appl. 20,2012,12
- [39] Garnier, J., "Elaboration de Couches Minces d'Oxydes Transparents et Conducteurs par Spray CVD assiste par Radiation Infrarouge pour applications Photovoltaïques ",Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris,(2 décembre 2009).
- [40] W. Spear, P. LeComber, "Substitutional doping of amorphous silicium", Solid State Comm. 17,1975, 1193
- [41] A. Ricaud, "Modules Photovoltaïques, Filières technologiques", Techniques de l'Ingénieur D3940,2005
- [42] D.L. Staebler, C.R. Wronski, "Reversible Conductivity Changes in Discharge-Produced Amorphous Si" Appl. Phys. Lett. 31,1977,292
- [43] S. Benagli, D. Borrello, E. Vallat-Sauvain, J. Meier, U. Kroll, J. Hötzel, J. Spitznagel, J. Steinhauser, L. Castens, Y. Djeridane, "High-efficiency amorphous silicon devices on LPCVD-ZNO TCO prepared in industrial KAI-M R&D reactor", Proc. 24th European PVSEC, Hamburg, 2009,2293
- [44] J.H. Petermann, D. Zielke, J. Schmidt, F. Haase, E.G. Rojas, R. Brendel, "19%-efficient and 43 um-thick crystalline Si solar cell from layer transfer using porous silicon", Prog. Photovolt: Res. Appl. 20, 2012, 1
- [45] A. Banerjee, T. Su, D. Beglau, G. Pietka, F. Liu, G.D. Maggio, S. Almutawalli, B. Yan, G. Yue, J. Yang, S. Guha, "High efficiency, multi-junction nc-Si:h based solar cells at high deposition rate", Proc. 37th IEEE PVSC, Seattle, 2011, 3583
- [46] D. Jenny, R. Bube, "Semiconducting Cadmium Telluride", Phys. Rev. 96,1954,1190

- [47] F.A. Kroger, D. Nobel, "Preparation and Electrical Properties of CdTe Single Crystals", *J. Electronics* 1, 1955,190
- [48] R.S. Muller, R. Zuleeg, "Vapor-Deposited, Thin-Film Heterojunction Diodes", *J. Appl. Phys.* 35, 1964, 1550
- [49] E. Adirovich, Y. Yuabov, D. Yugadaev, *Sov. Phys. Semicond.* 3,1969,61
- [50] Y.S. Tyan, E.A. Perez-Albuerne, "Efficient Thin Film CdS/CdTe Solar Cells", *Proc. 16th IEEE PVSC*, New York, 1982, 794
- [51] X. Wu, J.C. Keane, R.G. Dhere, C. DeHart, A. Duda, T.A. Gessert, S. Asher, D.H. Levi, P. Sheldon, "16.5%-efficient CdS/CdTe polycrystalline thin-film solar cell", *Proc. 17th European PVSEC*, Munich, 2001, 995
- [52] Courtesy: First Solar Inc. "First Solar Sets World Record for CdTe Solar PV Efficiency 17.3 Percent Efficiency Confirmed by NREL" *First solar*, July 26, 2011
- [53] "Relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques" *Directive 2002/95/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 Janvier 2003*
- [54] Les technologies de fabrication des modules. *Photovoltaïque.info*. [Online] 03 2011. [Cited: 12 21, 2011.] <http://www.photovoltaïque.info/Les-differentes-technologies.html>.
- [55] **ADEME**. Energies et matières renouvelables - Solaire photovoltaïque. *Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie*. [Online] 02 01, 2011. [Cited: 01 12, 2012.] <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13924>.
- [56] Foundation, W. (2010, octobre 12). "Fichier: Mendeleïev.jpg". Consulté le mai 15, 2011, sur [www.wikipedia.org: www.wikipedia.org/wiki/fichier:Mendeleïev.jpg](http://www.wikipedia.org/wiki/fichier:Mendeleïev.jpg)
- [57] Wu, J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009, Vol. 106, 011101.
- [58] Pereira, S., et al. Compositional dependence of the strain-free optical band gap in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers. *Applied Physics Letters*. 2001, Vol. 78, 2137.
- [59] Bechstedt, F., et al. Energy gap and optical properties of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . *Physica Status Solidi a*. 2003, Vol. 195, 628.
- [60] Ruterana, P., Albrecht, M. and Neugebauer, J. *Nitride Semiconductors: Handbook on Materials and devices*. s.l. : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003. 978-3527403875.
- [61] Wu, J., et al. Small band gap bowing in  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$  alloys. *Applied Physics Letters*. 2002, Vol. 80, 4741.
- [62] Yam, F.K. and Hassan, Z. InGaN : An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms. *Superlattices and Microstructures*. 2008, Vol. 43, 1.

- [63] Bremner, S.P., Levy, M.Y. and Honsberg, C.B. Analysis of Tandem Solar Cell Efficiencies Under AM1.5G Spectrum Using a Rapid Flux Calculation Method. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*. 2008, Vol. 16, 225.
- [64] Vanessa Gorge, « Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V », Thèse de doctorat, Ecole doctorale : Sciences et technologies de l'information des télécommunications et des systèmes, laboratoire de génie électrique de Paris, Discipline : Physique. Mai 2012.
- [65] Bernardini, F. Fiorentini, V. Vanderbilt : Spontaneous polarization and piezo electric constants of III-V nitrides. *Physical Review*, Vol. 56, 1997.
- [66] J. Hedger : Properties of Group III Nitrides, Institution of Electrical Engineers, London, 1994.
- [67] L. Liu, J.H Edgar: Substrates for gallium nitride epitaxial, *Materials Science and Engineering*, Vol. 37, 61, 2002.
- [68] Hector Cotal, C. F., "III-V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics". *Energy & Environmental Science* , 174–192, (september 2008).
- [69] Neudeck, W. R. F., "Advanced Semiconductor Fundamentals", Prentice Hall, New Jersey, (Secod Edition).
- [70] F.K Yam, Z. Hassan : InGaN An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms , *Super lattices and Microstructures* , Vol. 43, 2008.
- [71] Cláudio de Carvalho, L. Schleife : Influence of exchange and correlation on structural and electronic properties of AlN, GaN, and InN poly types , *Physical Review* Vol. 84, 2011.
- [72] Renard, C., "Hétérostructures Antimoniures/Arséniures pour les Applications Optoélectroniques dans le Moyen Infrarouge ", université paris VII, (30 septembre 2005).
- [73] K. Koksal, B. G., "Critical Layer Thickness of GaIn(n)As(sb) qws on GaAs and InP Substrates for (001) and (111) Orientations". *the European Physical Journal* ( 5 may 2009), 211–218.
- [74] Ghione, G., "Semiconductor Devices for High-Speed Optoelectronics", Politecnico Ditorino, Italy, Cambridge University Press, (2009).
- [75] MAKHTOUR Djamel, GHARBI Samir, « Etude et simulation d'une structure à base de InGaN pour le photovoltaïque » mémoire de master Electronique option Micro-électronique, Université Saad Dahleb Blida-2013
- [76] Bourouis Imen : « étude et simulation d'une structure a base de GaInNaS/GaAs pour le photovoltaïque », université de Blida , 2011.