

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

Filière : Électronique

Spécialité : micro-électronique

Présenté par :

AMARA Makhloufia

&

NIA Ibtissam

Simulation et optimisation d'une cellule solaire à base du matériau InGaN

Proposé par :

M.AISSAT Abdelkader

Année Universitaire 2020-2021

Remerciement

Avant tout nous remercions en premier Allah le tout puissant de nous avoir accordé la puissance, la santé, la volonté et le courage pour terminer ce mémoire.

Nous voudrions commencer par remercier tout particulièrement notre cher promoteur le professeur

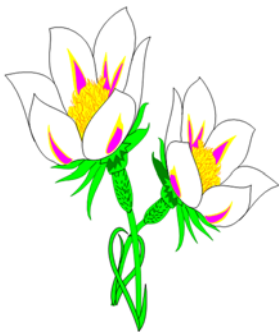
A.Aissat de nos 'avoir permis d'effectuer ce mémoire. Nous les remercions pour leur disponibilité tout au long de ce travail, pour leurs conseils et suggestions avisés sans lesquels ce travail n'aurait pas abouti, ainsi que pour tous leurs efforts pour que ce travail se fasse dans les meilleures conditions.

Nous 'adressons de sincères remerciements à Mr S.Nacer le chef d'option microélectronique, Moumen pour ses conseils et surtout la qualité de son enseignement.

Nous 'adressons nos remerciements à toute personne m'ayant apporté aide et soutien durant la réalisation de ce mémoire.

Evidemment, nous ne pouvons clore ces lignes sans une pensée pour nos proches, notre famille et nos amis. Une attention toute particulière pour tous les enseignants de département

d'ELECTRONIQUE de l'université Saad Dahleb.



∞ Dédicaces ∞

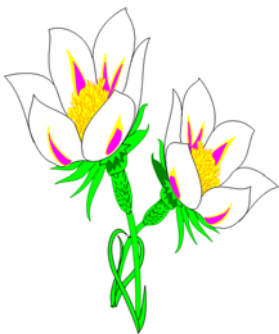
*Je dédie ce travail en signe de respect
A ma très chère mère pour le soutien, l'amour,
la patience,
L'écoute, et la bonne humeur ;
à mes sœur Khadîdja et
Rahil.*

A m'amie mimia.

À tous mes amis et collègues.

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser
ce mémoire ;*

*(A ceux qui me sont chère et ceux que j'aime du
fond de mon cœur.*



N.ibtissame

Je dédie ce travail à,

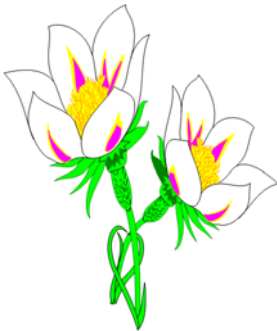
Mon père mohammed , mes mères merieme et khadidja, mes grandes mères et symbole de grands sacrifices, de courage, d'humilité et d'amour sans qui rien de tout ça n'aurait jamais été possible, que Dieu les protège et leur procure une longue vie en bonne santé, et à qui j'espère pouvoir rendre un jour ne serait-ce qu'une partie de tout ce qu'ils m'ont offert ;

Mes sœurs Zohra et Imane, mon cher frère Abdelmalek dont je suis très fière et à qui je me dois de prodiguer le bon exemple à suivre ;

Tous mes amis proches Zahra, Nour, Chaima et Ahlem et mon ami Ahmed de mon cœur qui m'ont accompagnée tout le long de cette expérience unique et qui m'ont aidée par leur présence et leurs conseils ;

Mes enseignants défunts et vivants depuis mon enfance ;

A ceux qui me sont chers et ceux que j'aime du fond de mon cœur.



A.Makhloufia

Résumé

L'énergie photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par des cellules solaires. Selon les besoins, l'électricité produite peut être utilisée pour l'alimentation d'un site isolé ou revendue en tout ou partie au réseau de Distribution. Ce travail consiste à étudier et simuler une cellule solaire à base du matériau InGaN. Après avoir rappelé les caractéristiques d'une cellule solaire, l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule étudiée.

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

ملخص

الخلايا الكهروضوئية تحول الطاقة الضوئية مباشرة الى طاقة كهربائية. الكهرباء المولدة يمكن استخدامها لتزويد المناطق المعزولة او تباع الى شركات التوزيع. هذا العمل هو دراسة و محاكاة الخلايا الشمسية باستعمال المركب InGaN. ثم نذكر خصائص الخلايا الشمسية وندرس تأثير تغيير الخصائص الفيزيائية على خصائص الخلية التي شملتها الدراسة.

الكلمات المفتاحية :

المحاكاة-الخلايا الشمسية-انديوم نتريد الغاليوم

Summary

Photovoltaic energy directly converts Light Energy into electrical energy by solar cells. Depending on requirements, the electricity generated can be used for powering a site or isolates sold in part or in Distribution network. This work is to study and simulate a solar cell based on the InGaN material. After recalling the characteristics of a solar cell, the influence of various parameters on the characteristics of the studied cell.

Keywords: Indium Gallium Nitride, solar cells, simulation

Sommaire :

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	IV
Sommaire	V
Liste des Figures	VII
Liste des Tableaux	IX
Liste des abréviations	X
Introduction générale	1
Chapitra I : Généralité sur les cellules photovoltaïques	
I.1.Introduction	3
I.2. Rayonnement solaire	3
I.3. Le spectre solaire	4
I .4. L'air masse	4
I.5.L'effet photovoltaïque	5
I.6.Définition d'une cellule solaire	5
I.6.1. Principe de fonctionnement d'une cellule	5
I.6.2. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire	6
I .6.3.Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	8
I.7. Paramètres de la cellule solaire	8
I.7.1. Le courant de court-circuit I_{cc}	9
I.7.2.La tension en circuit ouvert V_{co}	10
I.7.3.Puissance maximale P_m	10
I.7.4. Facteur de forme FF	10
I.7.5. Rendement de conversion η	11
I.7.6. Réponse spectrale d'une cellule solaire	11
I.7.7.Le rendement quantique externe EQE	11
I.8.conclusion	12
Chapitre II : Étude du matériau InGaN	
II.1.Introduction	14
II.2.Description du Nitrure de Gallium Indium	14
II.3.La structure cristallographique	14
II.3.1.Structure cristalline	14

II.3.2.La polarisation	15
II.3.2.1.Polarisation spontanée	16
II.3.2.2.Polarisation piézoélectrique (induite)	16
II.3.2.3.Polarisation totale	18
II.3.3.Propriétés mécaniques	20
II.3.4.Propriétés électriques	22
II.3.4.1.Gap d'énergie interdite dans les nitrures	22
II.3.4.3.La mobilité	24
II.3.5.Les propriétés optiques du matériau	26
II.3.5.1.L'indice de réfraction	26
II.3.5.2.la transmittance et la réflexion	28
II.3.5.3.Permittivité	29
II.3.5.4.Coefficient d'absorption	30
II.3.6. Epaisseur critique	32
II.4.conclusion	33
Chapitre III : Simulation et Résultats	
III.1.Introduction	35
III.2.Présentation du logiciel SCAPS-1D	35
III.2.1.Utilisation du logiciel	35
II.1.2.Aperçu théorique	36
II.2.2.Avantages et inconvénients du SCAPS	37
III.3.Description de la structure	38
III.4.Paramètres de simulation	39
III.5.Résultats et interprétations	39
III.5.1.Effet de l'épaisseur de la région P sur les paramètres électrique de la cellule	41
III.5.2.Effet de l'épaisseur de la région N sur les paramètres électrique de la cellule	42
III.6.Conclusion	44
Conclusion général	45
Bibliographie	XI

Liste des Figures :

Chapitre I

Figure I .1 spectre solaire	4
Figure I. 2 Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge)	5
Figure I. 3 La jonction PN	6
Figure I.4 les deux caractéristiques I(V) d'une cellule solaire	7
Figure I.5 Schéma équivalent d'une cellule solaire	8
Figure I.6 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	9

Chapitre II

Figure II.1 Structures cristallines et les séquences d'empilement des plans cristallins du GaN(a) structure wurtzite, (b) structure zinc-blende	15
Figure II.2 Orientation de la polarisation piézoélectrique et de la polarisation spontanée d'une couche d'InGaN polarité Gallium (a) contrainte en tension et (b) contrainte en compression	18
Figure II.3 Orientation de la polarisation piézoélectrique (due à la compression) et de la polarisation spontanée de l'InGaN élaboré sur un pseudo-substrat de GaN	19
Figure II.4 la variation des polarisations a) piézoélectrique b) spontanée c) polarisation totale en fonction de la concentration d'Indium	20
Figure II.5 la déformation de InGaN sur GaN (a) Contrainte en tension (b) Contrainte en compression.	
Figure II.6 la déformation d'InGaN sur GaN en fonction de la concentration d'Indium	21
Figure II.7 La variation (a) d'énergie de gap (b) la longueur d'onde en fonction de la concentration d'indium et la température	24
Figure II.8 la mobilité (a) des électrons(b) des trous (c) totale	26
Figure II.9 la variation de l'indice de réfraction (a) en fonction de la concentration d'Indium et de la température (b) en fonction de la concentration d'Indium et de la longueur d'onde	27

Figure II.10 les interactions rayonnement	28
Figure II.11 la variation des coefficients (a) de la réflexion (b) de la transmission en fonction de la concentration d'indium et la longueur d'onde	29
Figure II.12 la permittivité en fonction de la concentration d'indium et la longueur d'onde	30
Figure II.13 le phénomène de l'absorption	31
Figure II.14 l'évolution de Coefficient d'absorption (a) avec la concentration et la température (b) avec la concentration et la température	32
Figure II.15 l'évolution épaisseur critique en fonction de la concentration d'Indium	33
Chapitre III	
Figure III.1 Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS	35
Figure III.2 la structure InGaN(p)/InGaN(n) d'une cellule uni-jonction	38
Figure III.3 Caractéristique J(V) et P(V) de la cellule PN en InGaN	40
Figure III.4 Rendement quantique sous AM1.5G de la cellule PN en In _{0.65} Ga _{0.35} N	40
Figure III.5 l'effet de l'Épaisseur w_p avec $w_n = 270\text{nm}$ sur (a) J_{cc} et V_{co} (b) FF et η	42
Figure III.6 L'effet de l'épaisseur w_n avec $w_p = 130\mu\text{m}$ sur (a) J_{cc} et V_{co} (b) FF et η	44

Liste des Tableaux :

Chapitre II

Tableau II.1 Paramètres structuraux a pour le GaN et l'InN	15
Tableau II.2 Valeurs de la polarisation spontanée pour le GaN et l'InN	16
Tableau II.3 Constantes piézoélectrique du GaN et de l'InN	17
Tableau II .4 les paramètres de la formule empirique (Varshni) de InN et GaN	23
Tableau II.5 les paramètres de la loi de la mobilité	25

Chapitre III

Tableau III.1 l'épaisseur et le dopage de la structure étudiée	39
Tableau III.2 les paramètres d'In _{0.65} Ga _{0.35} N utilisés pour la simulation	39
Tableau III.3 Paramètres de sortie de la cellule	41
Tableau III.5 L'effet de l'épaisseur w_p sur les caractéristiques de la cellule	41
Tableau III.5 L'effet de l'épaisseur w_n sur les caractéristiques de la cellule	43

Liste des abréviations

Symbole	Désignation	Unités
ZCE	La zone de charge d'espace	
I	Courant	A
I_{ph}	Le photo-courant	A/cm^2
I_d	Courant traversant la diode	A
I_s	Courant de saturation	A
R_s	La Résistance série	Ω
R_{sh}	La Résistance parallèle	Ω
J_{cc}	Le courant de court-circuit	A/cm^2
V_{co}	La tension en circuit-ouvert	V
P_m	La puissance électrique maximale	mW/cm^2
V_m	Tension correspondante à la puissance maximale fournie	V
I_m	Courant correspondante à la puissance maximale fourni	mA/cm^2
FF	Le facteur de forme	%
η	Le rendement de conversion de la cellule	%
EQE	Le rendement quantique externe	%
E_g	Gap d'énergie interdite d'un matériau	eV
λ	Longueur d'onde d'un photon	nm
C	la vitesse de la lumière=3.108	m/s
h	Constante de Planck= 6,62.10 ⁻³⁴	J.s
ν	la fréquence de la longueur d'onde associée au photon	s^{-1}
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
E	l'énergie du photon	eV
n	La densité des électrons	cm^{-3}
p	La densité des trous	cm^{-3}
μ_e	La mobilité des électrons	$cm^2 .V^{-1} .s^{-1}$
μ_h	La mobilité des trous	$cm^2 .V^{-1} .s^{-1}$
k	Constante de Boltzman= 8,617×10 ⁻⁵	$eV.K^{-1}$
q	La charge élémentaire =1.6.10 ⁻¹⁹	C
T	Température	K
ϵ_r	La permittivité relative	s.d
ϵ_0	La permittivité du vide=8,85×10 ⁻¹²	$F.m^{-1}$
w	L'épaisseur	μm
D	Coefficient de diffusion des porteurs	$cm^2 .s^{-1}$
N_A	Densité de dopants accepteurs	cm^{-3}
N_D	Densité de dopants donneurs	cm^{-3}
ξ	Le Champ électrique	$V.m^{-1}$
\vec{J}_n	Le vecteur de la densité des courants des électrons	A/cm^2
\vec{J}_p	Le vecteur de la densité des courants des trous	A/cm^2

Introduction générale

L'industrie des cellules solaires s'est développée autour du silicium, le matériau le plus couramment utilisé pour les applications terrestres en raison de son faible coût. Cependant, quelques années, cette même industrie s'intéresse à d'autres matériaux répondant aux normes de rendement élevé, de poids et de durées de vie importantes exigées par les applications spatiales. Les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (sur au moins 20 ans). De nouveaux matériaux ont vu le jour, tel que le Nitrure d'Indium Gallium «InGaN» qui a subi des recherches approfondies depuis 2002 en tant que matériau photovoltaïque. En faisant varier la composition de nitrure d'indium et de nitrure de gallium au sein de l'InGaN, la bande interdite de ce matériau semi-conducteur peut être changée. La gamme de bande interdite de l'InGaN coïncide avec la partie visible du spectre solaire. Ainsi, une cellule solaire à haut rendement peut être développée par l'utilisation de multicouches de l'InGaN. Notre problème est de connaître les propriétés du matériau InGaN pour avoir un bon fonctionnement et la meilleure performance pour les applications photovoltaïques, on utilise le programme Matlab dans le cadre d'étude les propriétés d'InGaN, puis le logiciel SCAPS-1D est donner les caractéristiques d'une cellule solaire homojonction à base de ce matériau.

L'objectif de notre travail est la simulation d'une cellule solaire à base du nitrure d'Indium Gallium InGaN.

- Le premier chapitre présente les caractéristiques d'une cellule solaire et les types du Cellule photovoltaïque à base d'InGaN
- Le deuxième chapitre présente les matériaux semi-conducteurs III-V ainsi que les principales propriétés des nitrures de Gallium Indium «InGaN».
- le troisième chapitre présente les résultats de simulation d'une structure à base de matériau InGaN.



Chapitra I :
**Généralité sur les cellules
photovoltaïques**

I.1.Introduction

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable (le soleil) en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Cette transformation d'énergie est réalisée par les cellules solaires en produisant du courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. Au cours de l'éclairage de la cellule (jonction), un certain nombre de processus physiques se produit,

- 1) Absorption de photons avec l'énergie $h\nu > E_g$. Où h est la constante de Planck, ν la fréquence.
- 2) Génération de paires de porteurs de charge électron et trou.
- 3) Migration des porteurs de charge (diffusion).
- 4) Séparation des porteurs de charge induits par le champ électrique interne.

La séparation de charge entraîne l'apparition d'une tension électrique sur les électrodes de la cellule solaire [1].

Dans ce chapitre, on va parler sur l'effet photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule solaire, puis ces caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ et les paramètres de sortie qu'ils sont : le courant de court-circuit $I_{cc}(A)$, la tension du circuit ouvert $V_{co}(V)$, la puissance maximale $P_m(W)$ et le rendement quantique externe $EQE(\%)$ et interne $IQE(\%)$.

