

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique

Spécialité Micro-électronique

présenté par

ASSELAH Rabah

&

TAIBI Ismail

---

## Simulation numérique et optimisation des cellules solaires à base de InGaN

---

Proposé par :

M.NACER Said & M<sup>elle</sup> BENYAHYA Nawal

Année Universitaire 2019-2020

## Remerciements

---

Nos remerciements vont, en premier lieu, à Allah le tout puissant qui nous a permis d'achever ce travail par sa miséricorde.

Notre gratitude vont à notre encadreur monsieur le professeur NACER Said, chef d'option microélectronique département d'électronique USDB1, pour avoir proposé et dirigé ce travail, Son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils, tout au long de ce mémoire, nous ont permis d'acquérir une grande confiance et de mener à terme ce travail.

Je voudrais également remercier notre co-encadreur Dr.BENYAHYA Nawal, pour son aide et sa disponibilité à répondre à nos questions, et aussi pour sa coopération avec nous durant ce travail.

Nous souhaiterons ensuite remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

N'oublions pas nos parents et nos familles, pour leurs prières et leurs encouragements.

Enfin nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

*Dédicace:*

*Je dédie ce travail*

*À mes parents*

*Aucun mot ne saurait témoigner de l'étendue*

*Des sentiments que j'éprouve à leur égard*

*Je souhaite que Dieu leur octroie une longue vie*

*À mes frères et mes sœurs*

*Pour leur encouragement et leur affection*

*À tous mes collègues et ami(e)s*

*À eux tous, je souhaite un avenir plein de joie, de  
bonheur et de succès.*

---

## ملخص:

الطاقة الكهروضوئية هي تحويل مباشر للطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية. يتكون هذا العمل من دراسة ومحاكاة من أجل تحسين خلية شمسية بناءً على مادة نتريد غاليوم الأنديموم والهدف هو دراسة تأثير السماكة والتنشيط على الخصائص الكهروضوئية: جهد الدائرة المفتوحة, عامل الشكل, كثافة تيار الدائرة, والكفاءة او المردود  
تم إجراء هذه المحاكاة باستخدام برنامج سكايس 1 د .

كلمات المفاتيح: شبه ناقل , أنديموم , خلية شمسية

---

## Résumé :

L'énergie photovoltaïque est une conversion directe d'énergie lumineuse en énergie électrique par des cellules solaires.

Ce travail consiste à étudier et simuler, afin d'optimiser, une cellule solaire à base du matériau InGaN. L'objectif est l'étude de l'effet des épaisseurs et des dopages sur les caractéristiques photovoltaïques : la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF, la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , et le rendement  $\eta$ .

Cette simulation a été faite à l'aide du logiciel SCAPS 1D.

**Mots clés :** cellule solaire, InGaN, semi-conducteur.

---

## Abstract :

Photovoltaic energy is a direct conversion of light energy into energy electric by solar cells.

This work consists in studying and simulating in order to optimize a solar cell based on the InGaN material, the objective is the study of the effect of thicknesses and doping on the photovoltaic characteristics : the voltage of open circuit  $V_{co}$ , the form factor FF, the density of the short circuit current  $J_{cc}$ , and the efficiency  $\eta$ .

This simulation was done using SCAPS 1D software.

**Keywords :** solar cell , InGaN , semi conductor

---

## Listes des acronymes et abréviations

$\eta$  : rendement de la cellule.

P : puissance de la photopile.

W : épaisseur.

$I_{opt}$  : courant optimal.

$V_{opt}$  : tension optimale.

$I_{mpp}$  : courant au point de puissance maximale.

$V_{mpp}$  : tension au point de puissance maximale.

$P_{in}$  : puissance incidente des photons.

$P_m$  : puissance maximale.

I : intensité de courant mesurée aux bornes de la cellule.

$I_{cc}$  : courant de court-circuit.

$I_m$  : courant maximal.

$I_{ph}$  : Photo-courant.

$I_s$  : courant de saturation.

$V_{co}$  : tension de circuit ouvert.

$V_m$  : tension maximale.

V : tension mesurée aux bornes de la cellule.

k : constante de Boltzman.

q : charge de l'électron.

FF : facteur de forme.

EQE : rendement quantique externe.

QE : rendement quantique.

IQE : rendement quantique interne.

E : énergie du photon.

h : constante de Planck.

c : vitesse de la lumière.

$\lambda$  : longueur d'onde.

SR( $\lambda$ ) : réponse spectrale.

$\mu$  : mobilité des charges.

$\mu_e$  : mobilité des électrons.

$\mu_h$  : mobilité des trous.

$E_g$  : énergie de gap.

$D$  : coefficient de diffusion des porteurs.

$\alpha$  : coefficient d'absorption.

$R(\lambda)$  : coefficient de réflexion

$d$  : épaisseur d'une couche mince.

$E_{ph}$  : énergie du photon.

$\mu$  : mobilité des charges.

$\alpha(\lambda)$  : coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde.

$T$  : température effective de la cellule.

$R_s$  : résistance série.

$\epsilon_0, \epsilon_r$  : permittivité du vide, permittivité relative respectivement.

$S_n, S_p$  : vitesse de recombinaison des électrons et des trous à la surface respectivement

$N_A$  : densité des accepteurs.

$N_D$  : densité des donneurs.

$N_c$  : densité effective des états dans la bande de conduction.

$N_v$  : densité effective des états dans la bande de valence.

$\chi$  : affinité électronique de semi-conducteur.

$n$  : la densité des électrons.

$p$  : la densité des trous.

$n_i$  : la densité des porteurs intrinsèque du semi-conducteur à une température donnée.

$J$  : densité du courant.

$J_s$  : densité du courant de saturation.

$\Delta_{n,p}$  : densité des porteurs générés.

$\tau_{n,p}$  : durée de vie de ces porteurs.

$\vec{j}_n$  : Le vecteur de la densité des courants des électrons.

$\vec{j}_p$  : Le vecteur de la densité des courants de trous.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques</b> .....	3
I.1. Introduction .....	3
I.2. Historique de l'effet photovoltaïque .....	3
I.3. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	5
I.3.1. L'interaction photon/semi-conducteur .....	5
I.3.2. Principe de l'effet photovoltaïque .....	7
I.3.3 Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs .....	9
A. La recombinaison .....	9
B. La génération .....	11
I.4. Les différents filières du photovoltaïque.....	11
I.4.1. Le silicium cristallin.....	11
I.4.2. La filière à base des matériaux III-V.....	12
I.4.3. Les cellules photovoltaïques organiques.....	12
I.4.4. La filière des matériaux nitrures III-N : .....	13
I.5. Structure des cellules photovoltaïques .....	13
I.5.1. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque .....	13
I.6. Définition des paramètres photovoltaïques .....	15
I.6.1. Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	16
I.6.2. Le rendement de conversion $\eta$ .....	16
I.6.3. Tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	17
I.6.4. Facteur de forme FF .....	18
I.6.5. La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque .....	19
I.6.6. Le rendement quantique externe EQE .....	19
I.7. Avantages et inconvénients des cellules solaires .....	20
I.7.1. Avantages.....	20
I.7.2. Inconvénients.....	20
I.8. Conclusion .....	21
<b>Chapitre II : Propriétés physiques et optiques des nitrures III-N</b> .....	22
II.1. INTRODUCTION .....	22
II.1.2. Historique .....	23

II.2. LES COMPOSES BINAIRES GaN, InN ET AlN.....	23
II.2.1. Propriétés cristallographiques.....	23
II.2.2. Structure de bandes.....	25
II.3. Le composé ternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ .....	25
II.3.1. Croissance des ternaires $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ .....	26
II.3.2. Evolution des propriétés physiques de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	27
II.3.2.1. Energie de la bande interdite.....	27
II.3.2.2. Affinité électronique.....	27
II.3.2.3. Mobilité des électrons et trous.....	28
II.3.2.4. Masses des électrons et des trous.....	28
II.3.2.5. Indice de réfraction.....	28
II.3.2.6. Constante diélectrique (ou permittivité électrique).....	29
II.3.2.7 Coefficient d'absorption.....	29
II.4. CONCLUSION.....	30
<b>Chapitre III : Résultats de simulation et discussion.....</b>	<b>31</b>
III.1 Introduction.....	31
III.2 Présentation du logiciel SCAPS.....	31
III.3 Résultats de la simulation numérique et interprétations.....	33
III.3.1. Description de la structure.....	34
III.3.2. Paramètres de la simulation.....	34
III.4. résultats de la simulation.....	35
III.4.1. Effet de l'épaisseur du front sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale.....	35
a. Sur les grandeurs photovoltaïques.....	35
b. sur la réponse spectrale.....	37
III.4.2. Effet du dopage du front sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale.....	38
a. Sur les grandeurs photovoltaïques.....	38
b. Sur la réponse spectrale.....	39
III.4.3. Effet de l'épaisseur de la base sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale.....	40
a. Sur les grandeurs photovoltaïques.....	40
b. Sur la réponse spectrale.....	41
III.4.4 Effet du dopage de la base sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale.....	42



a. Sur les grandeurs photovoltaïques.....	42
b. Sur la réponse spectrale.....	43
III.4.5. Effet du coefficient stœchiométrique sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale .....	44
a. sur les grandeurs photovoltaïques.....	44
b. sur la réponse spectrale.....	46
III.4.6. Caractéristique J(V) .....	47
III.5. Conclusion .....	49
Conclusion générale .....	50
Bibliographie .....	52

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.....	
a) Semi- conducteur à gap direct, b) Semiconducteur à un gap indirect.....	5
<b>Figure I.2</b> Variation du coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde . ....	6
<b>Figure I.3</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	7
<b>Figure I.4</b> Le principe de l'effet photovoltaïque dans les cellules solaires. ....	8
<b>Figure I.5</b> Types de recombinaisons.. ....	10
<b>Figure I.6.</b> Cellule solaire organique .....	13
<b>Figure I.7.</b> Composition d'une cellule photovoltaïque .....	14
<b>Figure I.8.</b> Caractéristique d'une cellule photovoltaïque .....	16
<b>Figure I.9.</b> Différents régimes selon la puissance d'éclairement.....	18
<b>Figure II.1.</b> Energie de la bande interdite de plusieurs familles de semi-conducteurs en fonction de la longueur des liaisons dans la maille. ....	22
<b>Figure II.2.</b> Structures cristallines des nitrures d'élément III. ....	25
<b>Figure II.3.</b> Structure de bandes du GaN(a), InN(b) et AlN (c).....	25
<b>Figure II.4:</b> Croissance par l'épitaxie par jets moléculaires.....	26
<b>Figure II.5</b> Evolution de largeur de la bande interdite en fonction de x .....	27
<b>Figure II.6</b> Evolution du Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde ...	30
<b>Figure III.1.</b> Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal. ....	34
<b>Figure III.2</b> : Structure de la cellule à simuler sous SCAPS. ....	34
<b>Figure III.3</b> Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF et $\eta$ ) en fonction de l'épaisseur de front pour la cellule $In_{0.72}Ga_{0.28}N$ .....	36
<b>Figure III.4.</b> Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différentes épaisseurs du front pour la cellule $In_{0.72}Ga_{0.28}N$ . ....	37
<b>Figure III.5</b> : Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF et $\eta$ ) en fonction de dopage de front pour la cellule $In_{0.72}Ga_{0.28}N$ . ....	38
<b>Figure III.6.</b> Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde pour différents dopage du front pour la cellule $In_{0.72}Ga_{0.28}N$ . ....	39
<b>Figure III.7.</b> Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF et $\eta$ ) en fonction de l'épaisseur de la base $In_{0.72}Ga_{0.28}N$ .....	40

<b>Figure III.8</b> Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différentes épaisseurs de la base $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .	41
<b>Figure III.9</b> Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF et $\eta$ ) en fonction de dopage du base $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .	42
<b>Figure III.10.</b> Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différents dopage de la base $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .	43
<b>Figure III.11 :</b> Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF et $\eta$ ) en fonction de la fraction molaire d'indium $x$ .	45
<b>Figure III.12.</b> Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différents coefficients stœchiométriques $x$ .	46
<b>Figure III.13.</b> Caractéristique J-V de la cellule solaire simulée à base de $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .	47
<b>Figure III.14.</b> Caractéristique J-V de la cellule solaire optimisée à base d' $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ .	48

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1.</b> Paramètres de maille du GaN, de l'InN et de l'AlN [14,22].	24
<b>Tableau III.1.</b> Paramètres de simulation à 300 K pour une concentration d'indium de 72% d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .	35
<b>Tableaux III.2.</b> Epaisseurs et dopages de la structure étudiée.	35

# Introduction générale

---

De nos jours les besoins énergétiques sont de plus en plus importants, le développement de sources d'énergie durables et respectueuses de l'environnement est devenu une nécessité. Une des solutions consiste à développer des sources d'énergie renouvelable bon marché. Parmi elles, l'énergie photovoltaïque qui consiste en la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique, c'est l'une des énergies les plus prometteuses et elle fait l'objet d'intenses recherches qui ont permis d'améliorer les performances et les tailles des cellules photovoltaïques.

La connaissance détaillée de la structure des cellules solaires méritera toute notre attention, notre étude porte sur la simulation des grandeurs photovoltaïques tels que le courant de court-circuit  $I_{CC}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ , le rendement de conversion  $\eta$  et le facteur de forme FF moyennant le logiciel SCAPS.

Les matériaux, les nitrurés III-V (GaN, AlN, InN) sont des semiconducteurs à large bande interdite, très intéressants pour les applications en optoélectronique et microélectronique. En général ils présentent un gap direct ajustable, allant de 0.7 eV à 6.2 eV, d'où leur utilisation dans le domaine photovoltaïque, en raison de leurs rendements élevés et leur faible dégradation face aux conditions hostiles d'utilisation. Parmi ces alliages nitrurés, on s'intéresse à l'InGaN, un matériau disposant d'un grand potentiel.

L'optimisation des paramètres physiques (dopage, épaisseur) des différentes couches mises en jeu dans la réalisation des cellules permettra d'aboutir au meilleur rendement qui pourra être délivré par les cellules à base de matériaux nitrurés.

Ce mémoire comprend trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les cellules solaires et leurs principes de fonctionnement, nous définissons également les quatre paramètres de sortie caractérisant la conversion photovoltaïque.
- Dans le deuxième chapitre nous donnerons un aperçu sur les nitrures de l'élément III. Les propriétés physiques des composés binaires GaN, InN et AlN ainsi que le composé ternaire  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , leurs technologies seront développées.
- Le troisième chapitre, sera consacré à la simulation numérique de la caractéristique directe  $I(V)$  de la jonction PN sous les conditions d'éclairement standard AM1.5 à base de matériaux nitruré à savoir l'InGaN. Ces caractéristiques, nous permettront l'extraction et l'optimisation des grandeurs photovoltaïques en fonction des paramètres technologiques fondamentaux qui sont : le dopage, l'épaisseur aux contacts de chaque région de la cellule (front et base).

Nous achèverons cette étude par une conclusion générale montrant les possibilités et les limites de cette première optimisation

# Chapitre I Généralités sur les cellules photovoltaïques

---

## I.1. Introduction

Nous avons la chance d'être situé près du soleil, une source quasiment inépuisable d'énergie, qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge, les déserts de notre planète reçoivent en six heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année [1].

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, c'est une source sûre dont nous devons user à bon escient. Nous sommes à une époque où la demande en énergie ne cesse de croître et où les ressources énergétiques telles que le pétrole et le gaz diminuent. La cellule photovoltaïque a été inventée il y a 170 ans, mais malgré ceci les centrales photovoltaïques ne sont pas encore en nombre important, l'énergie solaire représente 0.04% de l'énergie renouvelable mondiale.

## I.2. Historique de l'effet photovoltaïque

- ✓ En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide.
- ✓ En 1873 Willoughby Smith découvre la photoconductivité du sélénium, et en 1877 W.G. Adams et R.E. Day développent une jonction solide à base de sélénium dont le rendement était de l'ordre de 1%. Mais la recherche n'apporte plus rien pendant longtemps.
- ✓ En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

- ✓ En 1940, Adler, reprenant une idée émise par Garrison en 1923, étudia la tension de circuit ouvert d'une pile et sa variation en fonction de l'intensité d'illumination [2], le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.
- ✓ R-S. Ohi décrivit, en 1941, la première réalisation d'une jonction P-N dans le silicium, à effet photovoltaïque.
- ✓ En 1955 des chercheurs des Bell Téléphone Laboratoires (États-Unis), C. S. Fuller, G.L. Pearson et M.B. Prince, annoncèrent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique (c'est-à-dire le rapport de l'énergie électrique produite sur l'énergie rayonnée incidente) atteint 6%, marquant ainsi véritablement la naissance de la photopile solaire.
- ✓ Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque [1].
- ✓ Quelques années plus tard, en 1973-1974, en pleine crise pétrolière, on se précipite sur toutes les possibilités de remplacer le pétrole et les énergies fossiles.
- ✓ Parmi les énergies renouvelables envisagées, la production directe d'électricité par l'effet photovoltaïque est en bonne place. On disposait, en effet, de photopiles à base de silicium monocristallin d'assez bon rendement, héritées des applications spatiales, mais à un prix relativement élevé (il fallait compter 500 à 1000 francs pour produire 1 Watt sous le soleil de midi, ce qu'on appelle 1 Watt-crête) et d'une productivité encore limitée. Il fallait donc fabriquer massivement des photopiles fiables à bon marché et de rendement acceptable. Le pari est gagné, les performances augmentent en flèche 1 Mégawatt-crête dès 1978 et 20 en 1985, pour atteindre 50 en 1992, 50 millions de fois mieux en 20 ans. De plus, l'essor de la microélectronique et des ordinateurs, qui utilisent également le silicium dans la fabrication des microprocesseurs (puce), contribue à la diminution du coût de ce matériau (d'un facteur 10 tous les six ou sept ans).

## I.3. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.3.1. L'interaction photon/semi-conducteur

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure I.1 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap.

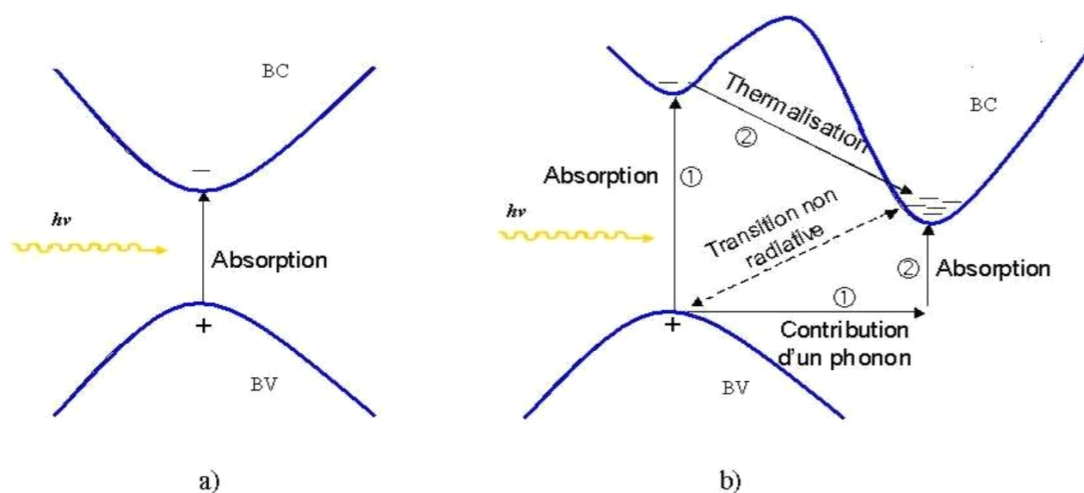
Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure I.1 (a)), ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, très utilisés en optoélectronique.

Dans le cas du silicium, le gap est indirect [3] : Les transitions électroniques entre les extremas des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du 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 s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure I.1 (b)).

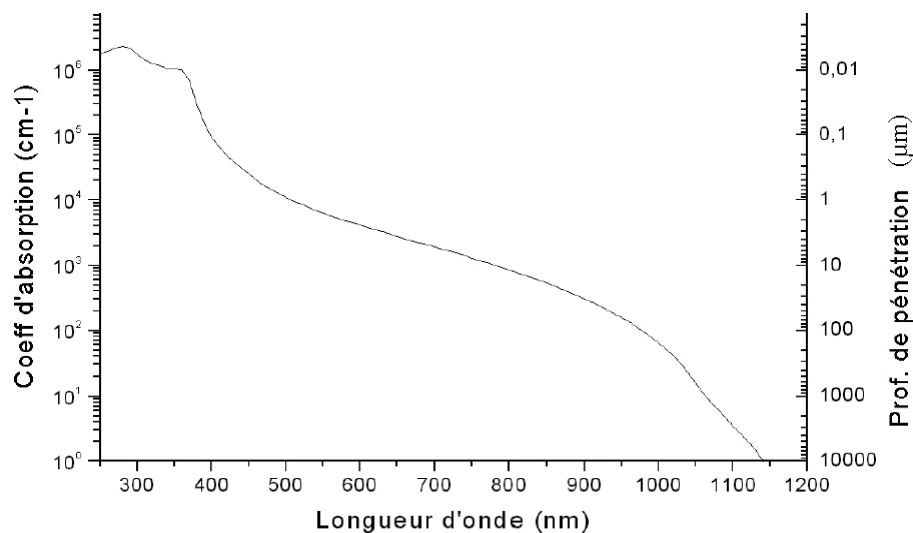
Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm).



**Figure I.1** Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. a) Semi-conducteur à gap direct, b) Semi-conducteur à un gap indirect [3].



L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure I.2 illustre la variation du coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé [3].



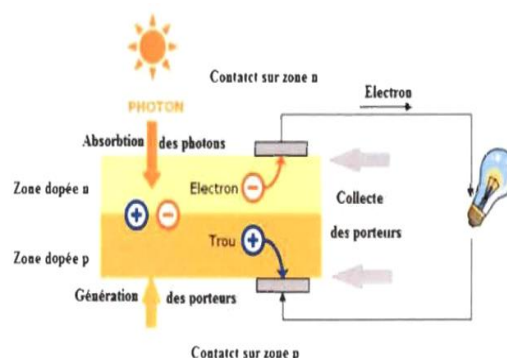
**Figure I.2** Variation du coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [3].

L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photo

généérés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur [4].

### I.3.2. Principe de l'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité (figure I.3) par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [4].



**Figure I.3** : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [4].

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- ✓ L'absorption de photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- ✓ La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- ✓ La collection de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué :

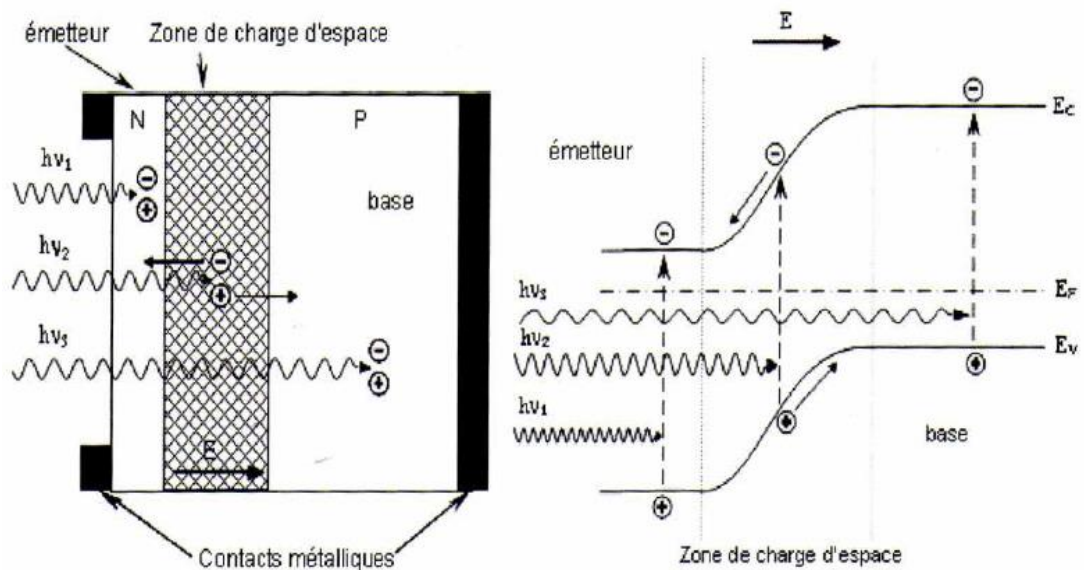
- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- D'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible [5].

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant, d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trous créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN.

D'autres structures, comme l'hétérojonction et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le principe de l'effet photovoltaïque dans les cellules solaires est illustré sur la figure I.4.



**Figure I.4** Le principe de l'effet photovoltaïque dans les cellules solaires.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) ou ils seront majoritaires. on aura un photo-courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P, on aura un photo-courant de génération [5].

### I.3.3 Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs

#### A. La recombinaison

La recombinaison est à l'opposé de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires  $\tau_n$  capable d'être mesurée, celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel une paire électron-trou générée se recombine, la valeur de ce paramètre peut être déterminée, permettant de définir les taux de recombinaison  $R_n$  pour les électrons,  $R_p$  pour les trous par :

$$R_{n,p} = (\Delta_{n,p}) / (\tau_{n,p})$$

Avec :

$\Delta$  : Densité des porteurs générés ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$\tau$  : Durée de vie de ces porteurs ( $\mu\text{s}$ ).

L'interprétation de la durée de vie n'est pas simple car il existe différents mécanismes de recombinaison intervenant simultanément en surface et en volume d'un échantillon, on définit donc une durée de vie effective, qui tient compte de l'ensemble de ces mécanismes. En général, la recombinaison peut être caractérisée comme suit :

- Recombinaison directe (de bande à bande).
- Recombinaison indirecte (de bande aux impuretés, avec l'aide de piège).
- Recombinaison Auger.
- Recombinaison de surface.

Ces processus sont présentés dans la figure (I.5).

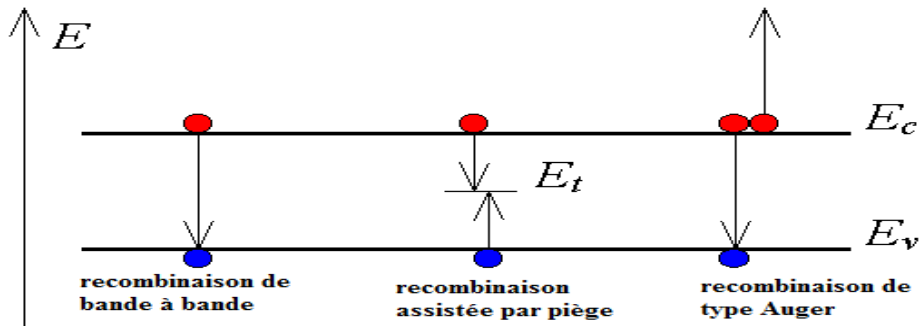


Figure I.5 Types de recombinaisons.[6].

❖ **La recombinaison bande à bande (directe)**

La recombinaison directe est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaison se produit dans les matériaux directs tels que le GaAs (Arséniure de Gallium). Étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire, le taux de recombinaison est le plus élevé. La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courte.

❖ **La recombinaison par pièges (indirecte)**

Recombinaison en volume de type RSH, c'est une recombinaison assistée par un piège, se produit lorsqu'un électron tombe dans un «piège», ou un niveau d'énergie au sein de la bande interdite résultant d'un défaut structural ou impureté. Une fois que le piège est rempli, il ne peut accepter un autre électron. Les électrons occupant le piège, dans un deuxième temps, s'installent dans des états de la bande de valence vides, complétant ainsi le processus de recombinaison. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou l'anéantissement de l'électron et le trou, qui se rencontrent dans le piège.

❖ **La recombinaison Auger:**

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Cette recombinaison nécessite trois particules : au moins un trou et un électron et la troisième peut être un trou ou un électron. Ce type de recombinaison est similaire à la recombinaison de bande à bande, mais la troisième particule reçoit l'énergie à partir de la recombinaison [6].

## B. La génération

La génération peut être considérée comme le mécanisme inverse de la recombinaison, la génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé. La génération se produit quand il y a un déficit de la concentration en porteurs comparée à la concentration d'équilibre.

- Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semi-conducteur génèrent des paires électron-trou
- On peut faire une analogie entre les deux processus génération et recombinaison, autrement dit, les trois mécanismes de la recombinaison peuvent être inversés pour créer des porteurs. Il s'agit de la génération bande à bande, intrinsèque, de la génération extrinsèque par l'intermédiaire du niveau de dopage ou bien le piégeage, et la génération Auger. La génération bande à bande peut se produire quand un électron est sorti directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière, photo-génération. Des centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin d'autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de la génération bande à bande. La génération Auger se produit souvent quand un champ électrique est appliqué

## I.4. Les différents filières du photovoltaïque

Il existe quatre principales filières de matériaux pour les applications photovoltaïques, à savoir : le silicium, les matériaux III-V, les matériaux nitrurés III-N, et les matériaux organiques.

### I.4.1. Le silicium cristallin

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base [6]. Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages :

- ✓ Il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable.
- ✓ Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V.
- ✓ Il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- ✓ Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore).

Son seul véritable inconvénient est son gap indirect de 1,1eV. Ceci entraîne une absorption de rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct.

### **I.4.2. La filière à base des matériaux III-V**

Les semi-conducteurs de la famille des matériaux III-V sont constitués d'un élément de la colonne IIIA et d'un autre de la colonne VA du tableau périodique de Mendeleïev (tableau 1.1) qui regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et en bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique).

En combinant les éléments III et V, il est possible de former des composés binaires (GaN, GaAs, ...), ternaires ( $Al_xGa_{1-x}N$ , GaInAs, ...) et quaternaires (AlGaInN, GaInAsP, ...) dont les propriétés physiques, électriques et optiques sont diverses et peuvent être ajustées avec le choix des éléments et des compositions. Parmi eux, les semi-conducteurs nitrurés tels que le nitrure de gallium (GaN), le nitrure d'aluminium (AlN) et le nitrure d'indium (InN) [5].