I.2. Rayonnement solaire

Les ondes émises par le soleil appelé un rayonnement électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est liée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation [2] :

$$E = h \times \nu = \frac{h c}{\lambda} \quad (I.1)$$

Avec :

- h : la constante de Planck [$4,136 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$].
- ν : fréquence du photon [Hz].
- c : la vitesse de la lumière dans le vide [$299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$].

- λ : la longueur d'onde du photon [m].

I.3. Le spectre solaire :

Le spectre électromagnétique est la décomposition en longueurs d'ondes de rayonnement électromagnétique, Les ondes lumineuses comprennent les radiations visibles, ultraviolettes et infrarouges, ce qui correspond globalement au spectre solaire.

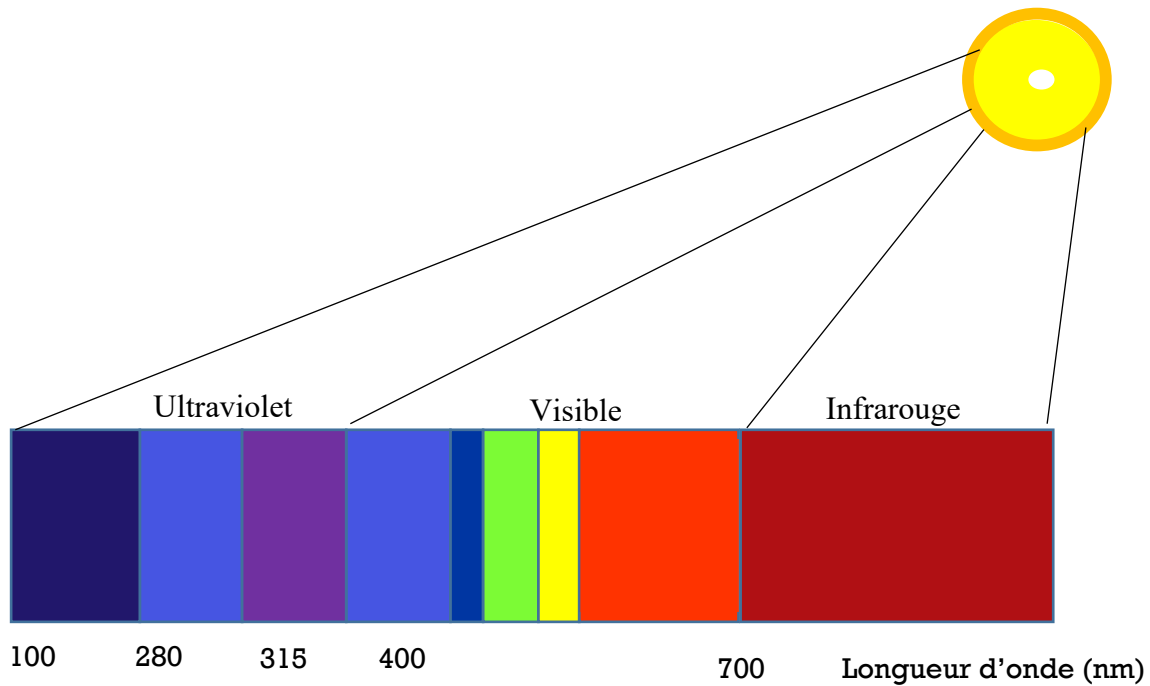


Figure I .1 spectre solaire [3].

I.4. L'air masse :

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 μm . L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets $< 0.4 \mu m$.
- 47% dans la bande visible 0.4 à 0.8 μm .
- 44% dans la bande des infrarouges $> 0.8 \mu m$.

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kw / m² avec un spectre centré au voisinage de $\lambda = 0.48 \mu m$ [3].

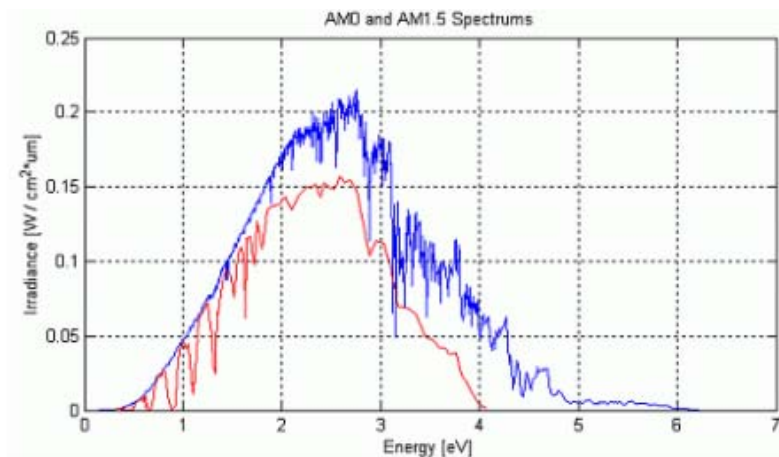


Figure I. 2 Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge)[4].

I.5.L'effet photovoltaïque :

La conversion de la lumière en électricité définit l'effet photovoltaïque. Les semi-conducteurs sont les principaux matériaux qui le présentent. Ces matériaux ont la caractéristique d'être de mauvais conducteurs et de mauvais isolants. Ils peuvent être caractérisés par leur gap d'énergie interdite, E_g , c'est-à-dire l'énergie à partir de laquelle ils deviennent absorbants et produisent de l'électricité quand ils sont éclairés par une lumière [4].

I.6. La cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur. Elle est responsable de la conversion instantanée de l'énergie de la lumière en énergie électrique par l'effet photovoltaïque.

I.6.1. Principe de fonctionnement d'une cellule :

Les matériaux N et P sont des matériaux dopés, ils possèdent un excès de porteurs libres, des électrons pour le matériau N et des trous pour le matériau P. Ces porteurs sont appelés majoritaires. À l'inverse, les trous dans le matériau N et les électrons dans le matériau P sont appelés les porteurs minoritaires. Les matériaux N et P sont électriquement neutres. Dans cet exemple, le matériau N est plus fortement dopé que le matériau P. De plus, nous avons choisi un matériau P possédant une affinité électronique et un gap d'énergie plus grands que ceux du matériau N. Quand ces deux matériaux sont mis en contact les niveaux de Fermi s'équilibrent et les charges opposées s'attirent grâce au phénomène de diffusion.

Les électrons vont dans le matériau de type P (inversement, les trous vont dans le matériau de type N) et se recombinent avec un trou (électron). Les porteurs qui ont diffusé laissent donc des ions derrière eux qui ne sont plus compensés, des cations dans le type N et des anions dans le type P.

Ces ions créent un champ électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs. On atteindra alors un équilibre entre diffusion des porteurs libres et champ électrique décrivant une zone chargée électriquement, appelée zone de charge d'espace (ZCE) ou zone de déplétion. Sa largeur dépend du dopage et est délimitée dans le schéma par x_n et x_p . La chute de potentiel entre les matériaux N et P, (V_D est appelée potentiel de diffusion. Du fait de la différence d'affinité électronique et de gap entre les deux matériaux, des discontinuités de bandes se créent à l'interface, ΔE_c et ΔE_v .

Ces dernières peuvent créer des barrières pour les porteurs et ainsi limiter les performances du composant [4].

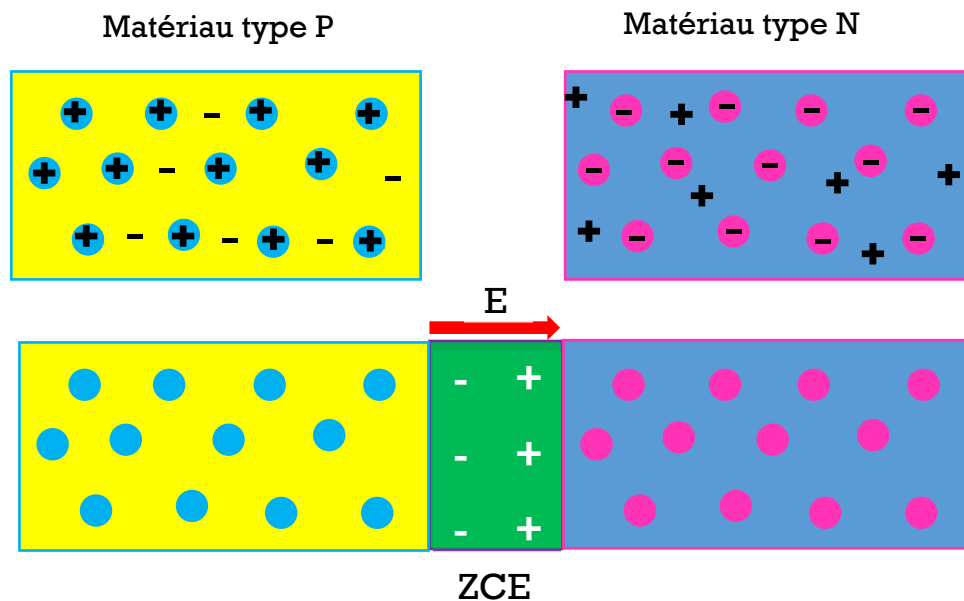


Figure I .3 La jonction PN [4].

I.6.2. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire :

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode. Sa caractéristique $I(V)$ correspond à la soustraction du photo-courant et du courant de la diode à l'obscurité par [3] :

$$I(V) = I_{ph}(V) - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q.v}{k.T}} - 1 \right) \quad (I.2)$$

Avec :

- I_{ph} : la densité de courante photo générée [A].
- I_{obs} : la densité de courant d'obscurité [A].
- I_s : le courant de saturation de la diode [A].
- q : La charge élémentaire.

- k : La constante de Boltzmann ($k=8,62.10^5$ eV/K).
- T : La température [K].

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la Figure I.4 les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein. On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur I_{cc} , qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur V_{co} , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité [4].

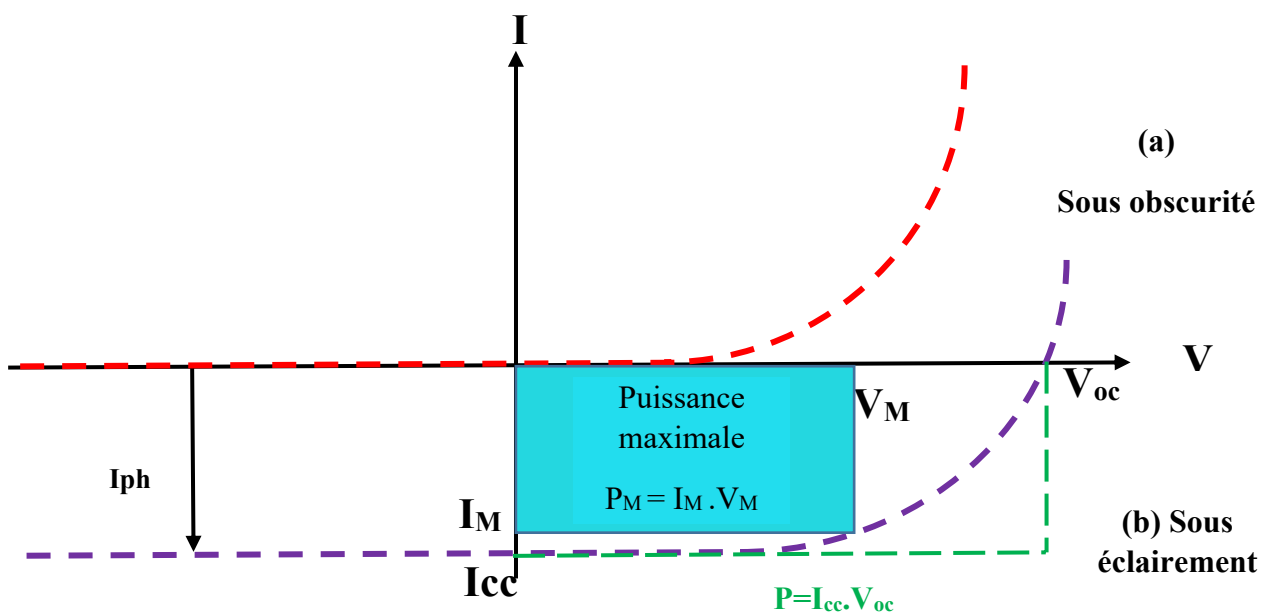


Figure I.4 les deux caractéristiques $I(V)$ d'une cellule solaire (a) sous l'obscurité (b) sous éclaircissement [5].

I.6.3. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire réelle peut être schématisée par Figure 1.5. Elle propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photo généré opposé au courant d'obscurité $I_{obs} = I_d$ de la diode polarisée en direct, ainsi que R_s , R_{sh} la résistance shunt, R_s , la résistance série est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur). Cette résistance doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en diminuant la résistivité du matériau utilisé.

R_{sh} , la résistance shunt (parallèle) traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette résistance devra être la plus élevée possible [5].

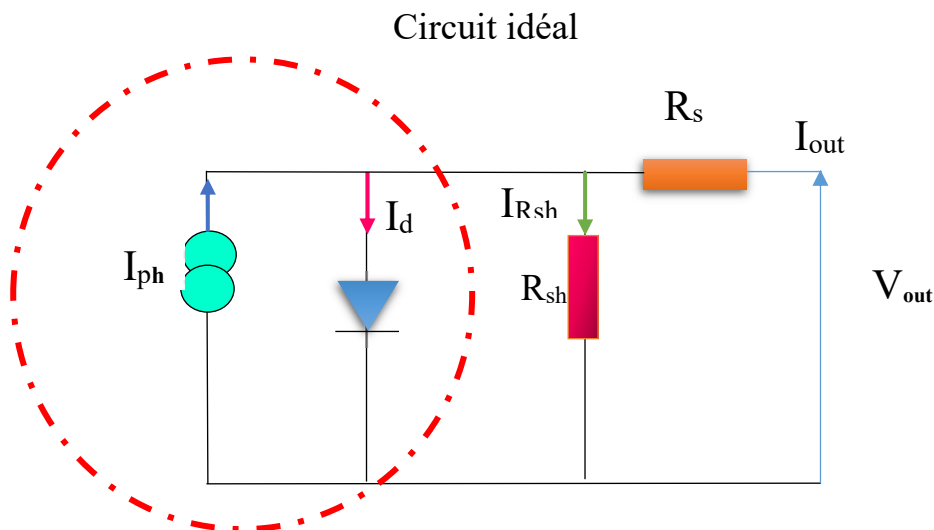


Figure 1.5 Schéma équivalent d'une cellule solaire [4].

I.7. Paramètres de la cellule solaire :

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension (I-V) (Figure I.6) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

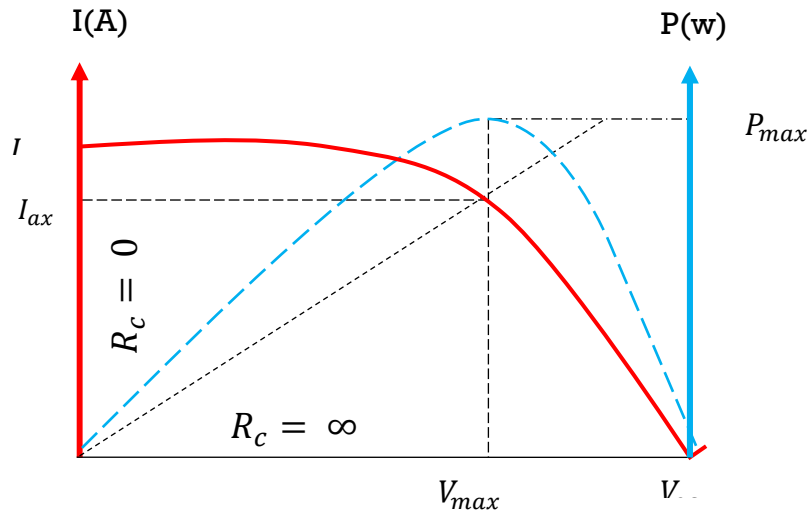


Figure I.6 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [5].