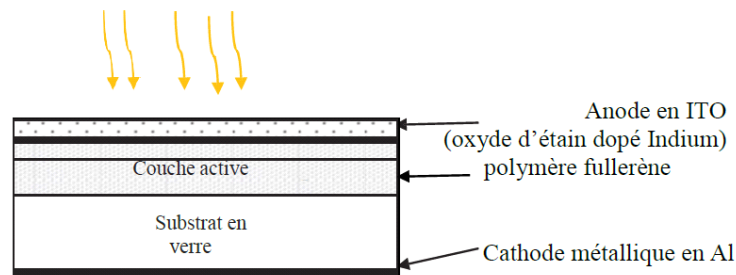
Il convient de distinguer deux types de cellules incorporant l'arséniure de gallium. D'un côté, les cellules de « type III-V » dont le composant principal est l'arséniure de gallium (sous sa forme mono ou polycristalline). Ces cellules offrent de hauts rendements de photoconversion (de l'ordre de 18 à 25%). De l'autre côté, les cellules multijonctions (de type GaInP/GaAs/Ge) qui constituent les cellules les plus efficaces. Ces dispositifs à multijonctions développent des rendements de l'ordre de 32% mais présentent un coût très élevé qui limite leur utilisation à certains domaines comme l'aéronautique. La société Spectrolab a obtenu fin 2006, une efficacité de 40,7% pour un dispositif multijonctions (avec concentrateur) à base d'arséniure de gallium.

### **I.4.3. Les cellules photovoltaïques organiques**

Une autre filière est en train de faire son apparition mais ne s'est pas encore imposée : les cellules organiques, celles-ci utilisent des matériaux organiques, tels que les polymères. La recherche et développement de cellules solaires à base de matériaux organiques ou de polymères est motivée par les avantages que présentent ces matériaux : faible coût, matière première illimitée, facilité de mise en œuvre, technologies basse température, grandes surfaces, dispositifs souples. Leurs rendement est de 5% [6]. La structure de la cellule organique est présentée dans la (figure I.6).

La couche active est composée de deux matériaux l'un donneur d'électron comme une chaîne de polymère et l'autre accepteur d'électron comme le fullerène. Quand on éclaire la cellule on a un transfert d'électrons du polymère à la molécule de fullerène. L'avantage de ces cellules

c'est qu'on peut réaliser des grandes surfaces, elles sont légères flexibles et leur coût de fabrication est faible.



**Figure I.6.** Cellule solaire organique [7].

#### **I.4.4. La filière des matériaux nitrures III-N :**

Les nitrures d'éléments III, GaN, AlN, InN et leurs alliages ternaires et quaternaires sont des matériaux semi-conducteurs ayant une forte importance en microélectronique grâce à leurs propriétés réfractaires qui permettent d'envisager leur application dans des environnements hostiles (hautes températures, hautes puissances) et pour l'optoélectronique du fait de leurs gaps directs qui couvrent l'ensemble du spectre visible et même au-delà. [8].

La plupart des nitrures d'éléments III sont des semi-conducteurs à large bande interdite directe, ce qui en fait d'excellents candidats pour l'optoélectronique [9]. Parmi eux, les semiconducteurs de la famille des nitrures qui sont le nitrure d'indium (InN), le nitrure d'aluminium (AlN) et le nitrure gallium (GaN), et leurs composés ternaires et quaternaires.

Le GaN, l'InN sont des matériaux très importants pour le développement des composants optoélectroniques et des dispositifs électroniques à haute température, ceci est dû à leur bande interdite qui peut varier entre 0.7 eV pour l'InN jusqu'à 3.4 eV pour le GaN. Dernièrement, les nitrures sont utilisés pour développer des cellules solaires de haute efficacité [15, 23].

### **I.5. Structure des cellules photovoltaïques**

#### **I.5.1. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque**

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure I.7.



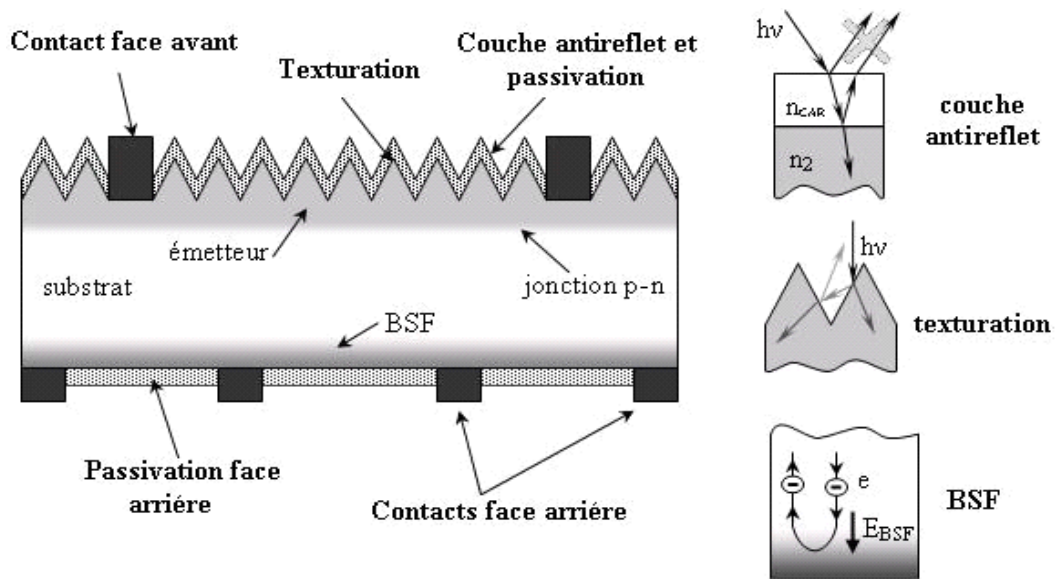


Figure 1.7. Composition d'une cellule photovoltaïque [10].

### Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs est une source de recombinaison, contient une densité importante de défauts cristallins liés à la discontinuité du cristal (liaisons pendantes, impuretés, etc.). On utilise la passivation pour améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont des matériaux tels que l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x\text{:H}$ ) permettant de passiver une grande partie de ces défauts.

### Couche antireflet

On utilise une couche antireflet (ang. Anti-Reflective CAR) pour minimiser la réflexion de la lumière. L'objectif d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure 1.7). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque :  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{SiN}_x$ , etc.

### Texturation de la surface

La texturation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

La texturation est particulièrement importante dans le cas des cellules de faible épaisseur. Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser.

### **Contacts face avant et arrière**

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo générés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré [10].

### **Le BSF**

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction P+P) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure 5.1). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite. Afin de réaliser une économie de matière première, le silicium multicristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées [11].

## **I.6. Définition des paramètres photovoltaïques**

Le comportement de la cellule solaire est examiné à travers les quatre paramètres électriques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF,  $\eta$ ). Ces paramètres sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension  $I-V$ , où  $J_{cc}$  représente la densité du courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , FF le facteur de remplissage (forme) et  $\eta$  le conversion de la cellule solaire, qui découle de l'équation  $I = I_{obs} - I_{ph}$  est représenté sur la figure (I.8) qui montre la variation du courant en fonction de la tension (I-V).

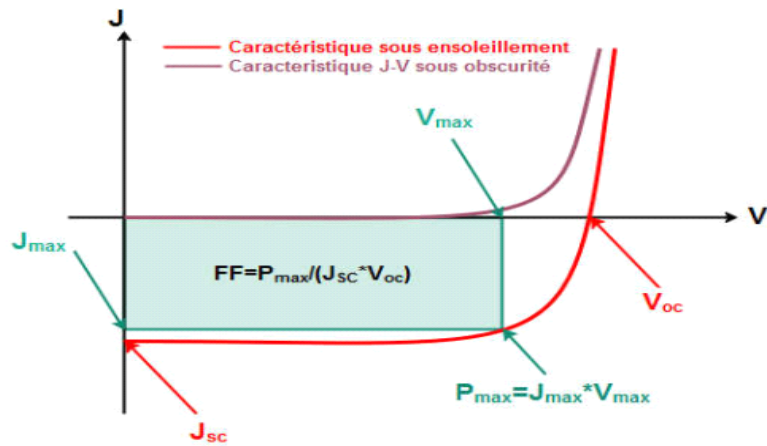


Figure 1.8. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [12].

- ✓ Sous obscurité : la courbe est la même que celle d'une diode simple.
- ✓ Sous éclaircissement : la courbe est décalée vers le bas d'une valeur égale au photo-courant  $I_{ph}$ .

### 1.6.1. Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est en fonction de la température, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéaire dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

### 1.6.2. Le rendement de conversion $\eta$

Le rendement de conversion (en %) est le paramètre le plus important dans la cellule solaire. Il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique. Il est calculé par le rapport entre la puissance de sortie " $P_{out}$ " et la puissance d'entrée de la cellule " $P_{in}$ " (puissance d'éclaircissement solaire incident). Dans les applications terrestres on utilise le spectre solaire AM1.5G avec une puissance totale incidente égale à  $1000W/m^2$ .

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} \quad (1.1)$$

### I.6.3. Tension de circuit ouvert $V_{CO}$

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction SCHOTTKY), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [20].

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \text{Log} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.2)$$

Avec  $\frac{kT}{q}$  : Le potentiel thermodynamique

T : La température absolue.

q : La charge de l'électron

k : La constante de Boltzmann

$I_{ph}$  : Le courant photonique

$I_s$  : Le courant de saturation

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement (Figure I.9) :

➤ Régime des faible flux lumineux, dans ce cas  $I_{ph} \ll I_s$ , ce qui permet d'écrire :

$$\text{Log} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \approx \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (1.3)$$

D'où 
$$V_{CO} \approx \frac{k.T}{q} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (1.4)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule.

En posant  $R_0 = \frac{k.T}{q.I_s}$  :  $R_0$  est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux, la formule précédente peut s'écrire aussi

$$V_{CO} = R_0 \cdot I_{ph} \quad (1.5)$$

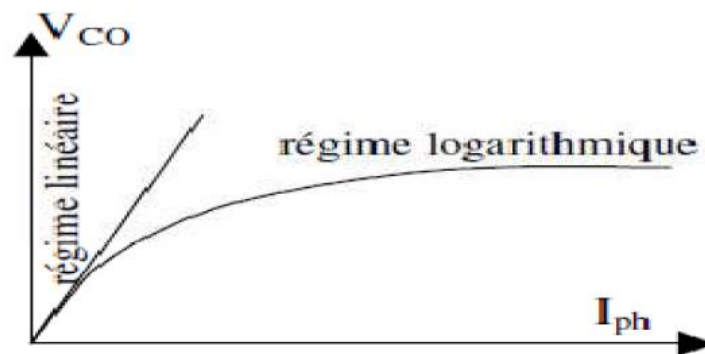
➤ Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que  $I_{ph} \gg I_s$  soit :

$$\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1 \quad (1.6)$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (1.7)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique



**Figure I.9.** Différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Il est important de noter que cette tension augmente avec le log de  $I_{ph}$  .donc avec le log de l'illumination, en revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $\frac{KT}{q}$  . En effet, le courant de saturation  $I_s$  dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction, il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme  $\frac{KT}{q}$  , donc la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  baisse avec la température. Ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [21].

#### **I.6.4. Facteur de forme FF**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou full factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait

l'objet de compromis technologique pour atteindre le plus possible les caractéristique idéales [22]. Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{Co} \cdot I_{cc}} \quad (1.8)$$

### 1.6.5. La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque

La réponse spectrale est le rapport du courant de court-circuit  $J_{cc}$  de la cellule par la puissance incidente en fonction de différentes longueurs d'onde.

$$RS(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (1.9)$$

Où  $RS(\lambda)$  est la réponse spectrale, exprimée en A/W ;  $P(\lambda)$  la puissance incidente, exprimé en W/m<sup>2</sup> et  $J_{cc}(\lambda)$  désigne le courant de court-circuit, exprimé en A/cm<sup>2</sup>.

### 1.6.6. Le rendement quantique externe EQE

En plus des quatre paramètres cités auparavant, le rendement quantique qui présente le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons transmis (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, *IQE* (Internal Quantum Efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, *EQE* (External Quantum Efficiency) [13].

Le rendement quantique est défini comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{q} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{hc}{\lambda \cdot q} \quad (1.10)$$

Où  $J_{cc}$  est la densité de courant de court-circuit,  $\varphi$  le flux lumineux incident,  $q$  la charge de l'électron et  $E_{ph}$  l'énergie du photon (avec  $E_{ph} = hc/\lambda$ ,  $h$  étant la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  la longueur d'onde).

Le rendement quantique externe tient compte des pertes optiques comme la réflexion ou la transmission à travers la cellule. En corrigeant les pertes optiques, on obtient le rendement quantique interne *IQE* qui tient compte des caractéristiques propres de la cellule (longueur de diffusion, recombinaison en surface et en volume) et qui est défini comme suit :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (1.11)$$

$R(\lambda)$  : coefficient de réflexion.

## **I.7. Avantages et inconvénients des cellules solaires**

### **I.7.1. Avantages**

Les cellules solaires possèdent certains avantages très intéressants :

- D'abord, une haute fiabilité, elles ne comportent pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du mW au MW.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, en plus ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### **I.7.2. Inconvénients**

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système

restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

## **I.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un récapitulatif du fonctionnement des cellules photovoltaïques, nous avons commencé par un rappel du principe de l'effet photovoltaïque, ensuite nous avons présenté les structures des cellules photovoltaïques et aussi les différentes filières des cellules solaires. Ensuite, nous avons présenté les paramètres essentiels permettant d'évaluer les performances d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension tels que le courant de court-circuit  $I_{CC}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion  $\eta$ , nous avons terminé ce chapitre théorique par quelques avantages et inconvénients des cellules solaires.



## II.1.INTRODUCTION

Depuis les années 1970, les matériaux nitrurés d'éléments III : GaN, AlN, InN et leurs alliages ont été présentés comme des semi-conducteurs intéressants pour le développement de dispositifs optoélectroniques. La recherche dans ces matériaux a été déclenchée en observant particulièrement certaines de leurs caractéristiques : leur large bande interdite directe, leur haute conductivité thermique, le champ de claquage élevé, leur grande stabilité mécanique, leur résistance aux radiations etc. Leur bande interdite est originellement l'une des propriétés les plus attrayantes. En effet, elle varie entre  $\sim 0.7$  eV pour l'InN et 6.2 eV pour l'AlN couvrant ainsi une gamme de longueurs d'onde unique concernant les semi-conducteurs, de l'infrarouge proche jusqu'à l'ultraviolet lointain (figure II.1) [13].