Les trois grandeurs physiques qui définissent cette courbe sont :

- V_{co} : Tension en circuit ouvert, cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- J_{cc} : Courant court-circuit, cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- P_m : Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}) Ces paramètres sont définis par :

I.7.1. Le courant de court-circuit I_{cc} :

On exprimer le courant I en fonction de la tension appliquée V de manière générale avec l'expression [6]:

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V + R_s I_p)}{n_{id} K T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I_p}{R_p} \quad (I.3)$$

Avec :

- I_s : le courant de saturation [A].
- R_s : la résistance série du circuit [Ω].
- R_p : la résistance parallèle du circuit [Ω].
- n_{id} : le coefficient d'idéalité de la diode, typiquement $n_{id}=1.1-1.5$.

- I_{ph} : le courant photo générée [A].

Si l'on fait l'hypothèse que la résistance série est petite et la résistance shunt est grande, peut se ramener il [6]:

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV}{n_{id}KT}} - 1 \right) \quad (I.4)$$

Avec :

- I_s : le courant de saturation [A].
- n_{id} : le coefficient d'idéalité de la diode, typiquement $n_{id}=1.1-1.5$.
- I_{ph} : le courant photo généré $I_{ph}=I_{cc}$ [A].

I.7.2.La tension en circuit ouvert V_{co} :

On en déduit la tension de circuit ouvert, par annulation du courant [6]:

$$V_{co} = \frac{n_{id}KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.5)$$

I.7.3.Puissance maximale P_m :

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même . Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit [7] :

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (I.6)$$

I.7.4. Facteur de forme FF:

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée $P_m=P_{max}$) pour un point de fonctionnement P_m ($I_m= I_{max}$, $V_m= V_{max}$) de la courbe courant-tension (Figure I.4). Le facteur de forme est défini par la relation suivante [7]:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.7)$$

1.7.5. Rendement de conversion η :

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [7] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF.V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.8)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($V=V_{co}$, $P_m = \infty, I=0$), ou en court-circuit ($R_c = 0$, $I=I_{cc}$, $V=0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée [3] $P_m = P_{max}$ (figure 1.4).

1.7.6. Réponse spectrale d'une cellule solaire :

La réponse spectrale R_s d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale R_s est donnée par la relation suivante [8]:

$$RS(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P_{in}} \text{ (A/W)} \quad (I.9)$$

1.7.7. Le rendement quantique externe EQE :

Le rendement quantique externe EQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par [9] :

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda) \cdot \left(\frac{hc}{\lambda \cdot q}\right) \quad (I.10)$$

Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe EQE par l'équation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (I.11)$$

Où $R(\lambda)$ représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde [9].

I.8.conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base relatives au rayonnement solaire, tels que le spectre solaire et l'air masse pour produire une conversion photovoltaïque. Nous avons décrit la cellule solaire, ses différents constituants, ses différents paramètres électriques (rendement, facteur de forme, le courant de court-circuit, ...) et les expressions de base qui gouvernent tous les phénomènes physiques internes permettant la génération du photo-courant. Nous avons aussi présenté son circuit équivalent, ainsi que ses différents montages constituant le panneau solaire.



Chapitre II :
Étude du matériau InGaN

II.1.Introduction

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'élément et de composés semi-conducteurs.

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électroniques et optiques. La plus grande partie des composants (transistors, diodes, et ce qu'on appelle puce en générale) sont réalisés en silicium qui joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés.

En électronique rapide et en optoélectronique, les propriétés du silicium sont insuffisantes (mobilités des porteurs relativement petites et transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique). Dans de telles applications, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs. Parmi ces semi-conducteurs, on trouve principalement le nitrure de gallium-indium (InGaN) qui est au centre de ce travail. Dans ce chapitre, on va étudier les propriétés structurales, mécaniques, électriques et optiques D'InGaN on utilisant le programme Matlab pour la simulation.

II.2.Description du Nitrure de Gallium Indium :

Le nitrure de Gallium-Indium (InGaN) est un semi-conducteur constitué d'un mélange de nitrure d'Indium et de nitrure de Gallium. Ce matériau faisant partie des composés III-V, c'est-à-dire, composés d'Azote et d'un ou plusieurs éléments de la colonne III (Bore, Gallium, Aluminium, Indium, etc.) du tableau périodique de Mendeleïev [10].

Ces matériaux nitrures-III sont activement étudiés parce qu'ils représentent une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance [11].

II. 3.La structure cristallographique :

II.3.1.Structure cristalline :

Les nitrures GaN et InN se présentent sous deux formes cristallines essentielles : la structure hexagonale « wurtzite » et la structure cubique « zinc -blende ». Dans les conditions ambiantes, la structure la plus stable thermodynamiquement est la structure hexagonale « wurtzite » (Figure II.1).

Cette structure est définie par trois paramètres, la largeur d'un côté hexagonale a , la hauteur de la maille élémentaire c , et le paramètre interne u .

La deuxième structure dite « zinc-blende » (Figure II.1) est constituée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, l'un est constitué d'un élément III et l'autre d'un élément V. Le tableau II.1 présente les paramètres de maille des nitrures GaN et l'InN pour les deux structures [12].

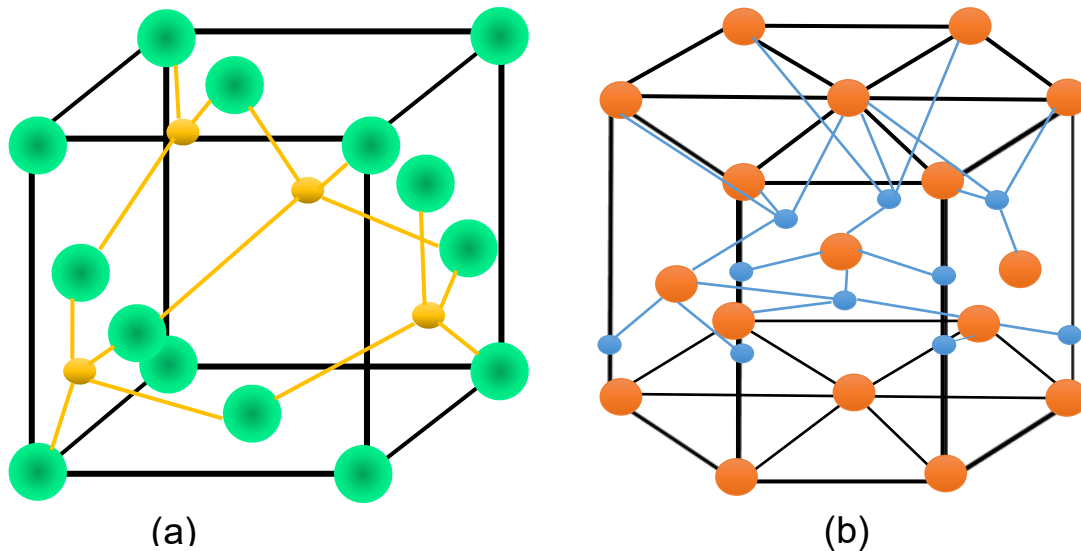


FIGURE II.1 Structures cristallines et les séquences d'empilement des plans cristallins du GaN. (a) structure wurtzite, (b) structure zinc-blende [13].

Tableau II.1 Paramètres structuraux a pour le GaN et l'InN [14,15].

Structure zinc-blende	GaN	InN
a [Å]	4.47	4.96

II.3.2.La polarisation :

La non superposition des barycentres des charges positives avec celui des charges négatives dans les structures wurtzites des conséquences importantes sur les propriétés de polarisation. Deux types de polarisations sont ainsi observés dans les nitrures d'éléments III, l'une existant à l'équilibre (la polarisation spontanée), l'autre sous l'action d'une contrainte extérieure (la polarisation piézoélectrique) [16].

II.3.2.1. Polarisation spontanée :

La polarisation spontanée va séparer spatialement les électrons et les trous réduisant ainsi la probabilité de recombinaisons radiatives, la polarisation va améliorer les performances du composant s'il s'agit de collecter les porteurs ou alors limiter le rendement s'il s'agit d'émettre de la lumière et créer ainsi une accumulation de charges aux extrémités de la couche perpendiculairement à l'axe c (interface substrat/couche épitaxie ou surface de la couche épitaxie) qui peut modifier les propriétés électriques du matériau. Il est donc important de connaître le sens de cette polarisation afin de pouvoir la contrôler [17].

Dans le cas du matériau ternaire $\text{In}_x \text{Ga}_{(1-x)} \text{N}$, la polarisation spontanée est décrite par une relation non linéaire reliant la composition et les valeurs des constantes P_{sp} des deux binaires GaN et InN sont représentées dans le Tableau II.2.

L'expression de la polarisation spontanée d'InGaN est donnée par la loi de Vegard [18]:

$$P_{sp}(\text{InGaN}) = x \cdot P_{sp}(\text{InN}) + (1 - x) \cdot P_{sp}(\text{GaN}) - b \cdot x \cdot (1 - x) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- x : la concentration en indium dans l' $\text{In}_x \text{Ga}_{(1-x)} \text{N}$.
- $P_{sp}(\text{InGaN})$: la polarisation spontanée de l'InGaN [C m^{-2}].
- $P_{sp}(\text{InN}), P_{sp}(\text{GaN})$: la polarisation spontanée des binaires InN et GaN [C m^{-2}].
- b : le paramètre de courbure de la polarisation spontanée dans l'InGaN $b = 0.0037 \text{ C m}^{-2}$ [18,19].

Tableau II.2 Valeurs de la polarisation spontanée pour le GaN et l'InN.

	GaN		InN	
	Bernardini et al [20]	Vurgaftman et al [21]	Bernardini et al [20]	Vurgaftman et Meyer [21]
$P_{ps} [\text{C m}^{-2}]$	-0.029	-0.034	-0.032	-0.042

II.3.2.2. Polarisation piézoélectrique (induite) :

Outre la polarisation interne, les nitrures-III possèdent également un caractère piézoélectrique. Cet effet est défini comme la création d'un champ électrique suite à une déformation mécanique, et réciproquement comme la création de déformations mécaniques lorsqu'on applique un champ

électrique à un matériau. Il est dû au manque de symétrie dans la structure cristalline, à la nature fortement ionique des liaisons chimiques et aux déformations présentes dans le cristal (dues au désaccord de maille entre le matériau et le substrat, par exemple. Ce type de polarisation peut être calculé à partir de la formule suivante [22]:

$$P_{pz} = 2 \cdot \epsilon_{xx} \cdot \left(e_{31} - \frac{e_{33} \cdot c_{13}}{c_{33}} \right) = 2 \cdot \left(\frac{a - a_0}{a_0} \right) \cdot \left(e_{31} - \frac{e_{33} \cdot c_{13}}{c_{33}} \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- ϵ_{xx} : l'allongement relatif du matériau dans le plan de croissance.
- e_{31}, e_{33} : les constantes piézoélectriques [C m^{-2}].
- c_{13}, c_{33} : les constantes élastiques [GPa].
- a, a_0 : les paramètres de maille dans le plan de la structure contrainte et à l'équilibre [\AA].

La polarisation piézoélectrique des nitrures d'élément III est donc négative si la structure est en tension sur son substrat ($a < a_0$) et positive dans le cas contraire ($a > a_0$).

Tableau II.3 Constantes piézoélectrique du GaN et de l'InN.

	$e_{31} (\text{cm}^{-2})$	$e_{33} (\text{cm}^{-2})$	$c_{13} (\text{GPa})$	$c_{33} (\text{GPa})$
GaN	-0.49 [24]	0.73 [24, 25]	106 [26]	398 [25]
	-0.32 [25]		121 [27]	182 [25]
			92 [26]	224 [26]
			96 [27]	324 [27]
			100 [28]	392 [28]
InN	-0.57 [24]	0.97 [24]	92 [23]	224 [23]
			94 [15]	200 [28]

D'après les études théoriques menées par Bernardini et Fiorentini [29], la polarisation piézoélectrique de l'alliage InGaN pourrait être décrite par une loi de Vegard du type [29] :

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

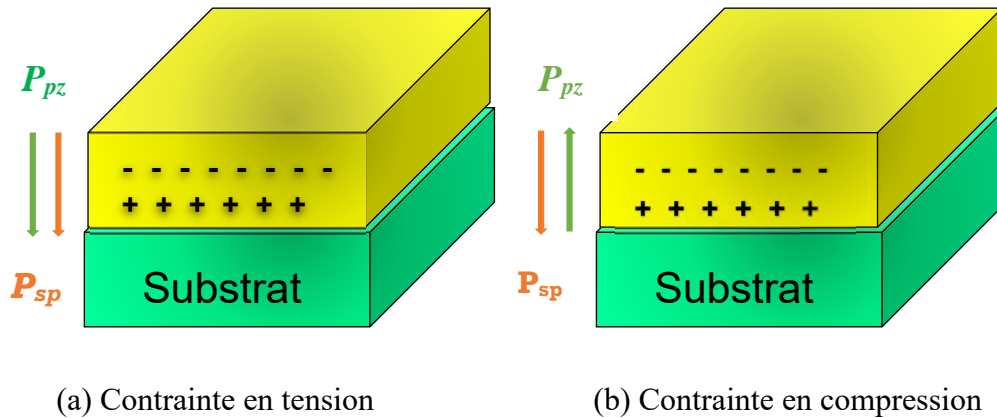


Figure II.2 Orientation de la polarisation piézoélectrique et de la polarisation spontanée d'une couche d'InGaN polarité Gallium (a) contrainte en tension et (b) contrainte en compression [5].

II.3.2.3. Polarisation totale :

En l'absence de polarisation externe, la polarisation totale dans un matériau à structure wurtzite est égale à la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique par contre dans la structure zinc-blende, la polarisation piézoélectrique est négligeable [30]:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{sp}} + P_{\text{pz}} \quad (\text{II.4})$$

Elle peut être positive ou négative et son orientation est elle-même définie selon que la structure est en tension ou en compression. En effet, dans le cas où le cristal est en tension, la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique sont de même sens et la polarisation totale s'en trouve augmentée. Par contre, si le cristal est en compression, les deux polarisations sont de sens opposés et la polarisation totale diminue. Une représentation schématique de l'orientation des différentes polarisations dans le cas d'InGaN/GaN (structure en compression) est présentée sur la Figure II.3.

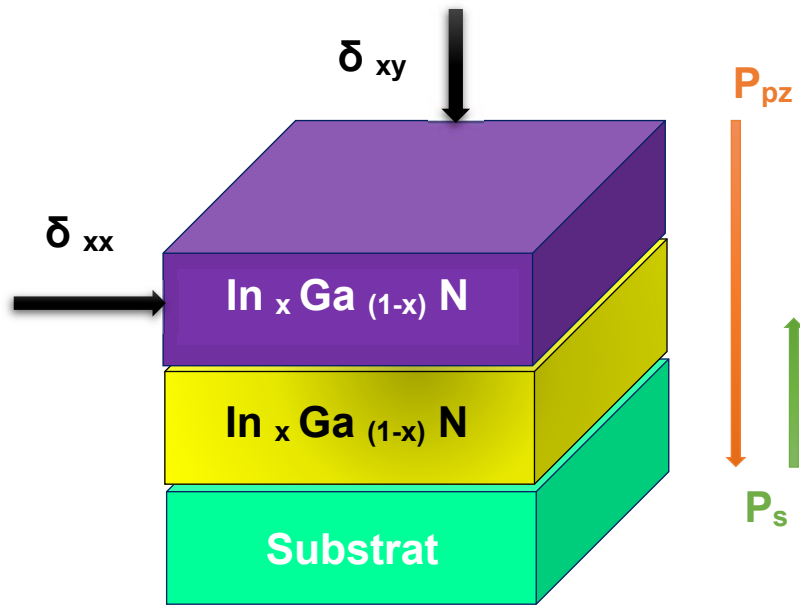
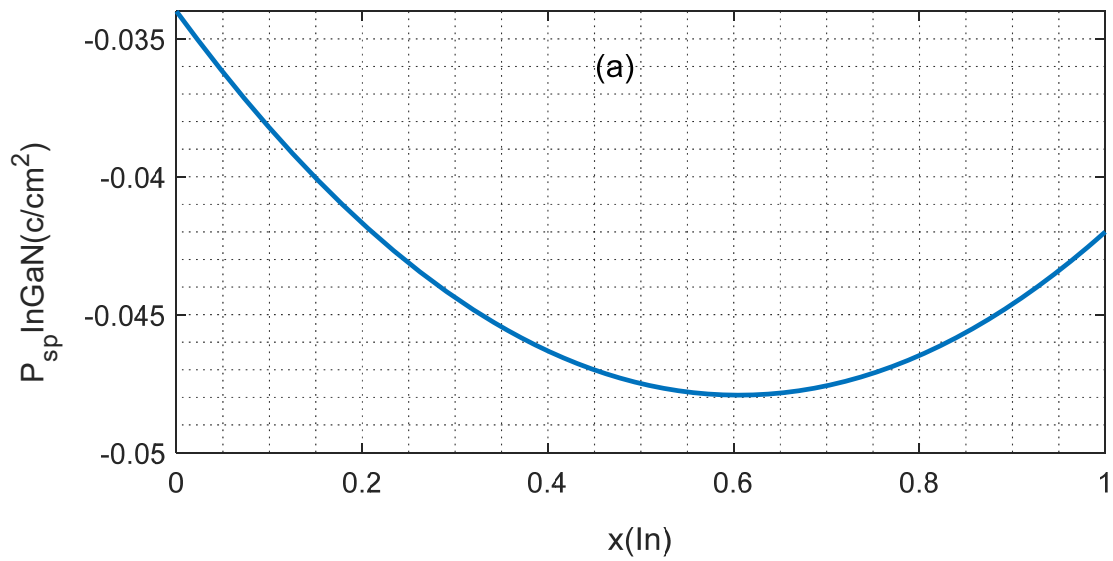


Figure II.3 Orientation de la polarisation piézoélectrique (due à la compression) et de la polarisation spontanée de l'InGaN élaboré sur un pseudo-substrat de GaN [6].



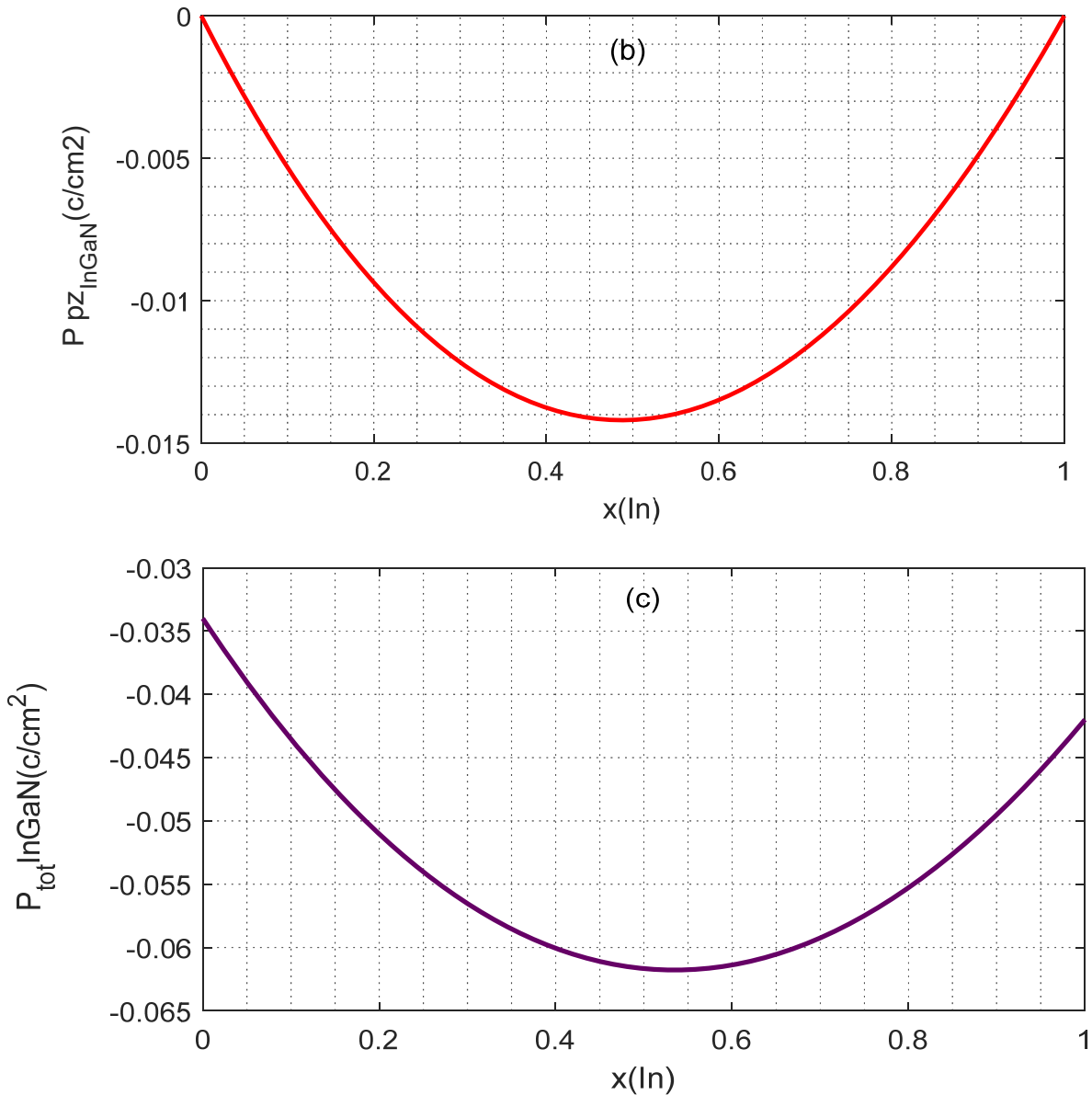


Figure II.4 la variation des polarisations a) piézoélectrique b) spontanée c) polarisation totale en fonction de la concentration d'Indium.

Les courbes ci-dessus (Figure II.4) ayant une forme parabolique, ainsi que les valeurs des trois polarisations sont négatives ce qui implique que le matériau est en compression.

II.3.3. Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques d'un matériau peuvent être déduites à partir de la déformation d'un matériau, ε , liée à une force qui lui est appliquée [31] :

$$\varepsilon = \frac{(a-a_0)}{a_0} \tag{II.5}$$

Avec :

- a_0 : le paramètre de maille de la couche InGaN [\AA].
- a : le paramètre de maille du substrat GaN [\AA].

Ainsi, si le matériau est en tension, la déformation sera positive, et inversement, si le matériau est en compression, la déformation sera négative.

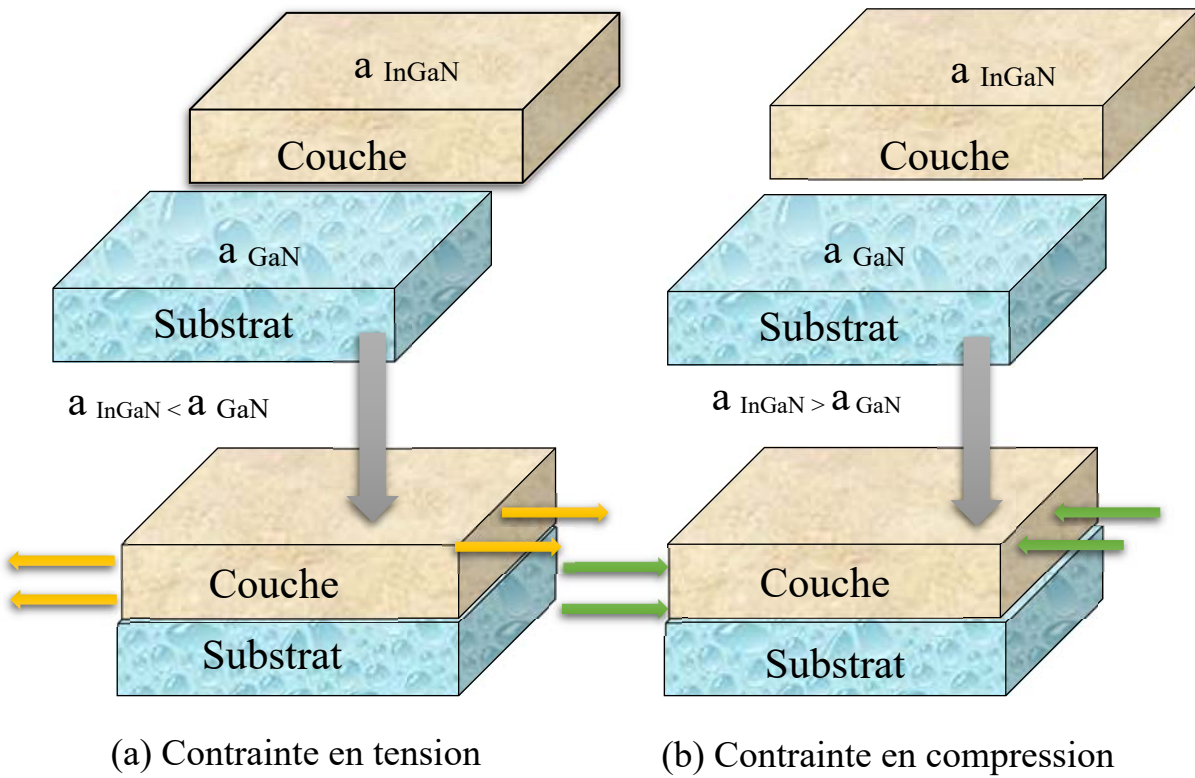


Figure II.5 la déformation de InGaN sur GaN (a) Contrainte en tension (b) Contrainte en compression[6].

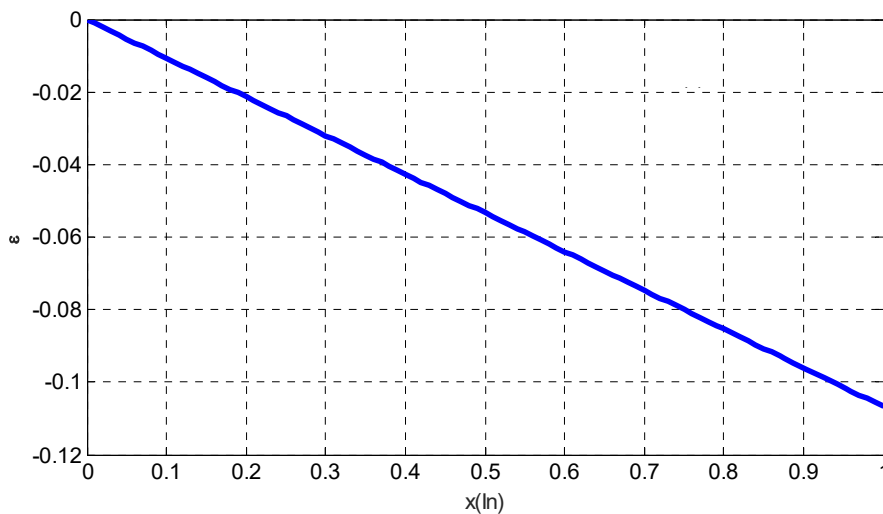


Figure II.6 la déformation d'InGaN sur GaN en fonction de la concentration d'Indium.

La figure représente la déformation de InGaN sur GaN en fonction de la concentration d'Indium, on remarque que ϵ est négative alors le matériau en compression. Cette courbe définie pour quelle valeur de la concentration d'Indium, la déformation prend une petite valeur pour éviter la dislocation, par exemple pour une déformation inférieure ou égale à 2%, la concentration reçoit inférieure ou égale à 18 %.

II.3.4. Propriétés électriques :

II.3.4.1. Gap d'énergie interdite dans les nitrures :

La caractéristique principale pour laquelle les nitrures sont tant étudiés est leur gap d'énergie interdite direct, y compris à travers leurs alliages. Ceci permet d'avoir de meilleurs rendements de conversion ou d'émission de lumière, pour le photovoltaïque ou pour les LEDs, par exemple. De plus, leurs alliages permettent de couvrir quasiment tout le spectre solaire, de l'infrarouge (IR) à l'ultraviolet (UV).

Le gap d'énergie interdite est de 3.42 eV pour le GaN et de 0.7 eV pour l'InN à température ambiante 300 K.

Les paramètres de maille des alliages ternaires de nitrures d'éléments III peuvent être calculés selon la loi de Vegard qui relie la composition et les valeurs des paramètres de maille de l'alliage avec celles des composés binaires correspondants dans le cas où aucune contrainte ne déforme le réseau (le matériau est dit totalement relaxé). Dans le cas du ternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$, ces paramètres peuvent être calculés selon les expressions suivantes [32,33]

$$E_{g\text{InGaN}} = (1-x) \cdot E_{g\text{GaN}} + x \cdot E_{g\text{InN}} - b \cdot x \cdot (1-x) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- x : la concentration d'Indium dans l' $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ [s.d].
- b : le paramètre de courbure [eV] $b=1.43$ eV.
- $E_{g\text{InGaN}}, E_{g\text{GaN}}, E_{g\text{InN}}$: l'énergie de gap de l'InGaN, GaN et InN respectivement.

II.3.4.2. Evolution l'énergie de gap en fonction de la température :

Pour évaluer la variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la température on utilise la formule empirique (Varshni) [34,35] :

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \quad (\text{II.7})$$

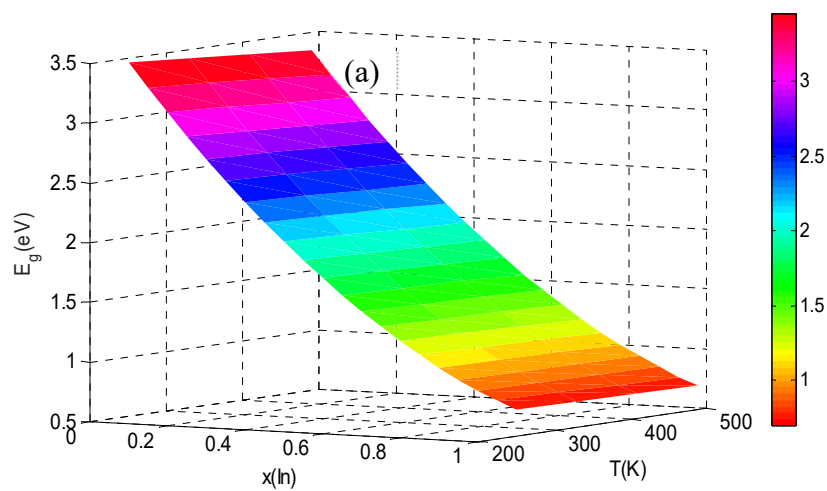
Avec :

- $E_{g\text{GaN}}(0K)$, $E_{g\text{InN}}(0K)$: l'énergie de gap du matériau à 0 K [eV].
- α : une constante empirique [eV/K].
- β : une constante associée à la température de Debye [K].
- T : la température [K].

On applique la loi de Vegard pour calculer l'énergie de gap d'InGaN et les coefficients α et β .

Tableau II .4 les paramètres de la formule empirique (Varshni) de InN et GaN.[34,35].

	GaN	InN
α	$0.909 \cdot 10^{-3}$	$0.245 \cdot 10^{-3}$
β	830	624
$E_g(0K)$	3.51eV	0.72 eV
$E_g(300K)$	3.42 eV	0.7 eV



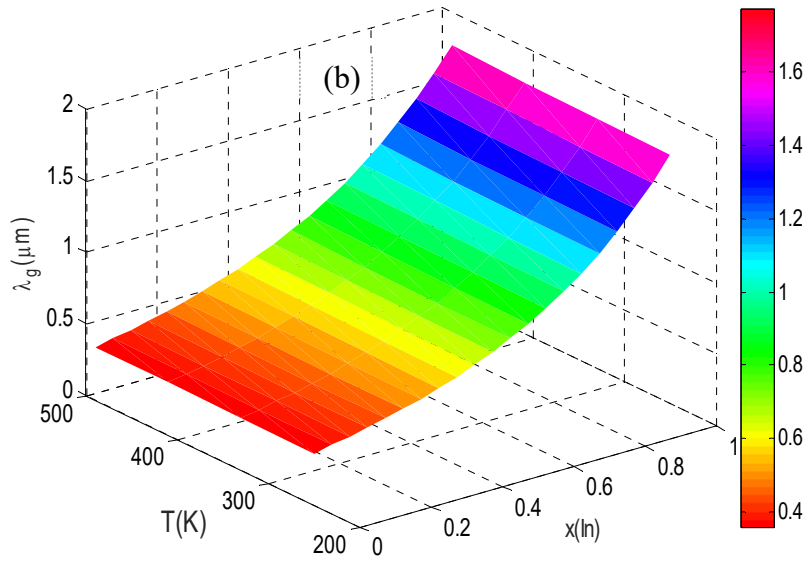


Figure II.7 La variation de (a) l'énergie de gap (b) la longueur d'onde en fonction de la concentration d'indium et la température.