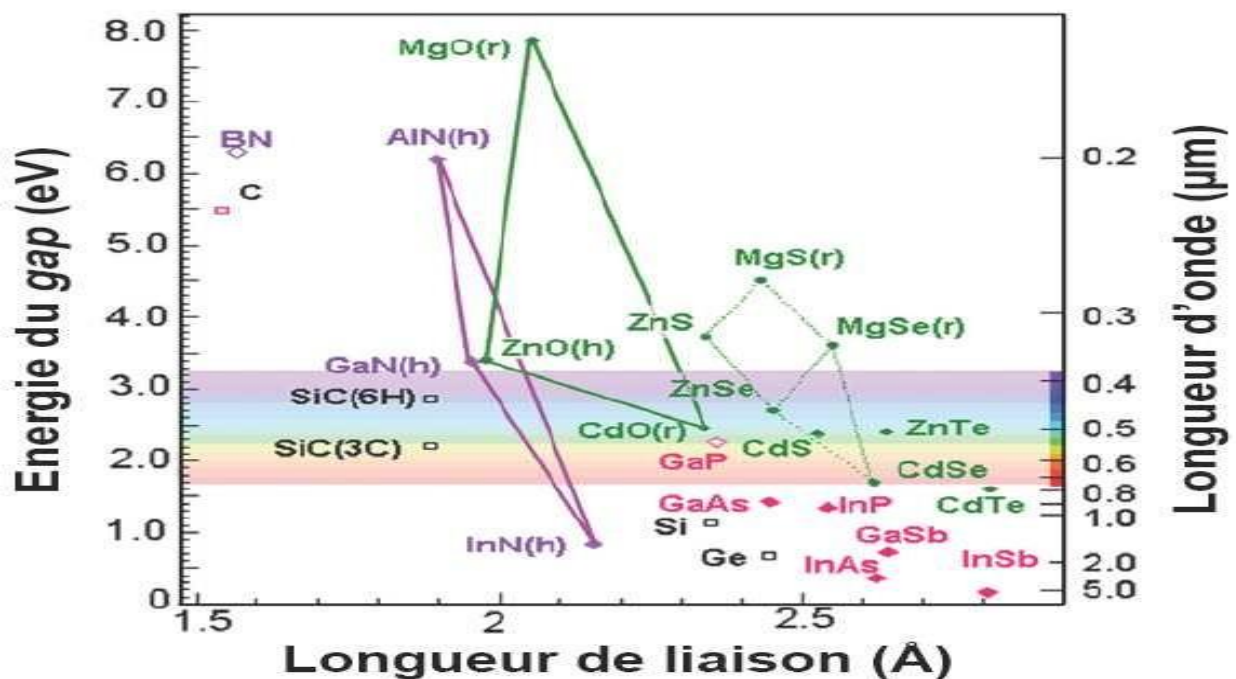


Figure II.1. Energie de la bande interdite de plusieurs familles de semi-conducteurs en fonction de la longueur des liaisons dans la maille.

## II.1.2. Historique [27]

**Phase I 1907-1932** : Synthèse de l'AlN en 1907, de l'InN en 1910, du GaN en 1932.

**Phase II 1969- 1976** : Epitaxie du GaN par HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) en 1969, Epitaxie du GaN par MOCVD en 1971, MBE du GaN en 1974.

**Phase III 1983- 1989** :

Concept de basse température de la couche tampon en 1983, MOVPE (metalorganic vapor phase epitaxy) du GaN cristallin en utilisant AlN comme couche tampon en 1986, dopage du GaN type P en 1989.

**Phase IV 1990- 2004** :

1991 : couche tampon de GaN par MOCVD, P-N jonction LED bleu de GaN, dopage P type du AlGaN

1992 : haute qualité de InGaN, GaN photoconducteur, GaN type P recuit thermiquement;

1997 : Gamme complète de AlGaN photoconducteurs, ultraviolet LED, 10000 Heures de vie en température ambiante de LD InGaN violet

1998 : Schottky barrière ALGAN photodiode, ALGAN / GaN, GaN MOSFET

2000 : Solaire AlGaN P-I-N photodiode, GaN photodiodes à avalanche, MOSHFET dans ALGAN (semi-conducteur métal oxyde hétéro structure FET)

2001 : Commercialisation de la diode laser bleu violet;

2004 : lasers UV AlGaN à la longueur d'onde de 350,9 nm ;

2009 : Amélioration de la luminescence d'une diode électroluminescente à base de GaN avec texturisation de l'électrode par l'oxyde d'indium [28].

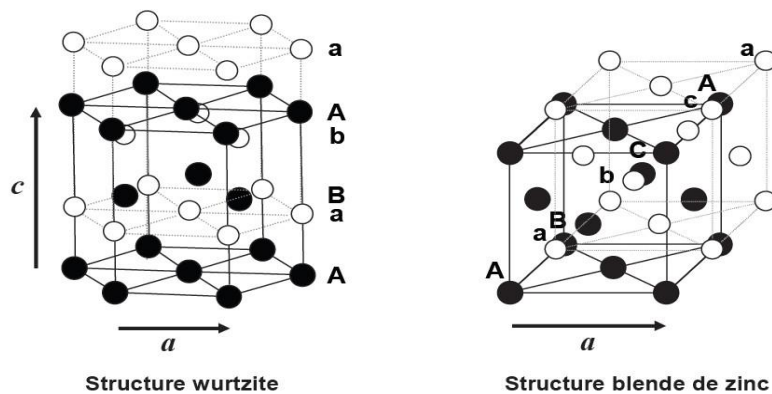
2010 : élaboration du GaN Nanostructurés par électrochimie, induit par gravure laser.

## II.2. LES COMPOSES BINAIRES GaN, InN ET AlN

### II.2.1. Propriétés cristallographiques

Les semiconducteurs III-nitrurés existent sous deux formes cristallines : la phase wurtzite (hexagonale) et la phase blende de zinc (cubique) représentées sur la figure II-2. La structure wurtzite est constituée de deux réseaux hexagonaux compacts. Ces sous-réseaux forment un

empilement de type ABAB (figure II-2). Le groupe d'espace de cette forme cristalline est P63mc. Les nitrures peuvent également exister sous forme cubique de type blende de zinc. Cette phase comprend deux réseaux cubiques à faces centrées décalés d'un quart du paramètre de maille suivant la direction (111). On obtient alors pour chaque sous-réseau une succession de couches ABCABC suivant cette direction (figure II-2). La structure blende de zinc appartient au groupe d'espace F43m [14].



**Figure II.2.** Structures cristallines des nitrures d'élément III.

Dans les conditions ambiantes, seule la structure wurtzite est thermodynamiquement stable pour les couches massives. Néanmoins, des couches fines épitaxiées de GaN et d'InN ont été réalisées sur des substrats tels que AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si, SiC, MgO, GaP ou GaAs :

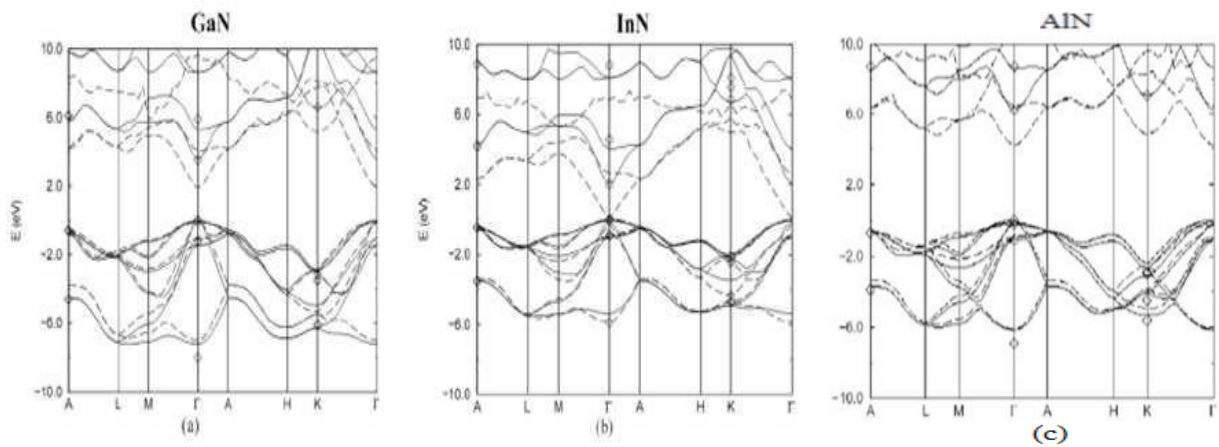
L'adéquation entre la structure cristalline du substrat et celle de la couche l'emporte sur la tendance naturelle à cristalliser dans la structure wurtzite. Le tableau II.1 ci-dessous reporte les paramètres de maille du GaN, InN et AlN [14,22]:

		InN	GaN	AlN
<b>Wurtzite</b>	<b>a(Å)</b>	3,54	3,189	3,11
	<b>c(Å)</b>	5,70	5,185	4,98
<b>Cubique</b>	<b>a (Å)</b>	4,96	4,47	4,36
<b>Longueur des liaisons</b>	<b>(wurtzite) (Å)</b>	2,15	1,94	1,89

**Tableau II.1.** Paramètres de maille du GaN, de l'InN et de l'AlN [14,22].

### III.2.2. Structure de bandes

La structure de bandes générale est donnée à la figure II.3.



**Figure II.3.** Structure de bandes du GaN(a), InN(b) et AlN (c)[16].

Comme nous l'avons déjà signalé, l'intérêt majeur des nitrures du groupe III réside dans leur large bande interdite directe. Le minimum de la bande de conduction (BC) et le maximum de la bande de valence (BV) se trouvent au centre de la zone de Brillouin (c'est-à-dire au point  $\Gamma$ ). La principale différence entre les nitrures du groupe III de type wurtzite est d'autres semi-conducteurs à bande interdite directe tels que le GaAs, est le fait que la bande de conduction n'est pas dégénérée au niveau du point  $\Gamma$

### II.3. Le composé ternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$

Le Nitrure de gallium d'indium ( $\text{InGaN}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ ) est un matériau de semi-conducteur fait d'un mélange de nitrure de gallium (GaN) et nitrure d'indium (InN) [17].

Il est un ternaire du groupe III-V à bande interdite directe . Sa largeur de bande peut être accordée en changeant la quantité d'indium dans l'alliage.

Les paramètres de maille d' $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$  peuvent se déduire des paramètres de GaN et InN par interpolation linéaire [14,25].

Tel que :

$$a(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x.a(\text{InN}) + (1 - x).a(\text{GaN}) \quad (\text{II.1})$$

$a(\text{\AA})$  : paramètre de maille d' $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ .

### II.3.1. Croissance des ternaires $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$

Dans les dispositifs optoélectroniques, le ternaire InGaN joue un rôle important, la méthode de croissance la plus utilisée pour l'InGaN est l'épithaxie par jets moléculaire EJM ou MBE (*molecular beam epitaxy*) [18]. Cette technique permet de faire croître un échantillon monocouche par monocouche sur un substrat chauffé à des températures de l'ordre de 700°C. Les éléments Ga, In sont fournis sous forme de jets moléculaires ou atomiques émis dans une chambre à ultra-vide par des cellules à effusion de type Knudsen. L'azote est apporté soit par de l'ammoniac soit par une cellule à plasma radiofréquence qui dissocie les molécules de diazote gazeux.

Pendant la croissance en MBE, les atomes qui arrivent sur la surface en croissance s'adsorbent et diffusent généralement sur la surface jusqu'à trouver un site favorable à leur incorporation. Il existe plusieurs possibilités d'incorporation : ils peuvent rejoindre d'autres atomes pour former un groupe de nucléation (*nucleus*) ou s'incorporer en bord de marche. Ils peuvent également être désorbés (figure II.4). L'évolution de la surface pendant la croissance peut être suivie par un dispositif *in situ* de diffraction des électrons de haute énergie en incidence rasante RHEED (*reflection high energy electron diffraction*). Il est notamment possible de connaître en temps réel le nombre de couches déposées, la variation du paramètre de maille, la rugosité du front de croissance, les transitions 2D-3D (croissance de boîtes quantiques) et les reconstructions de surface.

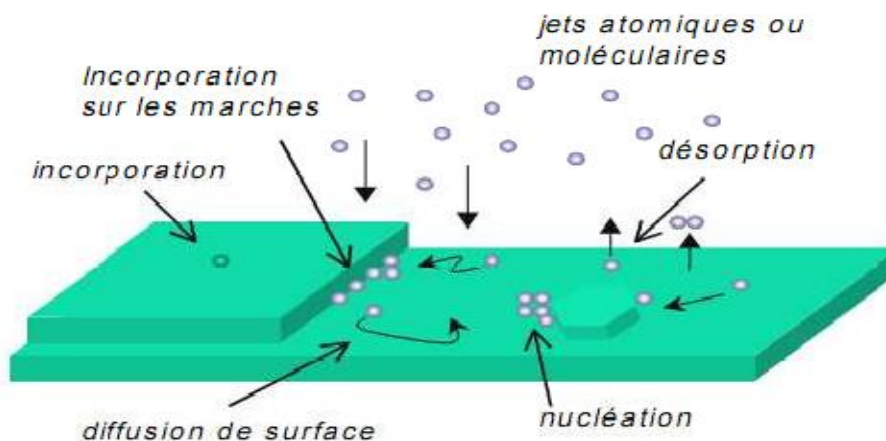


Figure II.4: Croissance par l'épithaxie par jets moléculaires.[18]

## II.3.2. Evolution des propriétés physiques de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

### II.3.2.1. Energie de la bande interdite

D'après la loi de Vegard la variation de l'énergie de bande interdite de l'alliage en fonction de la composition n'est pas linéaire mais quadratique [19].

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

Le paramètre de courbure noté  $b$  (*bowing* en anglais) vaut environ 1.43 eV pour l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  [19].

$E_g(\text{InN}) = 0.7\text{eV}$  [19].

$E_g(\text{GaN}) = 3.42\text{eV}$  [21].

$x$  : Coefficient stœchiométrique évalué en %.  $x$  correspondant à la quantité d'incorporation d'indium dans le nitrure de gallium.

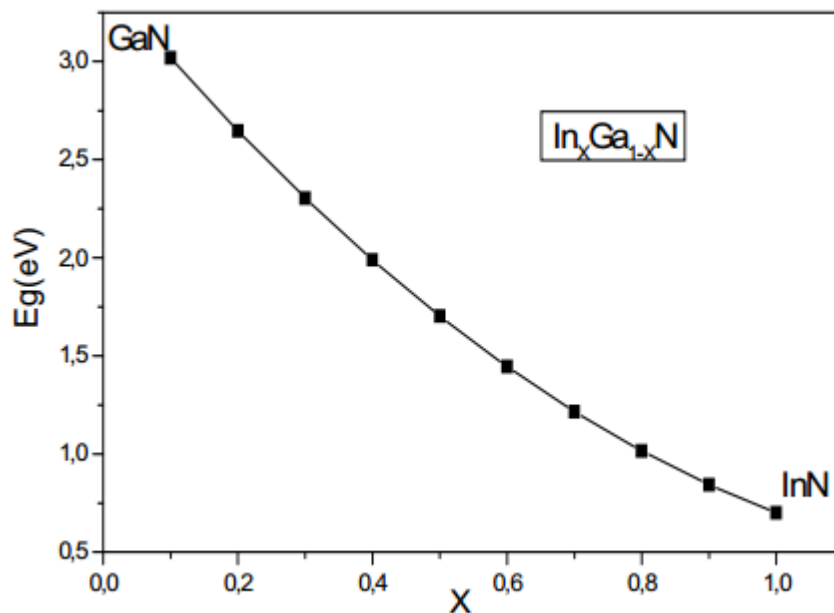


Figure II.5 Evolution de largeur de la bande interdite en fonction de  $x$  [33]

- ❖ Technologiquement plus on incorpore de l'indium dans le gallium plus l'énergie de la bande interdite du ternaire InGaN diminue.