Dans la Figure II.7(a), on remarque que la variation de l'énergie de gap en fonction de la concentration d'Indium est plus importante que la variation de l'énergie de gap en fonction de la température parce que l'énergie de gap varie entre les deux énergies de gap de GaN et InN, elle diminue avec l'augmentation de la concentration d'Indium par contre la diminution du gap reste faible avec l'augmentation de la température. Par contre dans la Figure II.7(b), la longueur d'onde augmente avec la concentration et l'influence de la température reste toujours faible.

II.3.4.3. La mobilité μ (T) :

L'expression de la mobilité des électrons et trous est donnée par la relation suivante [36] :

$$\mu_{(e,h)}(N, T) = \mu_{\min(e,h)} \left[\frac{T}{300} \right]^{\beta_1} + \frac{(\mu_{\min(e,h)} - \mu_{\max(e,h)}) \left[\frac{T}{300} \right]^{\beta_2}}{1 + \left[\frac{N_{\text{tot}}}{N_{\text{ref}}} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_3} \right]^{\gamma} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_4}} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- $\mu_{(e,h)}$: la mobilité des électrons et des trous respectivement [$\text{cm}^2/\text{V.s}$].
- μ_{\min}, μ_{\max} : la mobilité minimale et maximale respectivement [$\text{cm}^2/\text{V.s}$].
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \gamma$: des coefficients sont donnés dans le Tableau II.4.

L'expression de la mobilité totale est donnée par la relation suivante [37] :

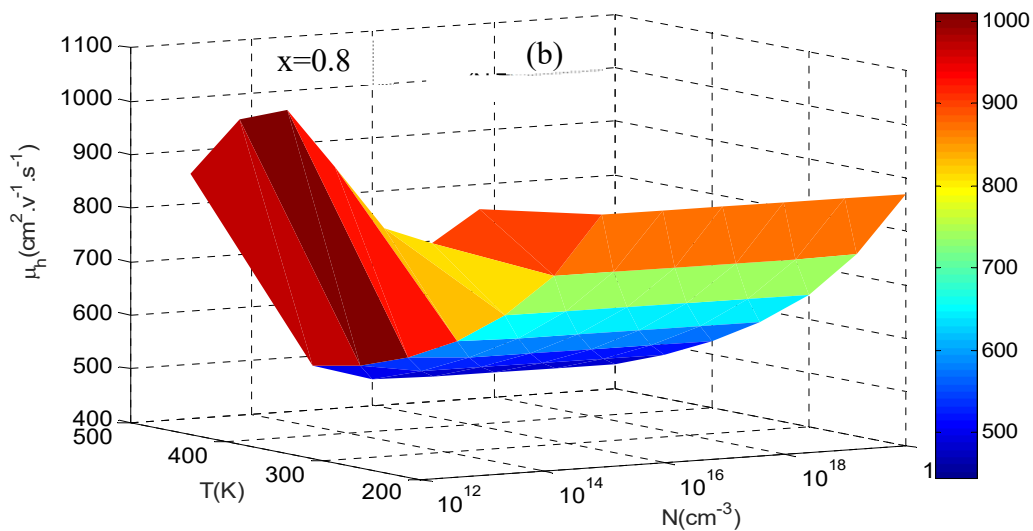
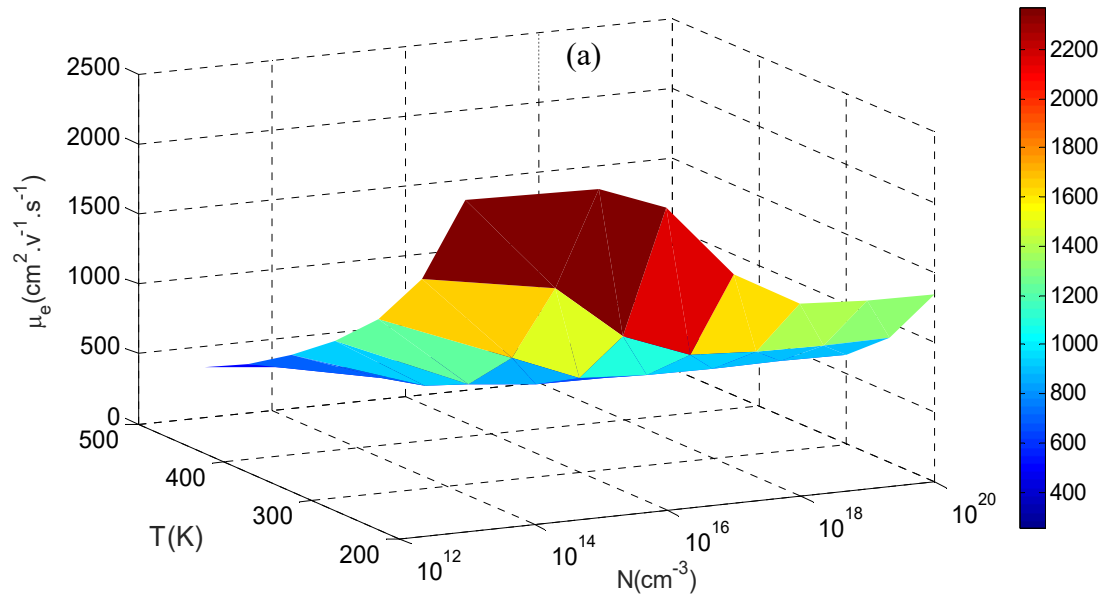
$$\mu_{\text{tot}} = \frac{1}{4} \cdot \left[\sqrt{\mu_e} + \sqrt{\mu_h} \right]^2 \quad (\text{II.9})$$

Avec :

- μ_{tot} , μ_e , μ_h : la mobilité totale, des électrons et des trous respectivement [$\text{cm}^2/\text{V.s}$].

Tableau II.5 les paramètres de la loi de la mobilité d'InGaN pour $x=0.8$ et $N_{ref} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [38].

In _{0.8} Ga _{0.2} N	β_1	β_2	B ₃	B ₄	γ	$\mu_{min}(\text{cm}^2/\text{V.s})$	$\mu_{max}(\text{cm}^2/\text{V.s})$
$\mu_e(\text{cm}^2/\text{V.s})$	-1.81	-1.3	4.84	-0.41	0.82	664.3	1252.7
$\mu_h(\text{cm}^2/\text{V.s})$	-0.73	-3.35	2.67	0.25	0.66	646.5	3188.7



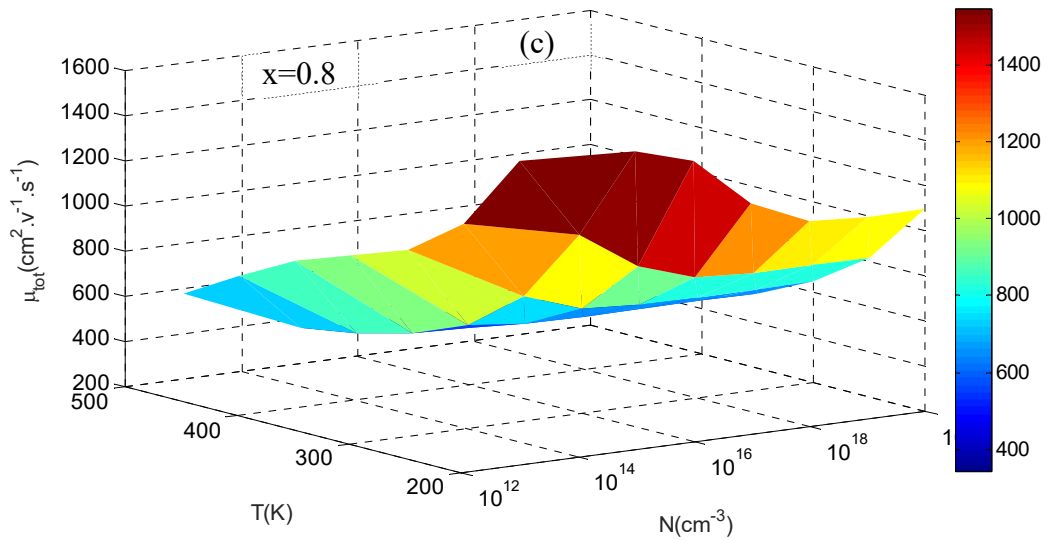


Figure II.8 la mobilité (a) des électrons(b) des trous (c) totale.

La Figure II.8 représente la variation de la mobilité des électrons, trous et la mobilité totale en fonction de la température et la concentration de dopage, on remarque que les trois mobilités diminuées en fonction de la température, aussi elles diminuent en fonction de la concentration de dopage N .

II.3.5. Les propriétés optiques du matériau :

Les propriétés optiques d'un matériau recouvrent les propriétés dues à l'interaction du matériau avec la lumière. Ils sont [32]:

II.3.5.1. L'indice de réfraction :

L'évolution de l'indice de réfraction avec la concentration est donnée par la relation suivante [39] :

$$n(E) = \sqrt{A(x) \left(\frac{E}{E_g}\right)^{-2} \left\{ 2 - \sqrt{1 + \frac{E}{E_g}} - \sqrt{1 - \frac{E}{E_g}} \right\} + B(x)} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- E : l'énergie de photon $E = \frac{hc}{\lambda}$.
- E_g : l'énergie de gap.
- $A(x)$, $B(x)$: les compositions du matériau dépendent des paramètres donnés par les expressions suivantes :

$$A(x) = 9.827 (1 + x) - 53.57x \quad (\text{II.11})$$

$$B(x) = 2.736 (1 - x) - 9.19x \quad (\text{II.12})$$

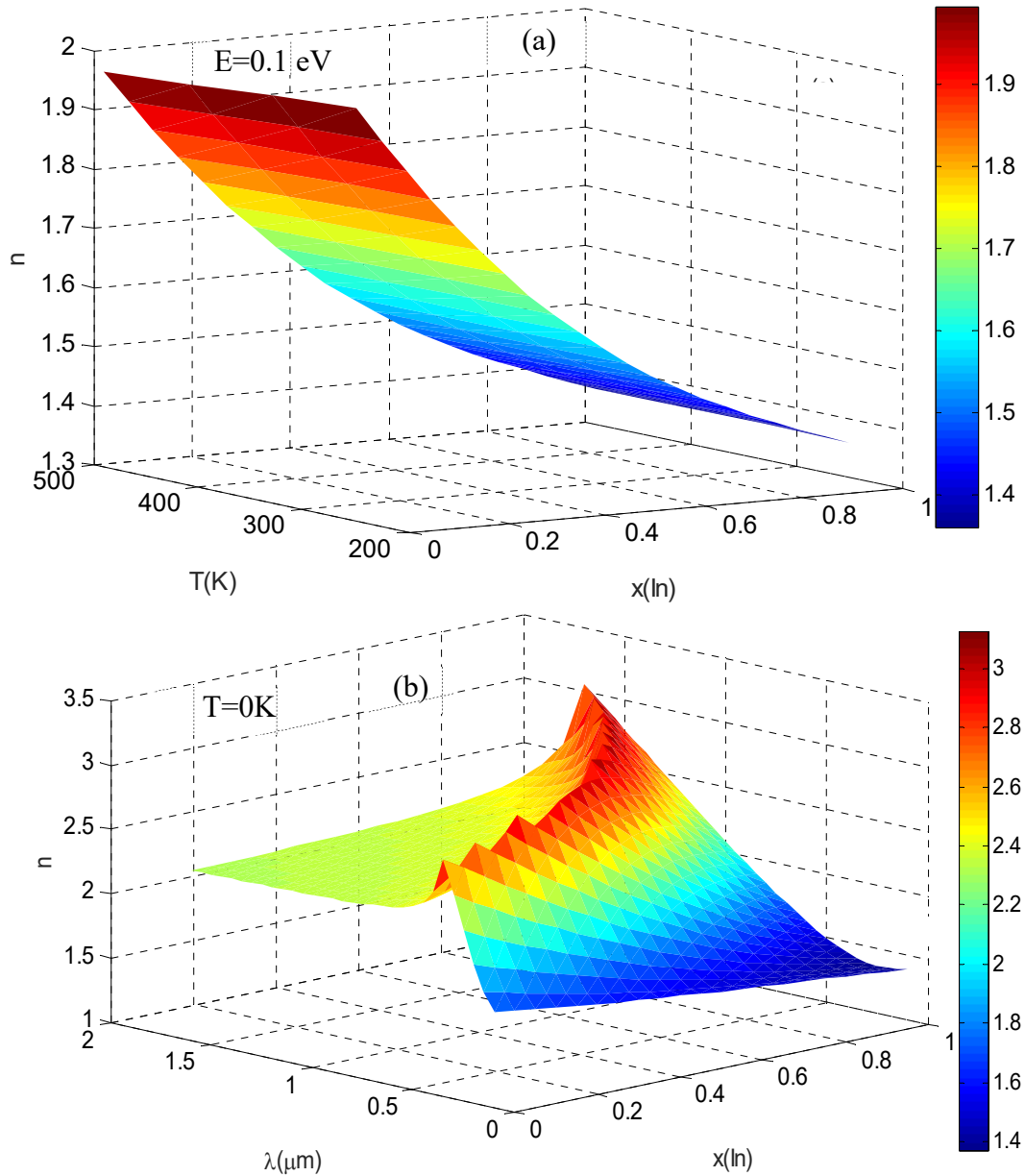


Figure II.9 la variation de l'indice de réfraction (a) en fonction de la concentration d'Indium et de la température (b) en fonction de la concentration d'Indium et de la longueur d'onde.

La Figure II.9 (a) représente l'évolution de l'indice de réfraction en fonction de la concentration de l'Indium et de la température, l'évolution de l'indice de réfraction avec l'augmentation de la température est très faible.

La Figure II.9 (b) représente l'évolution de l'indice de réfraction en fonction de de la concentration de l'Indium et de la longueur d'onde, l'influence de la concentration sur l'indice de réfraction est la

même sur le gap donc elle est diminuée mais l'indice de réfraction augmente avec la longueur d'onde jusqu'à une valeur maximale puis il est diminué à certaine valeur et il reste stable.

II.3.5.2.la transmittance et la réflexion :

Le coefficient de réflexion R et la transmission T est définie par [4] :

$$R = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (\text{II.13})$$

$$T = \frac{2 n_1}{n_1 + n_2} \quad (\text{II.14})$$

- n_1 : l'indice de réfraction dans le vide $n_1 = 1$.
- n_2 : l'indice de réfraction du matériau.

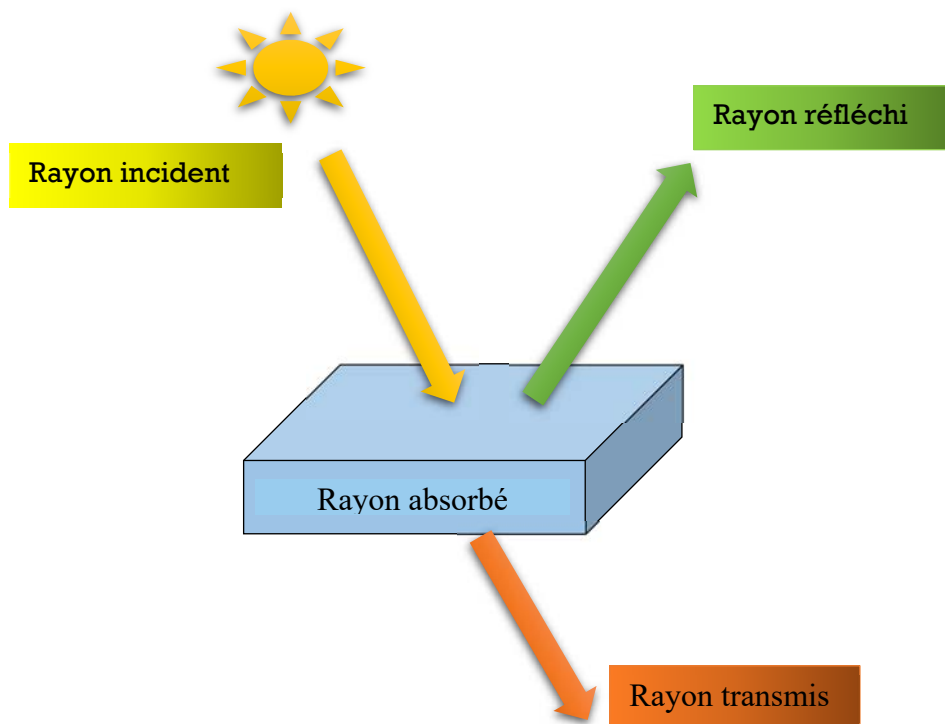


Figure II.10 les interactions rayonnement [40].