### II.3.2.2. Affinité électronique

L'évolution de l'affinité électronique  $\chi$  en fonction du coefficient stœchiométrique est

donnée par la relation [23] :

$$\chi_{(\text{InGaN})} = x \cdot \chi(\text{InN}) + \chi(\text{GaN}) \cdot (1 - x) \quad (\text{II.3})$$

Avec les affinités :

$$\chi(\text{InN}) = 5.8 \text{ eV [24]}$$

$$\chi(\text{GaN}) = 4.1 \text{ eV [25]}$$

### II.3.2.3. Mobilité des électrons et trous

L'évolution de la mobilité en fonction du coefficient stœchiométrique x est donnée par la relation [26] :

$$\frac{1}{\mu(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})} = \frac{x}{\mu_{\text{InN}}} + \frac{1-x}{\mu_{\text{GaN}}} + \frac{x(1-x)}{b_{\text{InGaN}}} \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$$b_{\text{InGaN}}(\text{bowing}) = 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} [26]$$

$$\mu_e(\text{InN}) = 4400 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} [27] \text{ et } \mu_t(\text{InN}) = 340 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} [28].$$

$$\mu_e(\text{GaN}) = 1300 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} [29] \text{ et } \mu_t(\text{GaN}) = 170 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} [28].$$

$\mu_e$  et  $\mu_t$  sont respectivement les Mobilités des électrons et des trous.

### II.3.2.4. Masses des électrons et des trous

Les masses des électrons et trous en fonction du coefficient stœchiométrique x sont données par la relation suivante [26] :

$$m_{e,t}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \cdot m_{e,t}(\text{InN}) + (1-x) \cdot m_{e,t}(\text{GaN}) \quad (\text{II.5})$$

tels que :

$$m_e : \text{La masse des électrons } (m_{e(\text{GaN})} / m_0 = 0.2, m_{e(\text{InN})} / m_0 = 0.05) [28].$$

$$m_t : \text{La masse des trous } (m_{t(\text{GaN})} / m_0 = 1.25, m_{t(\text{InN})} / m_0 = 0.6) [28].$$

### II.3.2.5. Indice de réfraction

L'évolution de l'indice de réfraction avec le coefficient stœchiométrique x est donnée par la relation [30] :

$$n(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = x \cdot n(\text{InN}) + (1 - x)n(\text{GaN})$$

$$\text{Ou } n(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 2.506 + 0.91 \cdot x \quad (\text{II.6})$$

### II.3.2.6. Constante diélectrique (ou permittivité électrique)

L'évolution de la constante diélectrique avec le coefficient stœchiométrique x est donnée par la relation [31]:

$$\epsilon_r (\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 4.33.x + 10.28 \quad (\text{II.7})$$

### II.3.2.7 Coefficient d'absorption

L'évolution des coefficients d'absorption en fonction du coefficient stœchiométrique x est donnée par la relation [30] :

$$\alpha(\lambda) = C \left( h \frac{c}{\lambda} - E_g \right)^{1/2} = C. (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (\text{II.8})$$

Tels que :

$\lambda$  : Longueur d'onde,  $\nu$  : fréquence

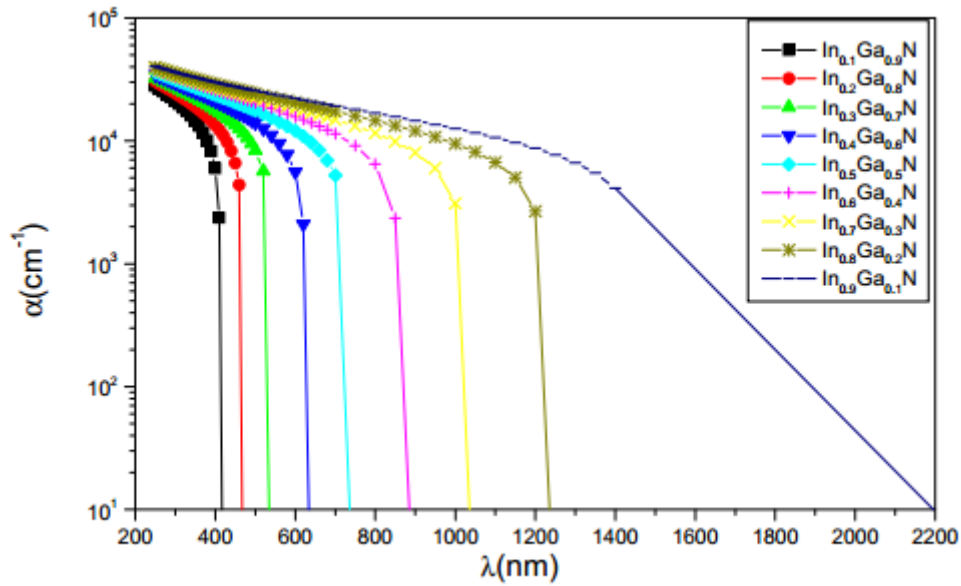
C : constante pour le semi-conducteur InGaN =  $2,2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$

h: Constante de Planck

c : La vitesse de la lumière

$E_g$  : gap de l'InGaN





**Figure II.6** Evolution du Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de x [33]

## II.4. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les propriétés structurales physiques des III-N nitrurés. Ensuite notre intérêt a porté sur l'évolution des propriétés physiques et optiques en fonction du coefficient stœchiométrique x de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

Ces propriétés physiques et optiques vont nous servir dans l'optimisation des paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire réalisée à base de cet alliage ternaire.

### III.1 Introduction

La simulation est un moyen performant pour l'analyse des informations et la compréhension des phénomènes physiques et électriques. En effet il existe plusieurs logiciels de simulation des cellules photovoltaïques à base de couches minces, parmi lesquels on peut citer : AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, wxAMPS, Silvaco etc.

Dans ce travail, notre choix s'est porté sur le logiciel SCAPS-1D afin de simuler les caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire à base du matériau InGaN. Nous allons étudier l'effet de l'épaisseur et du dopage des différentes couches de la cellule sur les paramètres photovoltaïques à savoir le courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de remplissage ( $FF$ ) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ). Nous étudions en même temps la variation de la réponse spectrale en fonction des paramètres cités.

### III.2 Présentation du logiciel SCAPS

SCAPS (solar cell capacitance simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires tridimensionnelles. Il a été développé en septembre 1996 à l'université de Gent en Belgique avec LabWindows/ CVI de National Instruments par Marc Burgelman et al [34]. Depuis lors ce logiciel ne cesse de connaître un essor important lui permettant de devenir aujourd'hui l'un des logiciels de simulations des cellules solaires les plus importants avec environ 550 clients, 28000 systèmes vendus [35].

SCAPS contient plusieurs panneaux (fenêtres ou pages). Le principal panneau est « le panneau de l'action ». Il permet de régler le problème, définir la liste d'actions de calculs requis, exécuter les calculs, naviguer vers d'autres panneaux et sauvegarder les résultats (Figure III.1) [35].

Le logiciel SCAPS est un logiciel qui permet de résoudre les équations de base de la physique des semi-conducteurs, à savoir l'équation de Poisson(III.1), les équations de continuité pour les électrons(III.2) et les trous (III.3) [36]:

$$\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) = -\frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0} (p(x) - n(x) + N_D - N_A + \rho_p - \rho_n) \quad (III.1)$$

$$\frac{d}{dx} J_n(x) = q(G(x) - R(x)) \quad (III.2)$$

$$\frac{d}{dx} J_p(x) = -q(G(x) - R(x)) \quad (III.3)$$

Tels que :  $\phi$  est le potentiel électrique,  $q$  la charge électrique,  $\epsilon_r$  la permittivité relative,  $\epsilon_0$

La permittivité du vide,  $p$  et  $n$  les concentrations de trous et d'électrons,  $N_D$  et  $N_A$  la concentration des impuretés donneurs et accepteurs,  $\rho_p$  et  $\rho_n$  la distribution de trous et d'électrons,  $J_p$  et  $J_n$  la densité de courant de trous et électrons,  $G(x)$  et  $R(x)$  le taux de génération et de recombinaison des charges

**Les équations de transport** : basées sur le modèle de dérive-diffusion et qui relient les densités de courant aux champs électriques et aux gradients de concentration sont [37] :

$$\vec{j}_n = q\mu_n n \vec{\xi} + qD_n \vec{\nabla} n \quad (III.4)$$

$$\vec{j}_p = q\mu_p p \vec{\xi} - qD_p \vec{\nabla} p \quad (III.5)$$

La figure suivante représente ce qu'on appelle le panneau d'action du logiciel SCAPS.

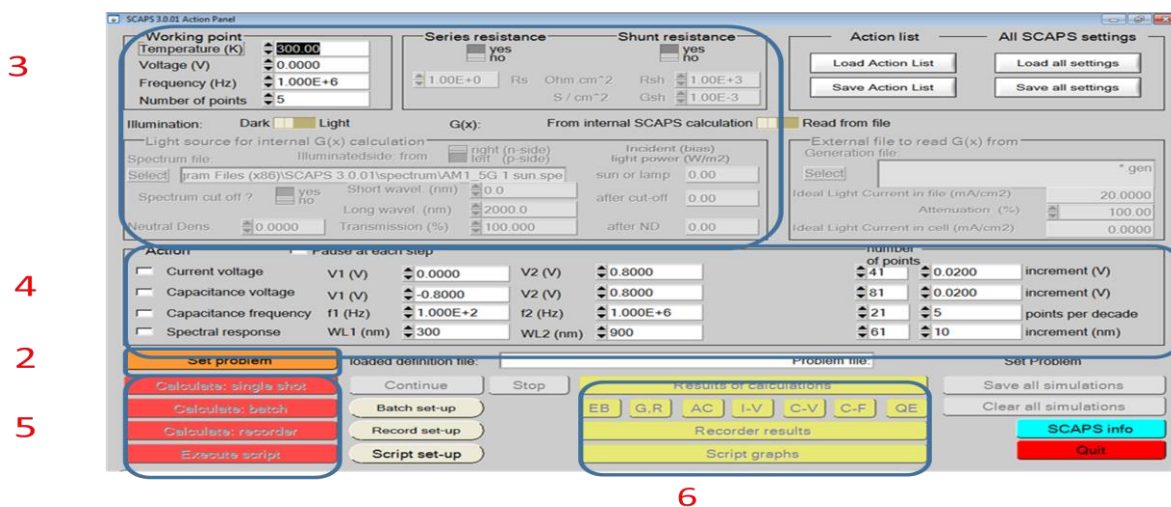


Figure III.1. Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

Il est constitué de différents blocs comme montré dans le texte :

1. Lancer SCAPS (On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS EXE dans le gestionnaire de fichiers).
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et pour modifier les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation, on peut simuler :
  - Caractéristique I-V.
  - C-V (capacitance-tension).
  - C-f (capacitance-fréquence).
  - QE (rendement quantique).

### III.3 Résultats de la simulation numérique et interprétations

La cellule solaire étudiée est une jonction PN à base de matériau  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$  (Figure III.2).

Les paramètres physiques et technologiques sont introduits dans l'interface de SCAPS pour simuler les caractéristiques électriques de la cellule solaire dans les conditions standards (spectre AM1.5, éclairement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , température de 300 K).

Les paramètres d'entrée de cette cellule sont les épaisseurs, le dopage des deux régions P et N, le gap d'énergie du InGaN, les densités effectives des électrons et des trous ( $N_c, N_v$ ), les mobilités ( $\mu_n, \mu_p$ ), l'affinité électronique  $\chi$ , la température et les vitesses thermiques des électrons et des trous.

Nous allons étudier la variation des paramètres photovoltaïques et la réponse spectrale sous l'effet des épaisseurs, du dopage des deux régions et du coefficient stœchiométrique ( $x$ ).

### III.3.1. Description de la structure

Notre structure de référence est une cellule p-n à base de  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$  elle est représentée sur la Figure III.2.

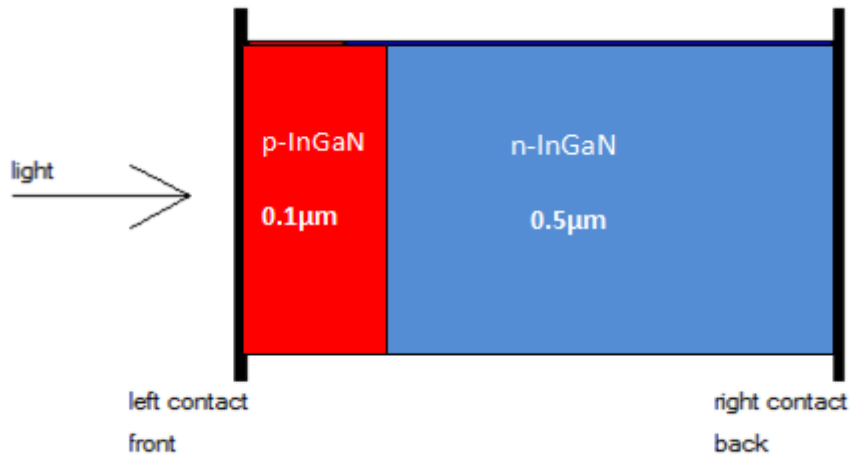


Figure III.2 : Structure de la cellule à simuler sous SCAPS.

### III.3.2. Paramètres de la simulation

Le tableau III.1 récapitule tous les paramètres physiques du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  pour un coefficient stœchiométrique  $x = 0.72$ .

Paramètres	$\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$
Bande interdite $E_g(\text{eV})$	$(x=0,72 \text{ et } b=1.43)$ $E_g=0.7x+3,42(1-x)-1.43x(1-x)= 1.16$
Affinité électronique $\chi(\text{eV})$	$\chi=5.8x+4,1(1-x)= 5.32$
Permittivité relative $\epsilon_r$	$4.33x+10.28=13.39$
Densité d'états effective de la bande de conduction, $N_c[\text{cm}^{-3}]$	$1.29 \times 10^{18}$
Densité d'états effective de la bande de valence, $N_v[\text{cm}^{-3}]$	$4.32 \times 10^{19}$
Mobilité des électrons $[\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	2776.2
Mobilité des trous $[\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	269.5

La vitesse thermique des électrons [cm.s <sup>-1</sup> ]	10 <sup>7</sup>
La vitesse thermique des trous [cm.s <sup>-1</sup> ]	10 <sup>7</sup>

**Tableau III.1.** Paramètres de simulation à 300 K pour une concentration d'indium de 72% d'In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N.