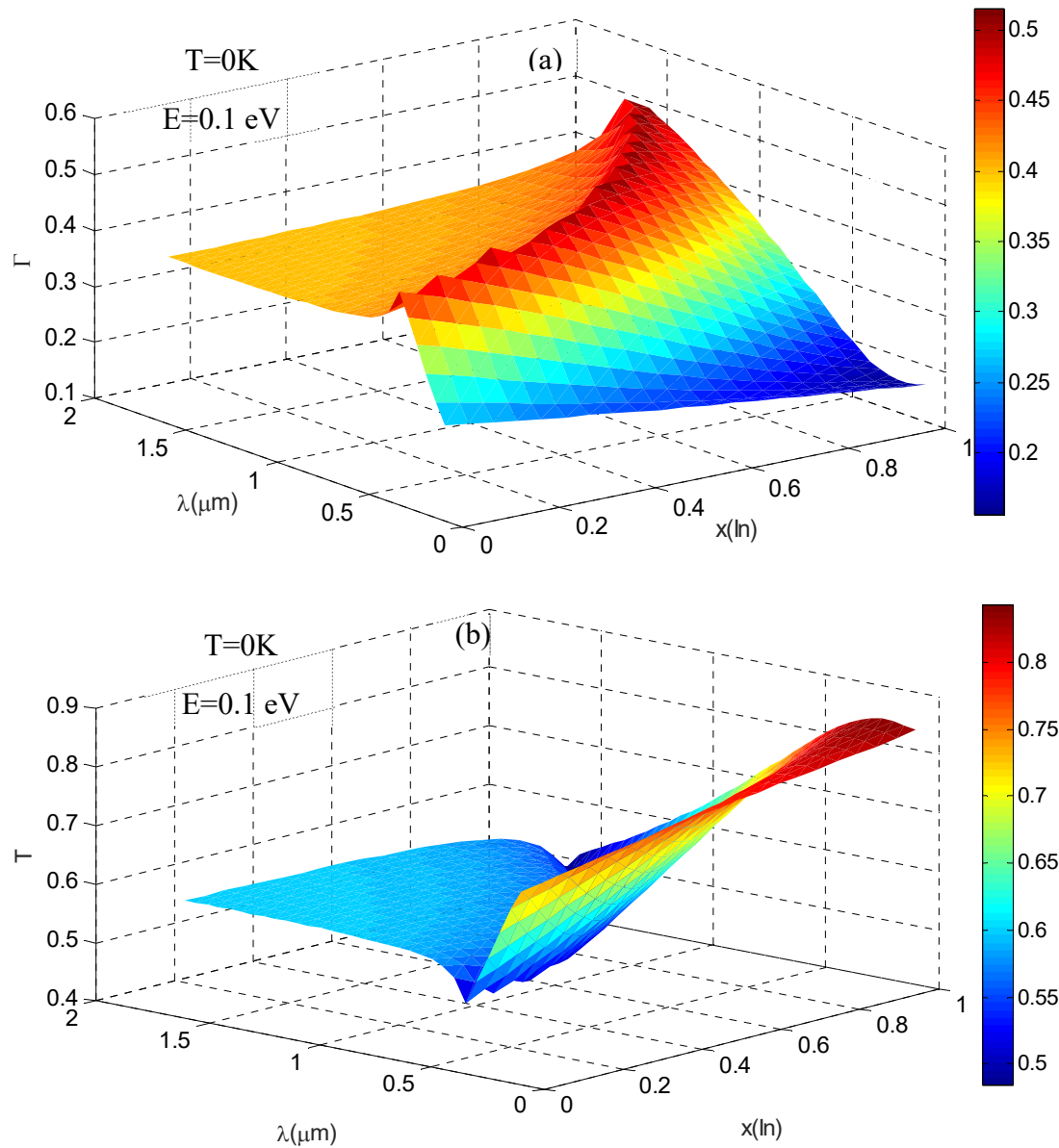


Figure II.11 la variation des coefficients (a) de la réflexion (b) de la transmission en fonction de la concentration d'indium et la longueur d'onde.

Dans la Figure II.11, le comportement de la réflexion est le même avec l'indice de réfraction, par contre pour la transmission, c'est l'inverse parce que $T=1-R$.

II.3.5.3. Permittivité :

La permittivité relative d'un matériau, aussi appelée constante diélectrique, elle est reliée à l'indice de réfraction par la relation (matériau non magnétique) [32]:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{II.15})$$

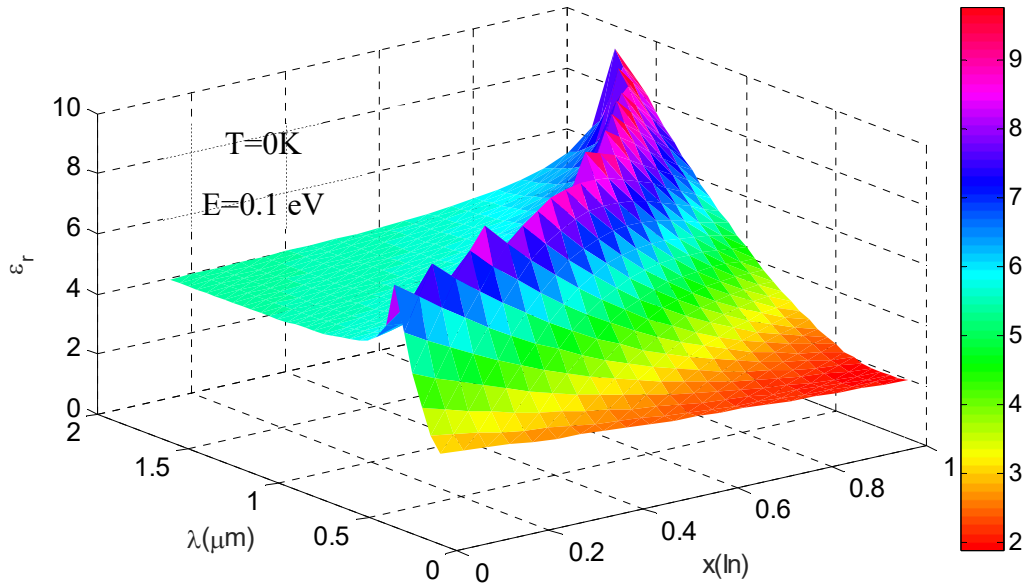


Figure II.12 la permittivité diélectrique en fonction de la concentration d'indium et la longueur d'onde.

La Figure II.12 de la permittivité en fonction de la concentration de l'Indium et de la longueur d'onde montre que le comportement la permittivité est le même pour l'indice de réfraction puisque la permittivité égale à l'indice de réfraction au carré.

II.3.5.4.Coefficient d'absorption :

L'évolution de Coefficient d'absorption avec la concentration est donnée par la relation suivante [41] :

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 \sqrt{C(x)(E - E_g) + D(x)(E - E_g)^2} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- α_0 : paramètre d'ajustement [$\text{eV}^{1/2}/\text{cm}^{-1}$].
- E : l'énergie de photon $E = \frac{hc}{\lambda}$.
- E_g : l'énergie de gap.
- $C(x)$, $D(x)$: sont les compositions du matériau dépend des paramètres donnés par les expressions suivantes :

$$C(x) = 12.87x^4 - 37.79x^3 + 40.43x^2 - 18.35x + 3.52 \quad (\text{II.17})$$

$$D(x) = -2.92x^2 + 4.05x - 0.66 \quad (\text{II.18})$$

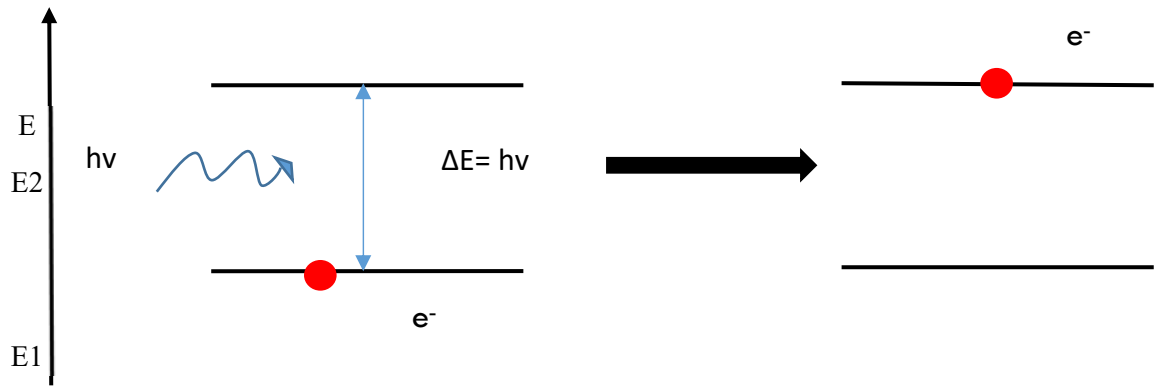


Figure II.13 le phénomène de l'absorption [6].

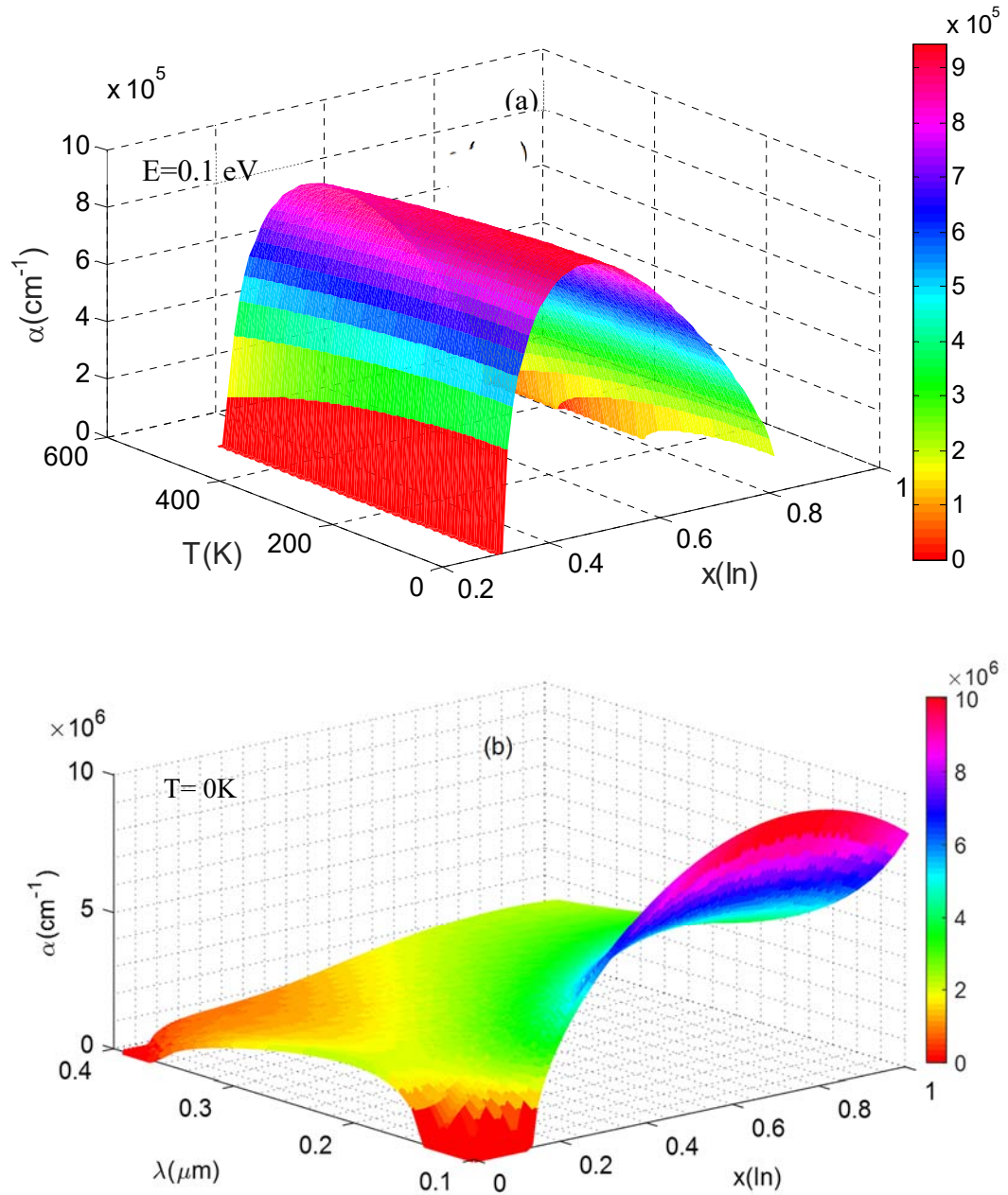


Figure II.14 l'évolution de Coefficient d'absorption (a) avec la concentration et la température (b) avec la concentration et la température.

La Figure II.14(a) représente la variation de l'absorption en fonction de la concentration de l'Indium et de la température, elle montre que l'effet de la concentration plus grande par rapport l'effet de la température puisque elle augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale pour x égale presque 0.6 puis elle va diminuer. L'influence de l'énergie de gap sur l'absorption est plus importante. Si un photon a une énergie inférieure au gap d'énergie du matériau, E_g , il ne sera pas absorbé. Le matériau est transparent pour cette énergie. En revanche, si un photon a une énergie supérieure ou égale à E_g , il sera alors absorbé et formera une paire électron-trou. La Figure II.14 (b) représente la variation de l'absorption en fonction de la concentration de l'Indium et de la longueur d'onde, l'absorption du matériau InGaN va commencer presque de $\lambda=0.15$ à $\lambda=0.38$ donc le domaine de l'absorption est dans l'Ultra-Violet(UV).

II.3.6. Epaisseur critique :

Lors de la croissance épitaxiale d'un matériau sur un substrat et ce, pour un faible désaccord des paramètres de maille entre le matériau et le substrat, il existe une épaisseur dite "épaisseur critique" à partir de laquelle la contrainte contenue dans la couche devient trop importante et la couche se relaxe pour réduire l'énergie emmagasinée.

Pour une couche épitaxiale d'épaisseur inférieure à l'épaisseur critique, la couche se déforme élastiquement pour adapter son paramètre de maille à celui du substrat (épitaxie pseudo morphée). Inversement, pour une couche épitaxiale supérieure à l'épaisseur critique, la couche se relaxe. En effet, l'énergie élastique emmagasinée étant trop grande, la couche se relaxe pour reprendre ses paramètres de maille initiaux, en générant des dislocations dans le matériau [42]. L'épaisseur critique dépend donc fortement du désaccord de maille entre la couche épitaxiale et son substrat.