Le **tableau III.2** regroupe respectivement les paramètres technologiques tels que l'épaisseur et le dopage, pour chaque région, front et base de la cellule solaire étudiée.

Paramètres technologiques	Valeurs par défaut	Etendue de la variation
Epaisseur du front ( $w_{\text{front}}$ ) (μm)	0.1	0.1-1
Dopage du front ( $N_{\text{a front}}$ ) (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>17</sup>	10 <sup>15</sup> -10 <sup>21</sup>
Epaisseur de la base ( $w_{\text{base}}$ ) (μm)	0.5	0.5-1.5
Dopage de la base ( $N_{\text{d base}}$ ) (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>17</sup>	10 <sup>15</sup> -10 <sup>21</sup>

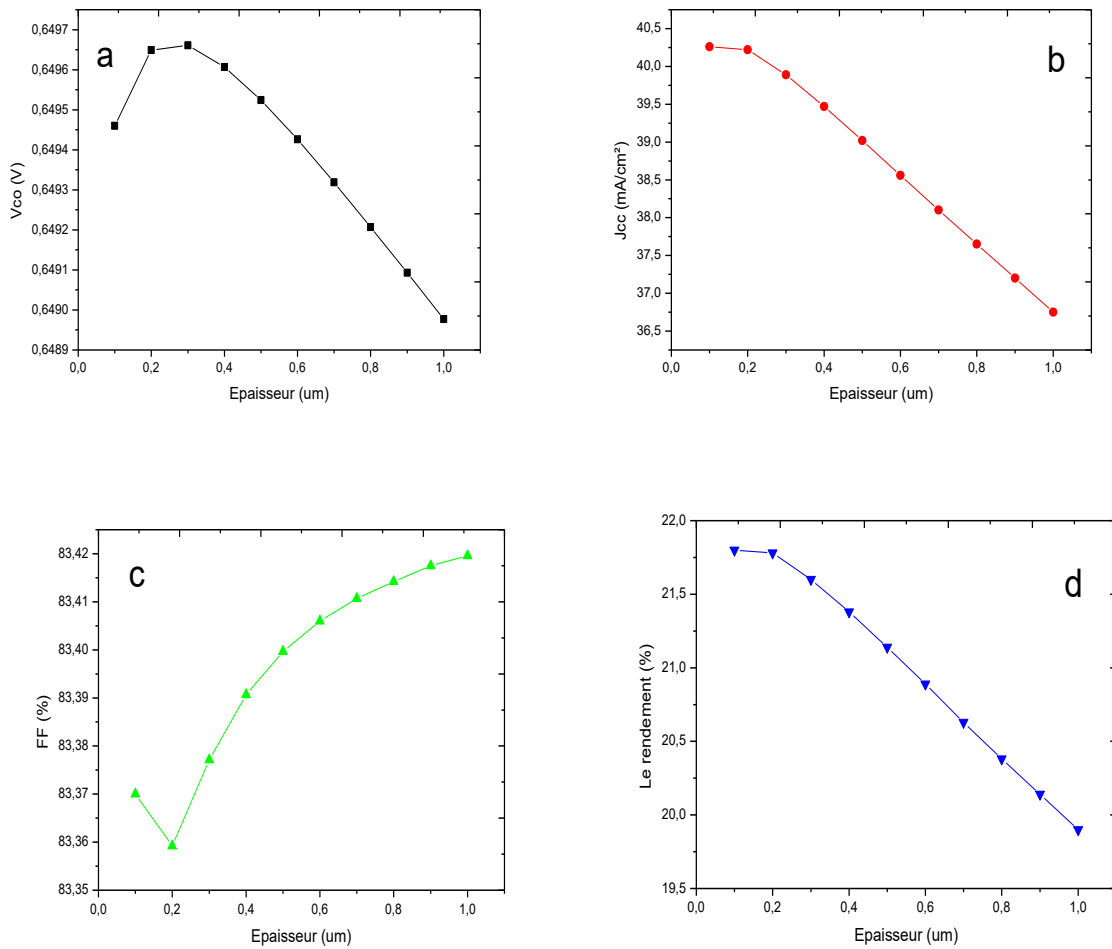
**Tableaux III.2.** Epaisseurs et dopages de la structure étudiée.

## III.4. résultats de la simulation

### III.4.1. Effet de l'épaisseur du front sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale

#### a. Sur les grandeurs photovoltaïques

L'influence de l'épaisseur du front sur les grandeurs de sortie dans la cellule solaire étudiée est présentée par la figure III.3.



**Figure III.3** Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) en fonction de l'épaisseur de front pour la cellule In<sub>0.72</sub>Ga<sub>0.28</sub>N.

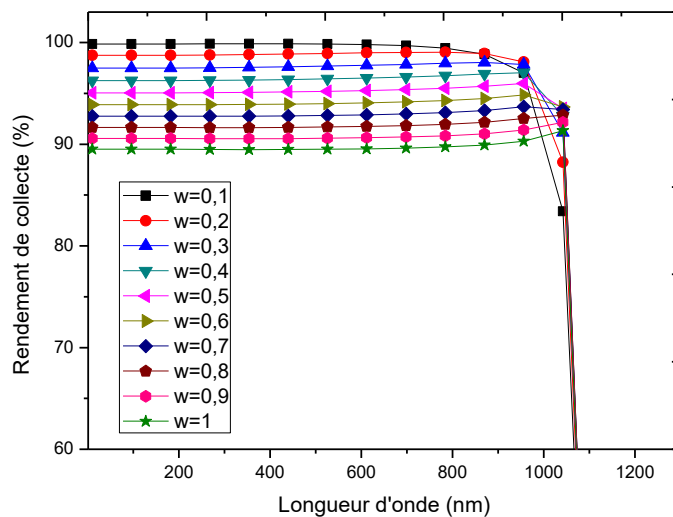
D'après les résultats de la Figure III.3, on remarque que la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  atteint une valeur maximale pour une épaisseur de l'ordre de 0.3 μm, puis diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du front.

La Figure III.3 (b) montre la diminution de la densité de courant avec l'augmentation de l'épaisseur, en effet les porteurs photogénérés doivent parcourir une grande distance avant d'être collectés, cette grande distance augmente la probabilité de recombinaison, des porteurs, par conséquent l'effet de recombinaison en surface augmente. D'après l'équation (1.1) cette diminution de  $V_{co}$  et  $J_{cc}$  entraîne une diminution de rendement proportionnellement à l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur.

On remarque également que la valeur du photocourant et du rendement est maximale pour les faibles épaisseurs du front, ceci est dû au fait que les porteurs minoritaires photogénérés par les courtes longueurs d'onde parviennent facilement à atteindre la ZCE et par suite peuvent contribuer au photocourant total. Mais lorsque l'épaisseur du front augmente, ces photoporteurs se recombinent avant d'atteindre cette zone.

### b. sur la réponse spectrale

La figure III.4 représente le tracé de la réponse spectrale de la cellule PN pour différentes épaisseurs du front.



**Figure III.4.** Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différentes épaisseurs du front pour la cellule  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .

On remarque une augmentation du rendement de collecte avec diminution de l'épaisseur de front pour les courtes longueurs d'onde. La réponse spectrale s'étend jusqu'à une longueur d'onde de 1070nm.

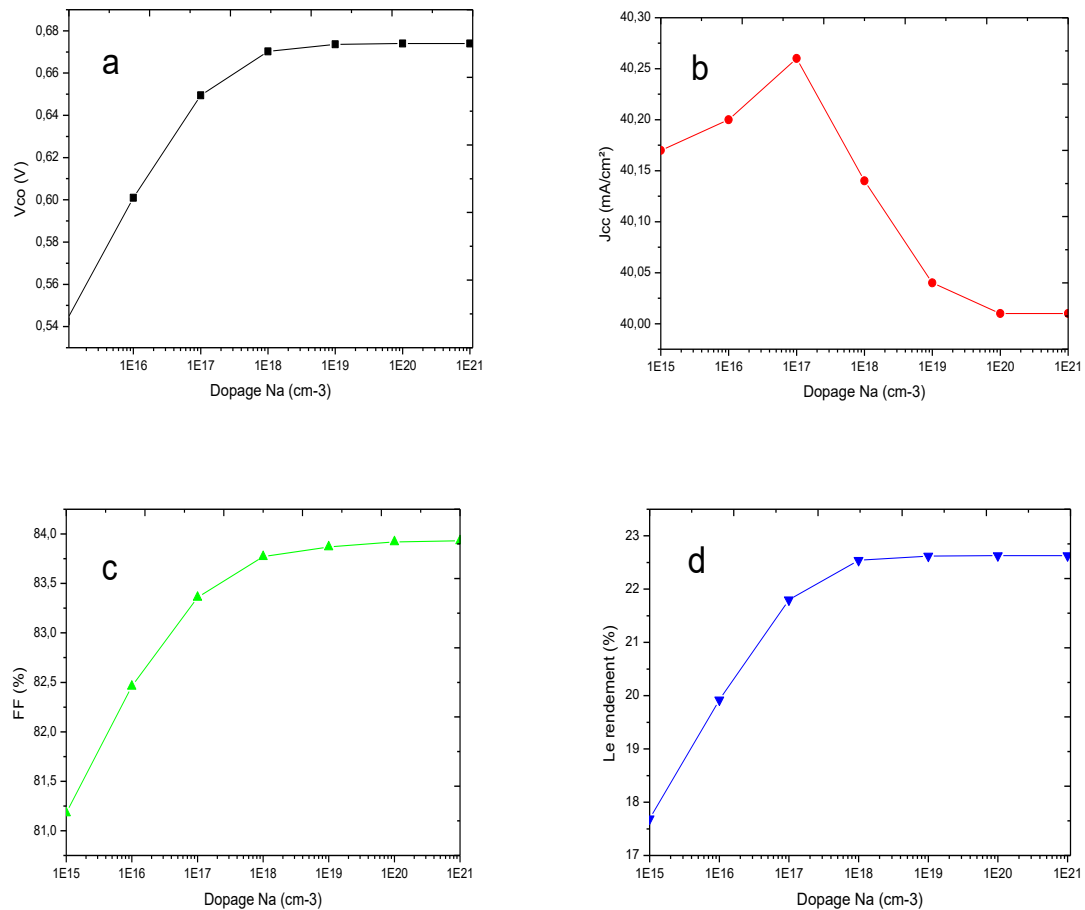
En réduisant aussi l'épaisseur du front à une valeur inférieure ou égale à 0,5  $\mu\text{m}$  on a un rendement de collecte supérieur à 95 % dans l'intervalle de longueur d'onde [0-980] nm. Pour des épaisseurs plus élevées le rendement de collecte diminue de façon significative.



### III.4.2. Effet du dopage du front sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale

#### a. Sur les grandeurs photovoltaïques

L'influence du dopage de front sur les grandeurs photovoltaïques est illustrée dans la figure III.5 :



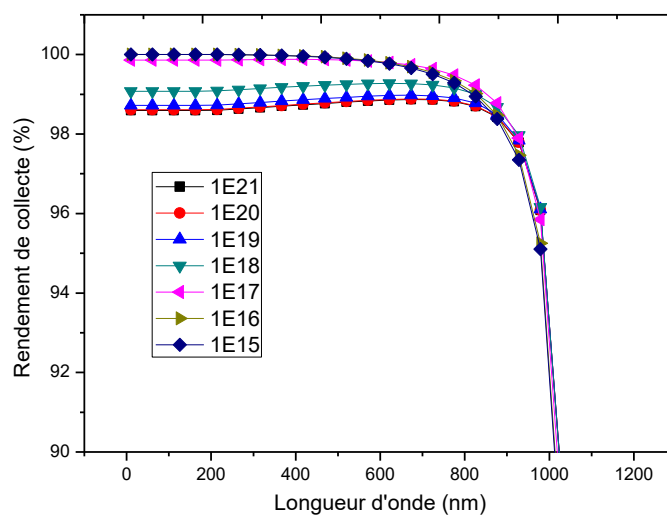
**Figure III.5 :** Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) en fonction de dopage de front pour la cellule  $In_{0.72}Ga_{0.28}N$ .

D'après la Figure III.5(b), la densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente avec la diminution de la concentration du dopage Na pour atteindre une valeur maximale de 40.26 mA/cm<sup>2</sup> pour un dopage de l'ordre de  $10^{17}cm^{-3}$ , puis commence à diminuer avec l'augmentation du dopage. En effet la diminution de la concentration du dopage entraîne une augmentation de la mobilité des porteurs  $\mu$ , ce qui provoque l'augmentation du coefficient de diffusion des porteurs  $D$  et c'est ainsi que la longueur de diffusion augmente, conduisant à une meilleure collecte des porteurs de

charges libres générés. L'augmentation de la concentration de la couche p conduit à une diminution de la largeur de la zone de charge d'espace, ce qui augmente la perte par recombinaison et diminue par la suite le courant de court-circuit  $J_{cc}$ .

On remarque que  $V_{co}$  augmente avec la croissance de la concentration du dopage Na comme le montre la Figure III.5(a), parce que d'après l'équation (I. 3), le courant de saturation diminue ce qui entraîne une augmentation de  $V_{co}$  d'après l'équation(I.2), et par conséquent, l'augmentation du rendement (d'après l'équation(I.1)). De même le facteur de forme et le rendement augmentent avec la concentration du dopage.

### b. Sur la réponse spectrale



**Figure III.6.** Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde pour différents dopage du front pour la cellule  $In_{0.72}Ga_{0.28}N$ .

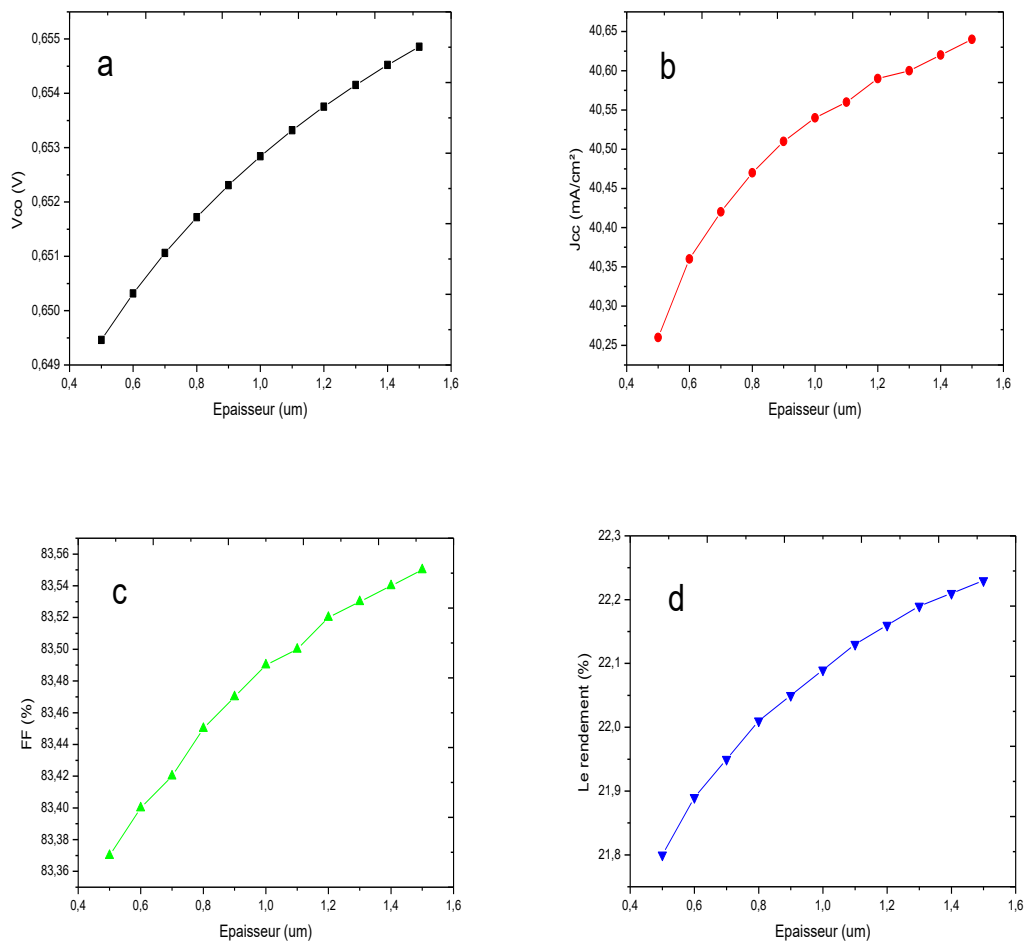
Dans la figure III.6 donnant le tracé de la réponse spectrale pour différents dopages du front, on observe que la réponse spectrale s'étend jusqu'à une longueur d'onde de 1030 nm. Le rendement de collecte augmente avec la diminution du dopage.

La meilleure réponse spectrale est obtenue pour un dopage de l'ordre de  $10^{15}cm^{-3}$ .

### III.4.3. Effet de l'épaisseur de la base sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale

#### a. Sur les grandeurs photovoltaïques

La figure III.7 présente la variation des grandeurs photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la base.



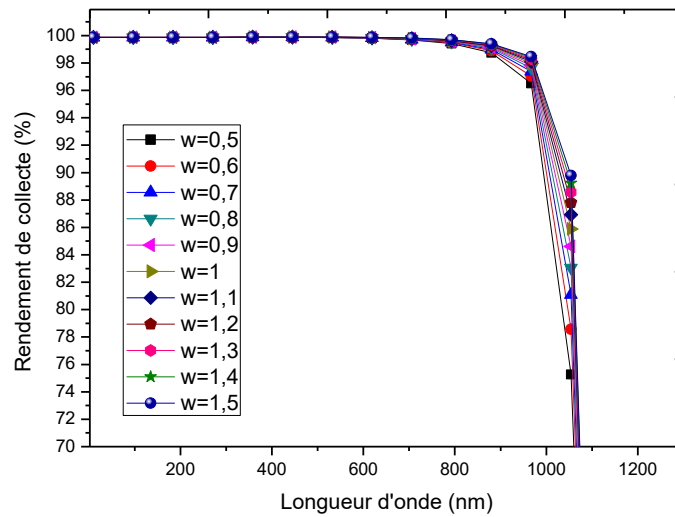
**Figure III.7.** Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) en fonction de l'épaisseur de la base  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .

D'après les résultats, de la Figure III.7, on remarque que les paramètres photovoltaïques de la cellule augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la base.

la densité de courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la base en raison de la longue distance entre la surface et la zone de charge d'espace

(probabilité de la réduction de l'effet de la recombinaison en surface) D'après l'équation (I.1) une augmentation de la densité de courant ( $J_{cc}$ ) et de la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) entraîne une augmentation du rendement.

### b. Sur la réponse spectrale



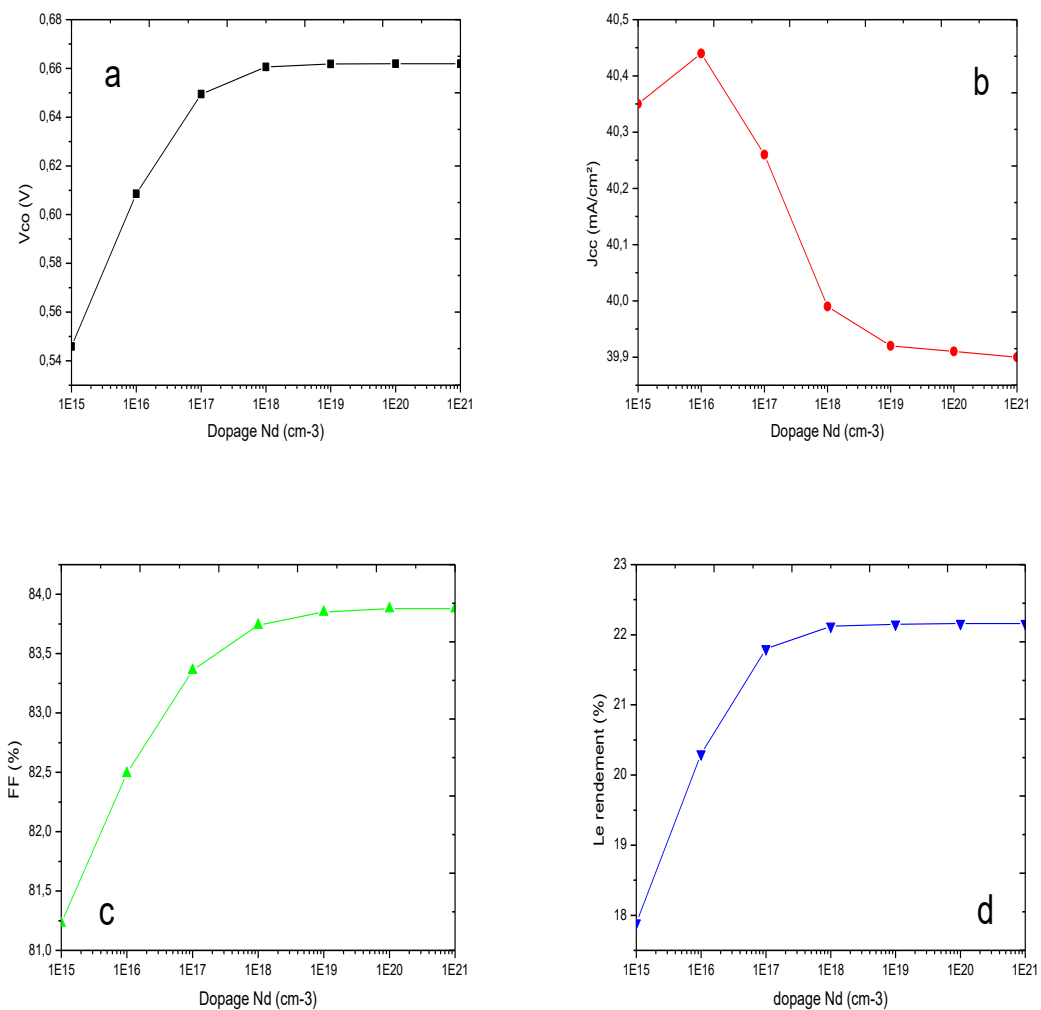
**Figure III.8** Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différentes épaisseurs de la base  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .

Dans la figure III.8 donnant le tracé de la réponse spectrale pour différentes épaisseurs de la base, on remarque que la réponse spectrale est presque constante en fonction de l'épaisseur de la base et le rendement de collecte peut atteindre des valeurs presque à 100%

### III.4.4 Effet du dopage de la base sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale

#### a. Sur les grandeurs photovoltaïques

L'influence du dopage de la base sur les grandeurs photovoltaïques est illustrée dans la figure III.9

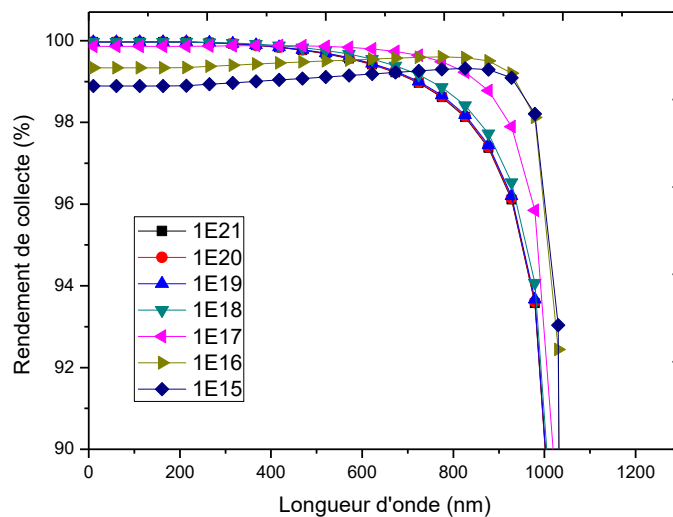


**Figure III.9** Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) en fonction de dopage du base  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .

Le dopage de la base est un paramètre très déterminant pour optimiser le rendement des cellules solaires.

D'après la Figure III.9(b), la densité du courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ) augmente avec l'augmentation de la concentration du dopage  $N_d$ , elle atteint une valeur maximale de l'ordre de  $40.44 \text{ mA/cm}^2$  pour un dopage de la base égal à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Ensuite cette densité diminue en fonction du dopage. La tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF et le rendement  $\eta$  augmentent avec la croissance de la concentration du dopage  $N_d$  pour atteindre leurs valeurs maximales pour un dopage de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , ensuite ces valeurs deviennent constantes, comme le montre la Figure III.9 (a, b, d).

### b. Sur la réponse spectrale



**Figure III.10.** Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différents dopage de la base  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$

Dans la figure (III.10) donnant le tracé de la réponse spectrale pour des dopages de la base allant de  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  jusqu'à  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , nous remarquons que le rendement de collecte augmente en fonction du dopage de la base. On a un rendement de collecte supérieur à 98 % dans l'intervalle de longueur d'onde [0-820] nm, le rendement de collecte le plus élevé est obtenu à la concentration de  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ .

### III.4.5. Effet du coefficient stœchiométrique sur les grandeurs photovoltaïques et la réponse spectrale

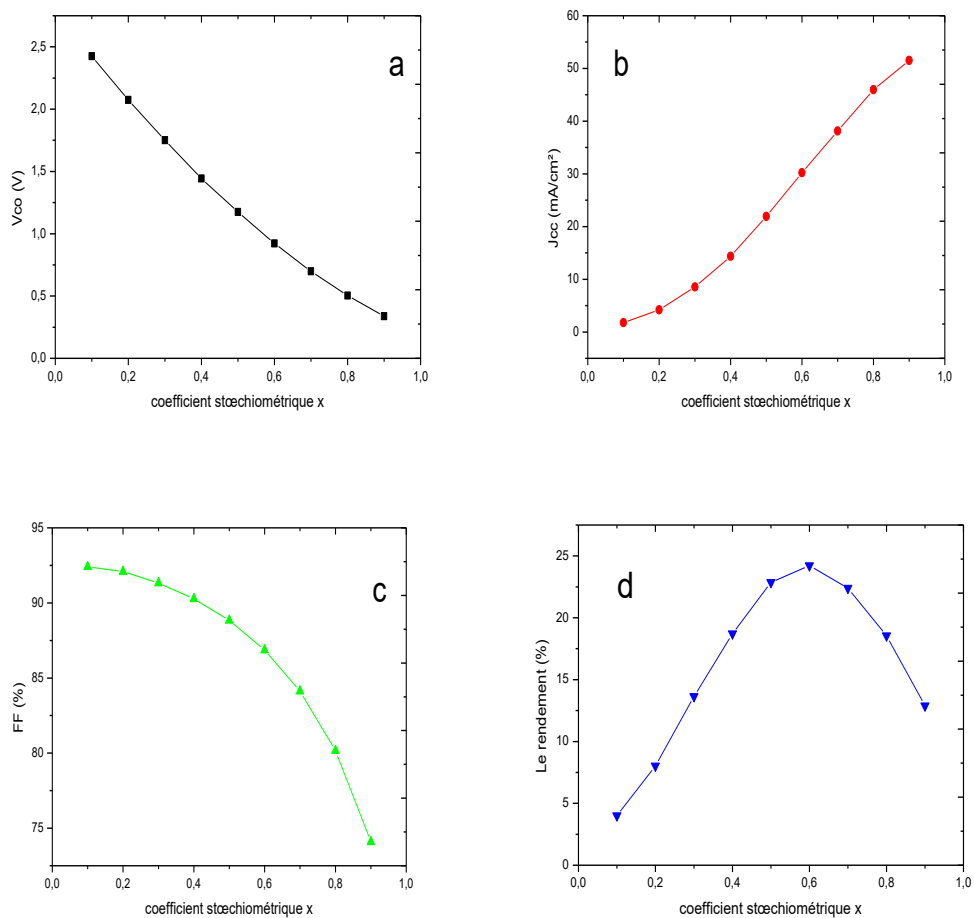
Le tableau III.3 regroupe les paramètres physiques de l'alliage ternaire  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  calculés en fonction du coefficient stœchiométrique de l'indium.

le coefficient stœchiométrique	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$E_g$ (eV)	3.01	2.64	2.30	1.98	1.70	1.44	1.21	1.01	0.84
$\chi$ (eV)	4.27	4.44	4.61	4.78	4.95	5.12	5.29	5.46	5.63
$\epsilon$	10.71	11.14	11.57	12.01	12.44	12.87	13.31	13.74	14.17
$\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1404.3	1514.7	1671.3	1814.4	2023.2	2287.0	2569.3	3028.8	3610.2
$\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ )	182.1	189.3	200.7	217.3	228.8	246.2	265.9	288.17	314.4
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.16 \cdot 10^{18}$	$2.02 \cdot 10^{18}$	$1.88 \cdot 10^{18}$	$1.74 \cdot 10^{18}$	$1.6 \cdot 10^{18}$	$1.46 \cdot 10^{18}$	$1.32 \cdot 10^{18}$	$1.18 \cdot 10^{18}$	$1.04 \cdot 10^{18}$
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.15 \cdot 10^{19}$	$2.5 \cdot 10^{19}$	$2.85 \cdot 10^{19}$	$3.2 \cdot 10^{19}$	$3.55 \cdot 10^{19}$	$3.91 \cdot 10^{19}$	$4.25 \cdot 10^{19}$	$4.6 \cdot 10^{19}$	$4.95 \cdot 10^{19}$

**Tableau III.3** : Variation des grandeurs physiques du  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en fonction du coefficient stœchiométrique d'indium  $x$ .

Les figures suivantes présentent la Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) en fonction de la fraction molaire d'indium.

#### a. sur les grandeurs photovoltaïques



**Figure III.11 :** Variation des paramètres photovoltaïques ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) en fonction de la fraction molaire d'indium  $x$ .

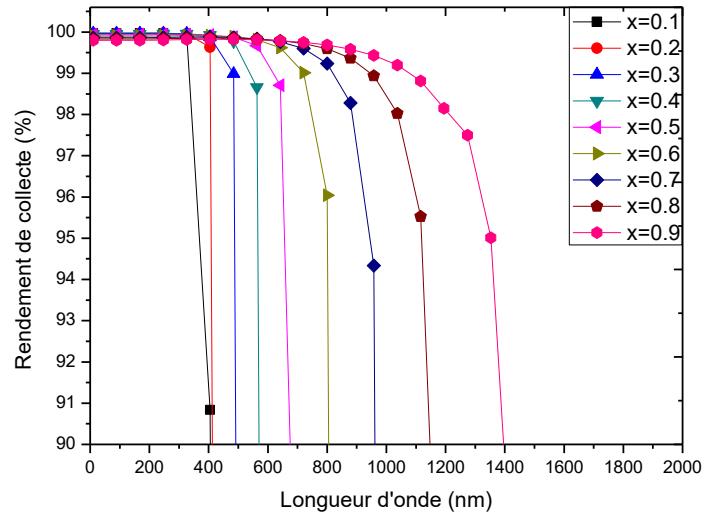
A partir des résultats obtenus des différents graphes, on remarque que la tension de circuit-ouvert et le facteur de forme diminuent en fonction du coefficient stœchiométrique.

Nous remarquons aussi une augmentation de la densité de courant de court-circuit lorsque la concentration molaire d'indium augmente.

Les résultats correspondant à un rendement meilleur ont été obtenus pour la fraction molaire 0.6 d'Indium



## b. sur la réponse spectrale



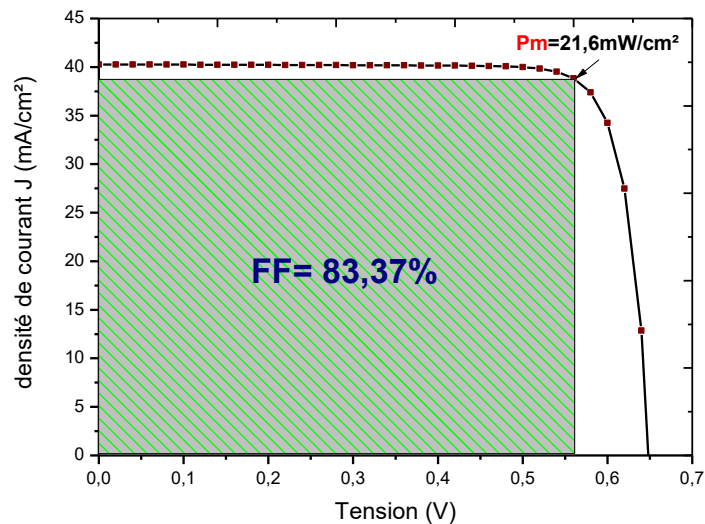
**Figure III.12.** Réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde avec différents coefficients stœchiométriques  $x$ .

On observe que la réponse spectrale s'élargit quand le coefficient stœchiométrique d'indium augmente et le rendement de collecte peut atteindre les 100%. La meilleure réponse spectrale est obtenue pour une valeur du coefficient stœchiométrique grande ( $x=0.9$ ).

Le rendement de collecte le plus élevé est obtenu à la concentration de 0.9 d'indium.

### III.4.6. Caractéristique J(V)

Dans cette partie on va présenter la caractéristique de sortie J(V) de la cellule solaire simulée à base de  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$



**Figure III.13.** Caractéristique J-V de la cellule solaire simulée à base de  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$ .

L'analyse de l'ensemble de nos résultats montre que les grandeurs photovoltaïques pour la cellule solaire à base de  $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{N}$  étudiée, sont les suivantes :

$$V_{CO} = 0.6495 \text{ V}$$

$$J_{CC} = 40.26 \text{ mA/cm}^2$$

$$FF = 83.37\%$$

$$\eta = 21.80\%$$

Ces valeurs sont obtenues pour une épaisseur du front de l'ordre  $0.1 \mu\text{m}$ , un dopage du front de l'ordre de  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ , une épaisseur de la base de l'ordre  $0.5 \mu\text{m}$  et un dopage de  $10^{17} \text{cm}^{-3}$

**Afin d'optimiser le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, les paramètres suivant doivent être pris en considération :**

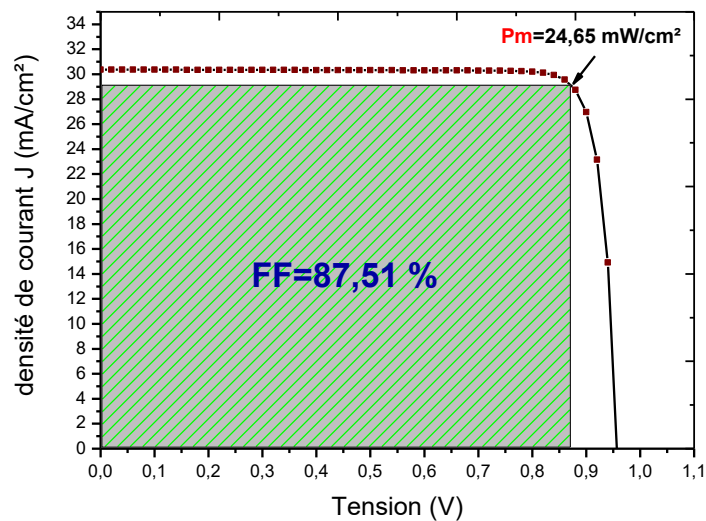
Le coefficient stœchiométrique  $x=0.6$

Epaisseur du front  $=0.1 \mu\text{m}$

Epaisseur de base  $=1.5\mu\text{m}$

Dopage du front  $\text{Na}=10^{21}\text{cm}^{-3}$

Dopage de base  $\text{Nd}=10^{17}\text{cm}^{-3}$



**Figure III.14.** Caractéristique J-V de la cellule solaire optimisée à base d' $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ .

L'analyse de l'ensemble de nos résultats montre que les grandeurs photovoltaïques pour la cellule solaire à base de  $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ , sont les suivantes :

$V_{\text{CO}} = 0.9574 \text{ V}$

$J_{\text{CC}} = 30.37 \text{ mA/cm}^2$

$\text{FF} = 87.51\%$

$\eta = 25.44\%$

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, dans une première partie, nous avons donné un aperçu sur le logiciel SCAPS utilisé dans notre simulation. Ensuite, nous avons simulé la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule monojonction de type PN sous les conditions AM1.5 d'éclairement solaire, avec une étude de l'effet de quelques paramètres tels que le dopage, l'épaisseur, sur les caractéristiques électriques de la cellule qui sont : la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), la densité de courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ), le facteur de forme (FF), le rendement de conversion ( $\eta$ ) et la réponse spectrale.

Cette simulation nous a permis de mieux comprendre la sensibilité et la variation de ces grandeurs en fonction des épaisseurs des régions N et P et de leurs dopages. Pour renforcer les résultats de la simulation, le rendement de collecte pour chaque longueur d'onde du spectre solaire ou encore la réponse spectrale a été tracée en fonction de ces paramètres.

L'analyse de l'ensemble de nos résultats montre que les meilleures grandeurs photovoltaïques sont acquises lorsqu'on choisit une cellule solaire avec un émetteur fortement dopé ( $10^{21}\text{cm}^{-3}$ ), localisé près de la surface d'éclairement ( $0.1\ \mu\text{m}$ ) et une base moyennement dopée ( $10^{17}$  à  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ ), avec une épaisseur de l'ordre  $1.5\ \mu\text{m}$ .

# Conclusion générale

---

D'importantes recherches sont en cours partout dans le monde dans le domaine des énergies renouvelables, en particulier les cellules solaires pour les applications terrestres ou spatiales. L'intérêt croissant porté au développement des cellules solaires ainsi que le souci constant de la recherche en la matière ont été principalement motivés par :

- l'augmentation du rendement de conversion énergétique.
- la réduction du coût de réalisation.

Dans ce travail, nous avons procédé à une simulation d'une cellule solaire conventionnelle à base de matériaux  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , dont l'objectif est l'étude de l'effet des épaisseurs et du dopage sur les caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire. Nous avons utilisé le logiciel de simulation SCAPs 1D qui, nous a permis la visualisation de la caractéristique directe  $J(V)$  de la jonction PN sous les conditions d'éclairement solaire AM1.5.

Les résultats obtenus en simulation, nous ont permis de mieux comprendre l'effet de la variation des paramètres technologiques des régions du front et de la base de la cellule solaire à savoir l'épaisseur et le dopage sur l'évolution des paramètres photovoltaïques.

L'analyse de l'ensemble de nos résultats montre que les meilleures grandeurs photovoltaïques pour le  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  sont obtenues pour une faible épaisseur du front et d'une base relativement plus épaisse, et un fort dopage du front et un dopage moyen de la base, Concernant la réponse spectrale, et pour avoir le maximum de collecte et minimiser les pertes en surface, il faut rapprocher la jonction à la surface d'éclairement le plus possible. En réduisant ainsi l'épaisseur de la face avant à une valeur de  $0.1 \mu\text{m}$ , et en dopant le front avec une densité de  $10^{21}\text{cm}^{-3}$ , on arrive à atteindre un rendement de collecte élevé (>90%), cette

même valeur a été obtenue pour des valeurs de l'épaisseur de la base de l'ordre du 1.5  $\mu\text{m}$  et un dopage de la base de l'ordre de  $10^{17}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

En Résumé des résultats de l'étude de simulation on peut dire que

- La diminution de l'épaisseur de l'émetteur donne un meilleur rendement de conversion de la cellule et une meilleure réponse spectrale pour les longueurs d'onde courtes.
- L'augmentation du courant de court-circuit et du rendement de conversion électrique est possible à obtenir lorsque la profondeur de la jonction est de plus en plus petite (épaisseur réduite du front et de la base).
- dans la base, le meilleur compromis technologique et théorique pour le dopage de la base se situe dans la gamme de  $10^{17}$ - $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  afin de conserver une tension de circuit ouvert adéquate.

Les résultats de notre simulation convergent vers la déduction suivante : de meilleures performances sont acquises lorsqu'on choisit une cellule solaire avec un émetteur fortement dopé, localisé près de la surface d'éclairement (épaisseur du front réduite) et une base moyennement dopée ( $10^{17}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), avec une épaisseur moyenne de l'ordre de 1.5 $\mu\text{m}$ .

Et on constate aussi que le meilleur coefficient stœchiométrique qui nous donne un meilleur rendement est le  $x=0.6$ .

Comme perspectives, et pour améliorer le rendement, on peut envisager des structures multi-jonction InGaN/InGaN avec des différentes concentrations d'indium.

## Bibliographie

---

- [1] Soltane Belakehal, conception et commande machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables, thèse de doctorat, université de Constantine, 2010.
- [2] AHRIZI Roqiya, L'influence du changement climatique sur les performances des Modules photovoltaïques : Site Adrar, mémoire de master, université d'adlar, 2017.
- [3] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 5ème édition, Dunod, 2004.
- [4] <http://tresp.free.fr/effetphotovoltaïque/fonctionnement/fonctionnement.html>
- [5] H. Bennacer, Mémoire de magister, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie (2009).
- [6] h. Hasni, Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire, Mémoire de master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [7] B. Zakaria, pdf, Etude théorique des cellules solaires PV organiques: structure réseau interpénétré polymère conjugué-fullerène et cellules Graetzel, (2014).
- [8] S. Nakamura S and Fasol G 1997 Blue laser diode (Berlin: Springer).
- [9] Sophie Barbet « Etude par microscopie à champ proche de matériaux III-N pour émetteurs électriques planaires », thèse doctorat, Université des sciences et technologies de Lille (2008).
- [10] N. Oleksiy, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon (2005).
- [11] Mémoire de master « Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub> » réalise par Ben Ali Mourad et Rahmouni Seddik, 2018.
- [12] M. Oukachmih, « Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques

discotiques », Thèse de Doctorat, Université Toulouse-Paul Sabatier, 2003.

[13] F. Guillot Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I (2007).

[14] F. Languy Thèse de Doctorat, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Faculté des Sciences de Namur (2007).

[15] A. A. Philippon-Martin Thèse de Doctorat, Université de Limoges (2004).

[16] J. Barjon Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble (2002).

[17] [http://www.worldlingo.com/Nitruure de gallium d'indium.mht](http://www.worldlingo.com/Nitruure%20de%20gallium%20d'indium.mht)

[18] F. Enjalbert Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble (2004).

[19] H. Hamzaoui Sol. Energy Mater. Sol Cells 87 595–603 (2005).

[20] C. Yang, G. Chung, W. Ming, I. Chong, K-H Chen, F. Ren, S.J. Pearton App. Phys. Lett 88.093112 (2005).

[21] O. Ambacher J. Phys. D: Appl. Phys. 31 2653–2710 (1998).

[22] S. X. Li, K. M. Yu, J. Wu, R. E. Jones, W. Walukiewicz, J.W. Ager III, W. Shan, E.E. Haller, Hai Luc, William J. Schaf Physica B 376–377 432–435 (2006).

[23] Th. Gessmann, Y-L E. L, EL. Waldron, J. W. Graff, E. f. Schubert, and

J. k. Sheu Journal of Electronic Materials, Vol, 31, No.5 (2002).

[24] A. Martı, C. Tablero, E. Antoli, A. Luque, R. P. Campion, S. V. Novikov,

C.T. Foxon Sol. Ener. Mater. Sol. Cell 93 641–644 (2009)

[25] Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. Vol. 1 (2008).

[26] Rüdiger Quay Gallium Nitride Electronics (24.25) (2008).

[27] Chih-Yang Chang, Gou-Chung Chi, Wei-Ming Wang, Li-Chyong Chen, Kuei-Hsien

Chen, F. Ren, S. J. Pearton App. Phys. Lett 87,093112 (2005).



[28] G. F. Brown, J. W. Ager, W. Walukiewicz, J. Wu Sol. Ener. Mater. Sol. Cell, 94, 478–483 (2010).

[29] J. Wu, W. Walukiewicz, k. M. Yu, J. W. Ager III, E. E. Haller, Hai lu, William J.Schaff App. Phy. Lette 80, 25 (2002).

[30] W. J. Aziz, K. Ibrahim J. Nan electronics and Materials 3 43-52 (2010).

[31] Md. Tanvir Hassan, Ashraf G. Bhuiyan, Akio Yamamoto Solid-State Electronics 52134-139 (2008).

[32] G. F. Brown, J. W. Ager, W. Walukiewicz, J. Wu Sol. Ener. Mater. Sol. Cell, 94, 478–483 (2010).

[33] Mostfaoui.M thèse de magistère université sidi bel abbas (2010)

[34] P. Jackson, D. Hariskos et al., Prog. Photovolt.: Res. Appl. 19, (2011) 894.

[35] <http://scaps.elis.ugent.be/>.

[36]. Chadel, A. Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS (Doctoral dissertation, 23-10-2018).

[37]. Levtchenko, A. (2019). Étude de dispositifs photovoltaïques à hétérojonctions a-Si: H/c-Si: caractérisations vs. simulations en régime modulé de structures planaires et modélisations optoélectroniques de nanofils à structure radiale (Doctoral dissertation, Université Paris Saclay).