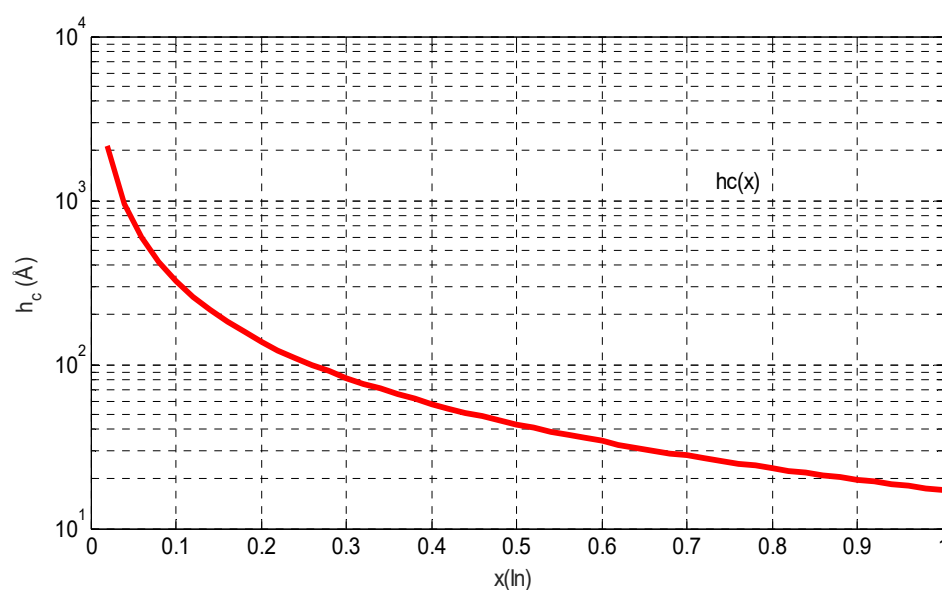


Figure II.15 l'évolution épaisseur critique en fonction de la concentration d'Indium.

Différentes études ont été réalisées pour mesurer l'épaisseur critique de relaxation (h_c) d'InGaN sur GaN en fonction de la composition d'indium [43,44]. Il existe cependant, une grande disparité des mesures due aux différents procédés et conditions de croissance et aux différents modèles théoriques. Figure II.15 représente l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'Indium, il est diminué avec la concentration. Nous pouvons choisir la concentration de l'indium qui nous permet de minimiser la dislocation de la structure proposée.

II.4. Conclusion :

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



Chapitre III :
Simulation et Résultats

III.1.INTRODUCTION :

La simulation numérique est toujours utilisée pour l'optimisation des cellules solaires, et pour décrire le comportement des composants électroniques. Cette méthode nous permet de comparer les résultats avec l'expérience, de ce fait la simulation numérique est indispensable avant la réalisation des dispositifs. Dans notre travail, nous avons étudié et simulé la structure $In_x Ga_{(1-x)}N$ avec un gap variable entre 0,7 et 3,4 eV avec le logiciel SCAPS-1D. Après une petite présentation de logiciel, on va déterminer les paramètres qui optimisent cette structure illustrée dans la Figure III.2.

III.2.Présentation du logiciel SCAPS-1D :

SCAPS (Soler Cell Capacitance Simulator) est un programme de simulation de cellule solaire tridimensionnelle développée au département d'électronique et des systèmes d'information (ELIS) de l'Université de Gand, Belgique.

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 sauver les résultats de l'intrigue [45]

III.2.1.Utilisation du logiciel :

On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE.

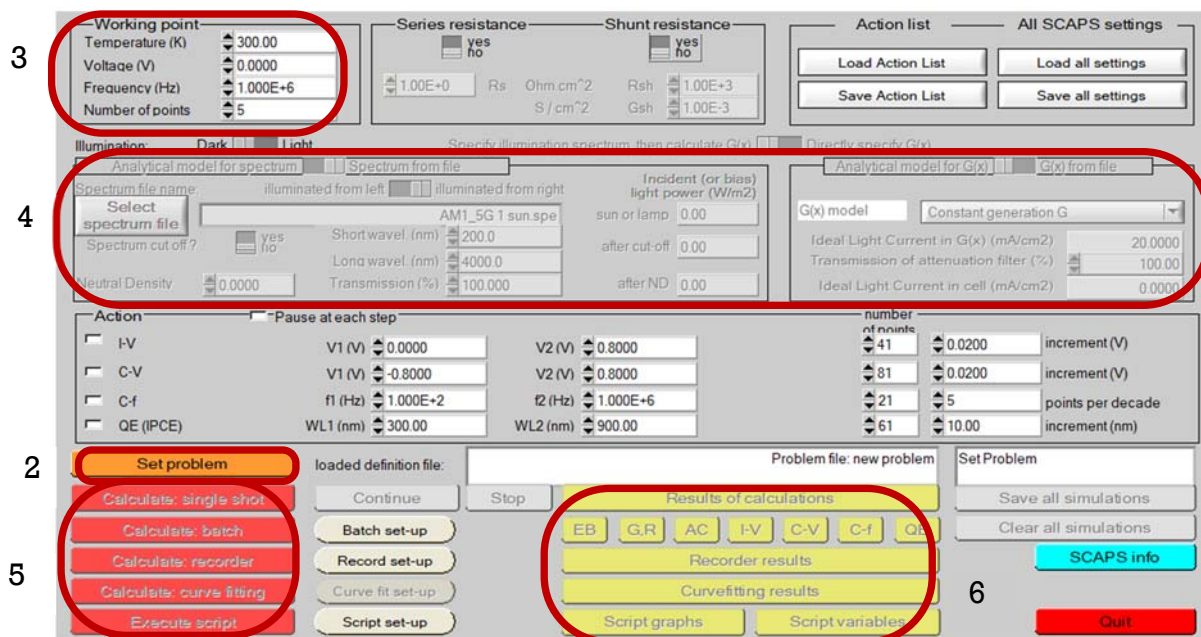


Figure III.1 Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.

SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action présenté sur la Figure III.1.

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

1. lancer SCAPS (on clique sur l'icône ci-dessus sur le tableau, ou bien double clique sur le fichier Scaps EXE dans le gestionnaire de fichiers).
2. définir le problème, ainsi que géométrie les matériaux et pour modifier les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. indiquer les circonstances dans les quelle la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. commencer les calculs.
6. afficher les courbe de simulation, on peut simuler :
 - Caractéristique I-V.
 - C-V (capacitance -tension).
 - C-f (capacitance- fréquence).
 - QE (rendement quantique).

II.1.2.Aperçu théorique

Le programme SCAPS 1-D résout les équations pour des structures contenant un certain nombre de couche semi-conducteur qui ont un profil de dopage arbitraire (comme fonction de la position), avec une distribution énergétiques arbitraires des niveaux profonds des donneurs ou des accepteurs sous différents types d'éclairement. Des itérations de résolutions des équations sont faites jusqu'à convergence de l'algorithme. SCAPS 1-D a été introduit dans la littérature avec les articles. Alors que les algorithmes de SCAPS sont détaillés dans les références

L'étude de la plupart des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson (III.1) et de l'équation de continuité pour les électrons (III.2) et les trous (III.3) avec des conditions aux limites appropriées [46].

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

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

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

Tel que :

Ψ : est le potentiel électrique.

q : la charge électrique.

ϵ_r : permittivité relative, ϵ_0 : permittivité du vide.

p et n : concentrations de trous et électrons.

N_D et N_A : la charge des impuretés donneurs et accepteurs.

ρ_p, ρ_n : la distribution des trous et des électrons.

J_p et J_n : densité de courant de trou et électron.

$G(x)$ et $R(x)$: la génération et 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 [47],

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

$$\vec{J}_p = q\mu_p p \vec{\xi} + qD_p \vec{\nabla}_p \quad (\text{III.5})$$

où $\vec{\xi}$: est le champ électrique.

μ_n et μ_p : sont les mobilités respectives des électrons et des trous.

D_n et D_p : leurs coefficients de diffusion définis par les relations d'Einstein :

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \quad (\text{III.6})$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad (\text{III.7})$$

Où k est la constante de Boltzmann et T la température.

II.2.2. Avantages et inconvénients du SCAPS

Les avantages du SCAPS sont multiples à savoir :

la grande vitesse d'exécution, les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif, la possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison en celle-ci, l'introduction de résistances en série et parallèle, et l'obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité fréquence.

Cependant, ses inconvénients concernent l'absence de la réflexion aux interfaces de différentes couches constituant la cellule qui n'est pas gérée par le SCAPS et son programme de traçage inflexible. D'autant plus, qu'il peut être instable lorsque le dispositif est loin d'être idéal et comprend des barrières secondaires [48], et Dans SCAPS les dopants sont complètement ionisés : quel que soit la température, et 3 types de mécanismes de recombinaisons sont utilisés : recombinaisons SRH, Auger et radiatives [49].

III.3. Description de la structure :

La cellule solaire étudiée est une jonction PN en $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$. 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, la température, les mobilités, les vitesses thermiques des électrons et des trous, ainsi que le spectre du soleil Figure III.2.

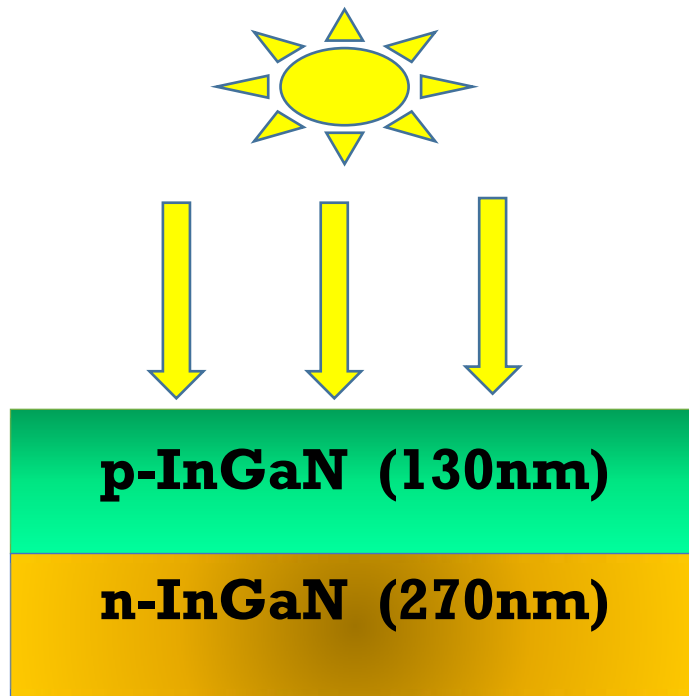


Figure III.2 la structure InGaN(p)/InGaN(n) d'une cellule uni-jonction.

Puisque les cellules solaires à base du InGaN sont destinées aux applications spatiales, le spectre du soleil utilisé est le AM1.5G, tous ces paramètres sont introduits dans l'interface de SCAPS pour simuler la caractéristique courant-tension de la cellule et son rendement quantique externe.

Notre structure de référence est une cellule PN à base d' $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ dont les épaisseurs et le dopage, choisis sont regroupés dans le Tableau III.1

Tableau III.1 l'épaisseur et le dopage de la structure étudiée [50].

Région	Epaisseur (nm)	Dopage (cm^{-3})
Emetteur	130	5.10^{17}
Base	270	5.10^{17}

III.4. Paramètres de simulation :

On a calculée les valeurs du gap d'énergie du InGaN E_g (eV), les densités effectives des électrons et des trous N_c et N_v (cm^{-3}), l'affinité χ (eV) et la permittivité ϵ_r pour une concentration d'Indium $x=0.65$, les valeurs sont rassemblées dans le Tableau III.2.

Tableau III.2 les paramètres d' $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ utilisés pour la simulation.

InGaN	E_g (eV)	$N_c \cdot 10^{18}$ (cm^{-3})	$N_v \cdot 10^{19}$ (cm^{-3})	χ (eV)	permittivité ϵ_r	μ_e (max) ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	μ_h (max) ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)
x=0.65	1.39	1.43	3.97	5.50	11.33	325	47.22

III.5. Résultats et interprétations :

Dans cette partie, on va simuler notre cellule à base d' $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$, on utilisant le simulateur SCAPS puis on va étudier l'effet de la géométrie de la structure tel que l'épaisseur de la région P w_p (μm), puis la région N w_n (μm). Ainsi, on va choisir les valeurs de w_p et w_n pour optimiser le rendement.

La caractéristique électrique $J(V)$, la puissance électrique $P(V)$ et le rendement quantique Externe (EQE) de la cellule sont présentés dans les Figures III.3 et III.4, respectivement.

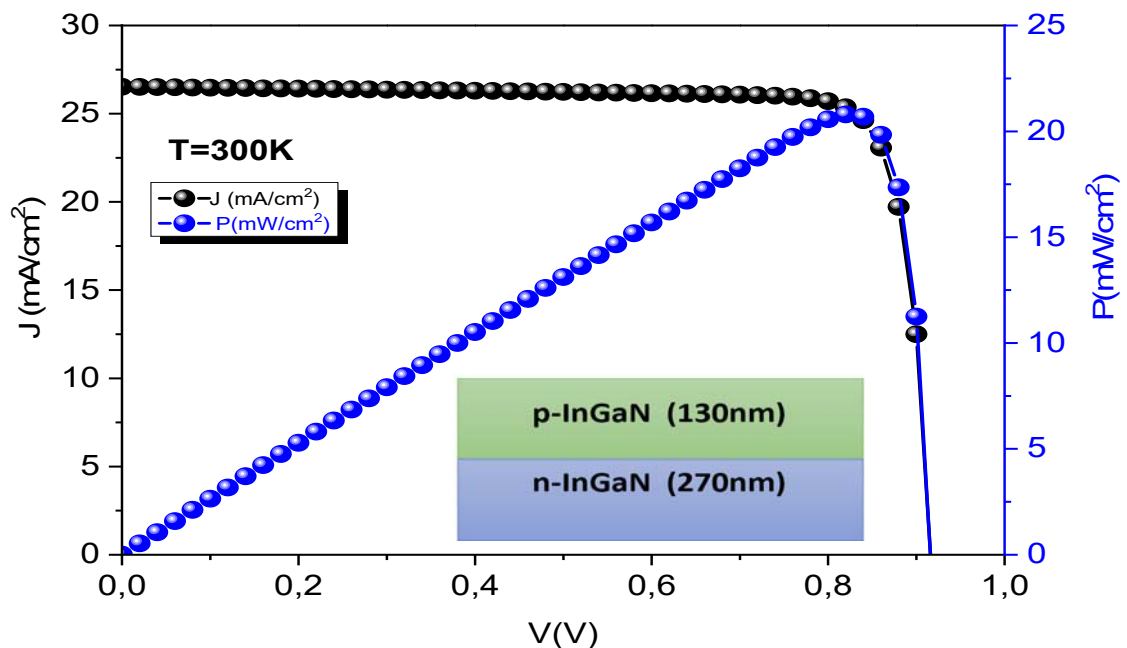


Figure III.3 Caractéristique $J(V)$ et $P(V)$ de la cellule PN en InGaN.

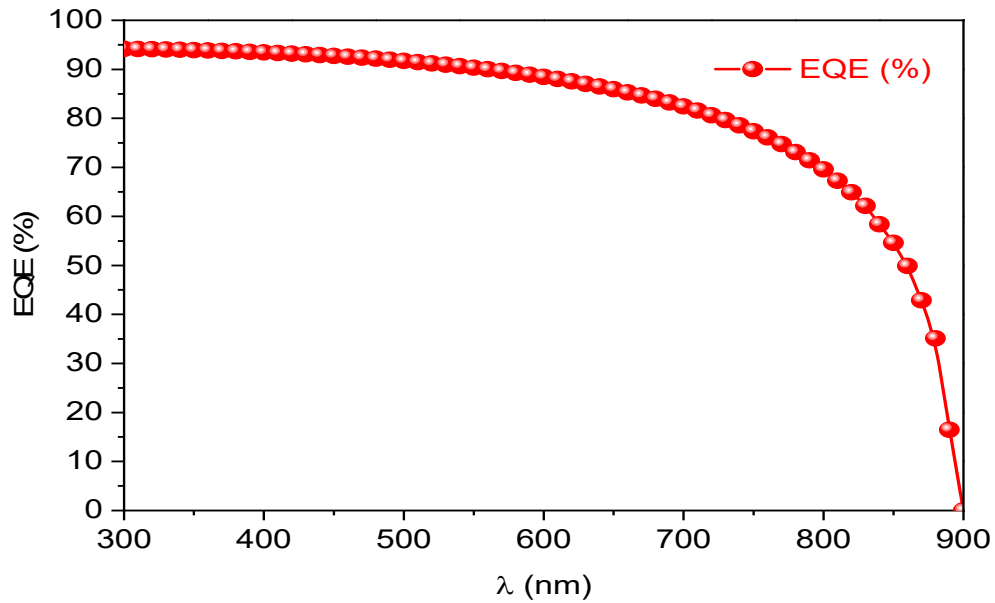


Figure III.4 Rendement quantique sous AM1.5G de la cellule PN en In_{0.65}Ga_{0.35}N.

Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le Tableau III.3.

Tableau III.3 Paramètres de sortie de la cellule.

	v_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
Résultats de référence [50]	0.834	29.61	82.2	20.28
Notre travail	0.916	26.09	85.50	20.42

III.5.1.Effet de l'épaisseur de la région P sur les paramètres électrique de la cellule :

Dans cette partie, l'épaisseur de la région P w_p est variée entre 80 et 150 nm, alors que le dopage N_a , l'épaisseur w_n et le dopage N_d sont fixés.

Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le Tableau III.4, et présentés sous forme de courbes dans la Figure III.5, (a), (b).

Tableau III.4 L'effet de l'épaisseur w_p sur les caractéristiques de la cellule.

w_p (μm)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF(%)	η (%)
0.08	0.912	25.63	85.45	20.03
0.1	0.916	26.09	85.50	20.42
0.12	0.916	26.41	85.55	20.70
0.14	0.917	26.62	85.60	20.89
0.15	0.917	26.69	85.63	20.96

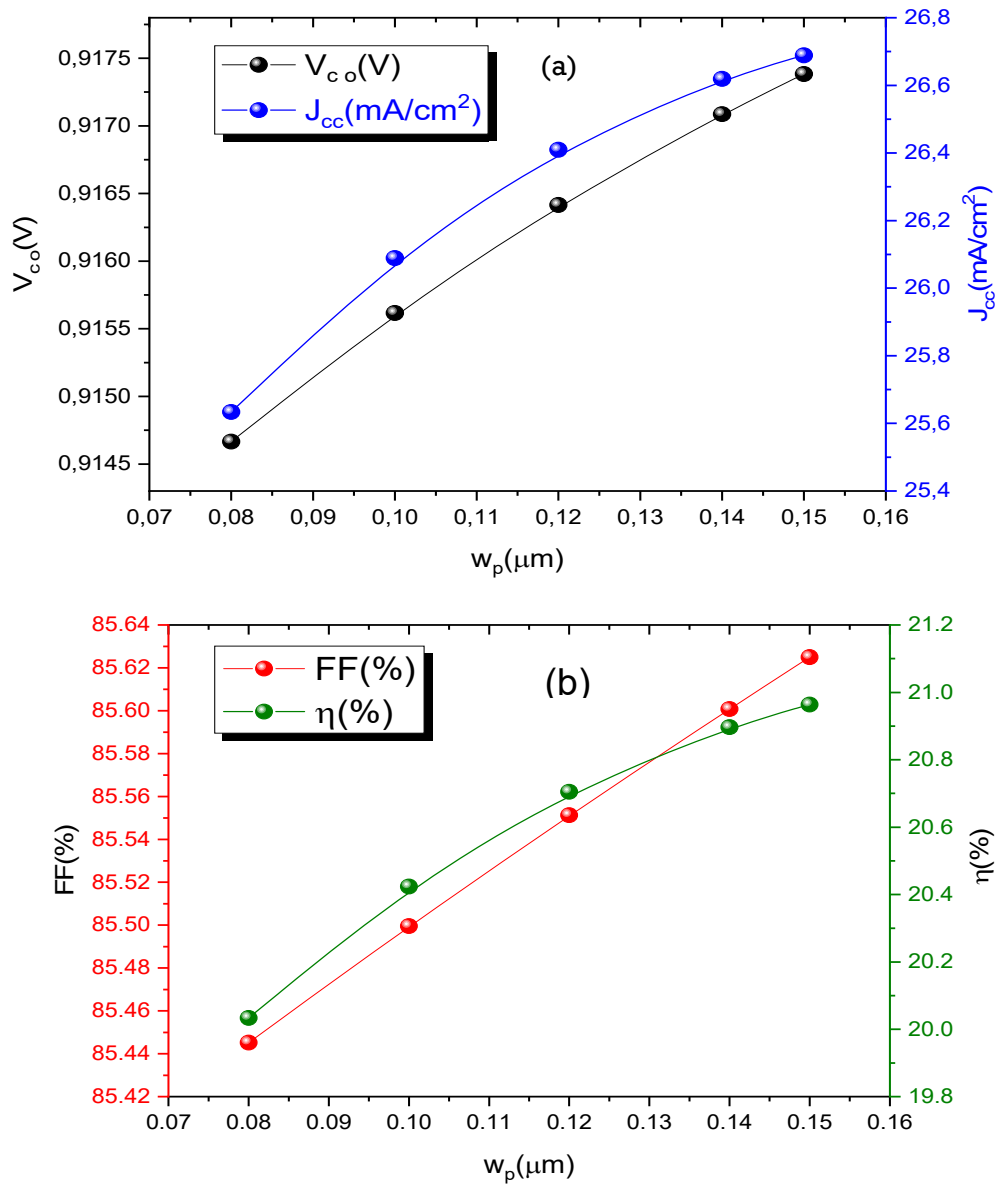


Figure III.5 l'effet de l'épaisseur w_p avec $w_n = 270\text{nm}$ sur (a) J_{cc} et V_{co} (b) FF et η .

Selon les résultats de la Figure III.5, on remarque que l'augmentation de la densité de courant de court-circuit J_{sc} , la tension de circuit ouvert V_{co} et le rendement η est très faible si on augmente l'épaisseur w_n . Alors, l'influence de l'épaisseur w_p n'est pas très importante sur le rendement.

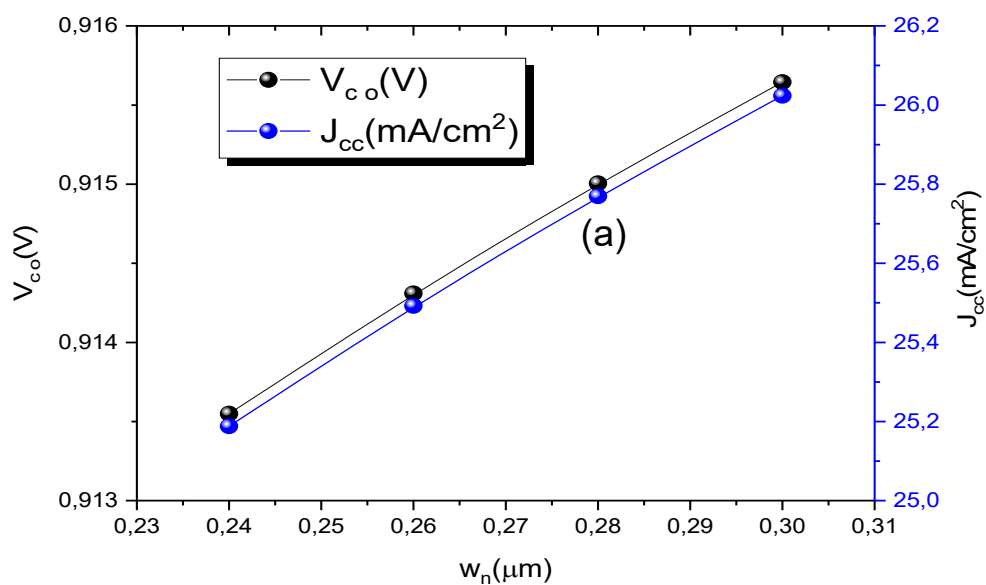
III.5.2.Effet de l'épaisseur de la région N sur les paramètres électrique de la cellule :

Dans cette partie, l'épaisseur de base w_n est variée entre 240 et 300 nm, alors que le dopage N_d , l'épaisseur w_p et le dopage N_a sont fixés.

Les paramètres de sortie de la cellule pour chaque cas sont résumés dans le Tableau III.5, et présentés sous forme de courbes dans la Figure III.6, (a), (b).

Tableau III.5 L'effet de l'épaisseur w_n sur les caractéristiques de la cellule.

w_n (μm)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF(%)	η (%)
0.24	0.913	25.19	85.36	19.64
0.26	0.914	25.49	85.42	19.91
0.28	0.915	25.77	85.47	20.15
0.3	0.916	26.02	85.52	20.38



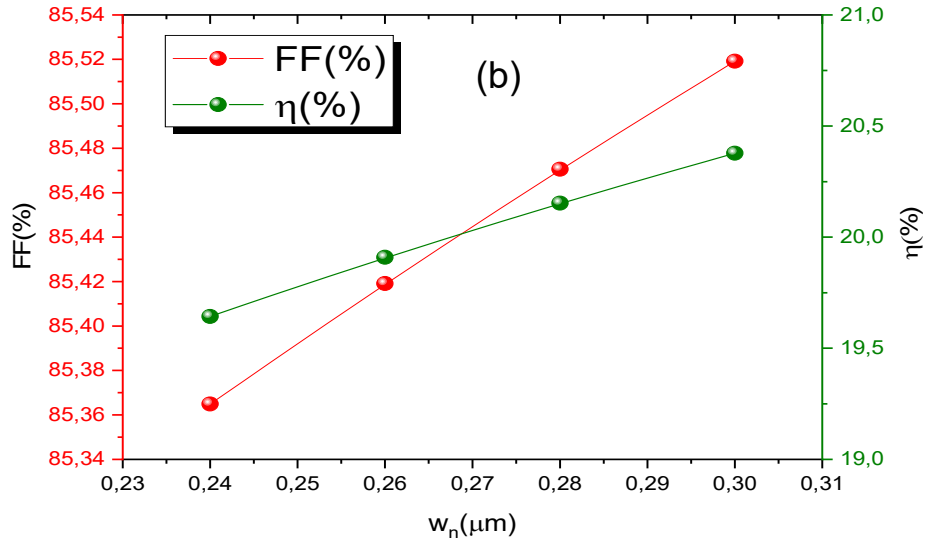


Figure III.6 L'effet de l'épaisseur w_n avec $w_p=130\mu\text{m}$ sur (a) J_{cc} et V_{co} (b) FF et η .

Selon les résultats de la Figure III.6, on remarque que la densité de courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de w_n en raison de la longue distance entre la surface et la zone de charge d'espace. Plus l'épaisseur w_n augmente, plus la densité de courant et rendement augmentent aussi.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé une cellule solaire à base de $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ avec une concentration d'Indium $x=0,65$ en utilisant le simulateur SCAPS, avec une étude de l'effet l'épaisseur de la région N et P sur les caractéristiques électrique 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 (η) et le rendement quantique(EQE). On a conclu que l'influence de l'épaisseur de la région N est importante par rapport l'épaisseur.de la région P.

Conclusion générale

La conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale, différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Parmi les nouveaux matériaux considérés prometteurs pour le photovoltaïque, l'alliage InGaN étudié intensément depuis plus d'une dizaine d'années. Depuis le début des années 2000, il est étudié pour le photovoltaïque grâce à son coefficient d'absorption élevé, à son bonne tolérance aux rayonnements, et à son large direct et modulable gap d'énergie interdite pouvant couvrir le spectre solaire de l'infrarouge à l'ultraviolet. Nous avons effectué dans ce mémoire la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension et rendement quantique externe, d'une cellule solaire p-n à base d'InGaN pour une concentration d'indium de 65%.

Les résultats obtenus par la simulation sont les suivants : $J_{CC}=26.09$ (mA/cm²), $V_{CO}= 0.92V$, $FF=85.50\%$ et $\eta =20.42\%$, qui sont proche à ceux trouvés dans la littérature.

Comme conclusion, on a trouvé que :

- L'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur améliore le rendement électrique de la cellule et le rendement quantique au niveau du longueur d'ondes longues.
- L'augmentation de l'épaisseur de base améliore aussi le rendement électrique et quantique de la cellule.

Bibliographie

- [1] Hojeij, W. (2007). Réalisation et caractérisations optoélectroniques de cellules photovoltaïques organiques (Doctoral dissertation, thèse de doctorat, Université de Limoges).
- [2] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 2ème édition, Masson 1990.
- [3] P. Michalopoulos, «A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco», Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.
- [4] Zakaria DJEBBOUR, Vanessa Gorge, "Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V", Laboratoire de Génie électrique de Paris, 2012.
- [5] Nicolas Fressengeas, Abdoulwahab Adaine, "Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Nanotech France, Jun 2018, Paris, France.
- [6] M. A. Ougazzaden, EL GMILI Youssef "Etude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque l'Université de Lorraine & l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah-Fes, 17 octobre 2013.
- [7] Nouar, A. O. U. N. (2010). Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales (Doctoral dissertation, Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie).
- [8] L. Protin, S. Astier, **Convertisseurs photovoltaïques, Techniques de l'Ingénieur D 3 360** .
- [9] Y. Sayade, "Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charges minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière", Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 2009.
- [10] William Shockley and Hans J. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. Journal of applied physics, 32(3) :510–519, 1961. 1
- [11] Gorczyca, I., Svane, A. and Christensen, N.E. Theory of point defects in GaN, AlN, and BN: Relaxation and pressure effects. Physical Review B. 1999, Vol. 60, 8147.
- [12] Bernardini, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D. Spontaneous polarization and piezoelectric Communications. 11, 1972, 617.

- [13] Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61.
- [14] A. Dussaigne, " Diodes électroluminescentes blanches monolithiques", thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2005.
- [15] Wright, A.F. and Nelson, J.S. Explicit treatment of the gallium 3d electrons in GaN using the plane-wave pseudopotential method. *Physical Review B*. 1994, Vol. 50, 2159.
- [16] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, and others. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGa_n/GaN heterostructures. *Journal of applied physics*, 85(6):3222–3233, 1999.20
- [17] S. Mokkaṡati and C. Jagadish. III-V compound SC for optoelectronic devices. *Materials Today*, 12(4):22 – 32, 2009. (Cité page 8.)
- [18] F. Bernardini and V. Fiorentini. Nonlinear Behavior of Spontaneous and Piezoelectric Polarization in III-V Nitride Alloys. *physica status solidi (a)*, 190(1) :65–73, 2002. (Cité pages 9 et 10.)
- [19] Vincenzo Fiorentini, Fabio Bernardini, and Oliver Ambacher. Evidence for nonlinear macroscopic polarization in iii–v nitride alloy heterostructures. *Applied Physics Letters*, 80(7):1204–1206, 2002. (Cité page 9.)
- [20] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt. Spontaneous polarization and piezoelectric Constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56:R10024–R10027, Oct 1997. (Cité pages 9 et 10.)
- [21] I. Vurgaftman and J. R. Meyer. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 94(6):3675–3696, 2003. (Cité pages 7, 9, 12, 16, 90 et 98.)
- [22] Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering R*. 2002, Vol. 37, 61.
- [23] H. Morkov. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co, 2008. (Cité pages 8, 10 et 26.)
- [24] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt. Spontaneous polarization and piezoelectric Constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56:R10024–R10027, Oct 1997. (Cité pages 9 et 10.)
- [25] K. Shimada, T. Sota, and K. Suzuki. First-principles study on electronic and elastic properties of BN, AlN, and GaN. *Journal of Applied Physics*, 84(9) :4951–4958, 1998. (Cité page 10.)
- [26] A. Polian, M. Grimsditch, and I. Grzegory. Elastic constants of gallium nitride. *Journal of Applied Physics*, 79(6) :3343–3344, 1996. (Cité page 10.)

- [27] A. U. Sheleg and V. A. I. A. Savastenko. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Neorganicheskie Materialy*, 15:1598, 1979. (Cité page 10.)
- [28] A. F. Wright. Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN, GaN, and InN. *Journal of Applied Physics*, 82(6) :2833–2839, 1997. (Cité page 10.)
- [29] F. Bernardini and V. Fiorentini. Nonlinear Behavior of Spontaneous and Piezoelectric Polarization in III-V Nitride Alloys. *physica status solidi (a)*, 190(1) :65–73, 2002. (Cité pages 9 et 10.)
- [30] L. Vergard. Die konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome. *Zeitschrift für Physik*, 17-26. (Cité page 12.)
- [31] J. Wu, W. Walukiewicz, *Superlattices Microstruct.* 2003, 34, 63.
- [32] V. Fiorentini, F. Bernardini, and O. Ambacher. "Evidence for nonlinear macroscopic polarization in III–V nitride alloy heterostructures". *Appl. Phys Lett* 80 (2002)1204-1206.
- [33] V. Gorge, A.M. Dubois, Z. Djebbour, K. Pantzas, S. Gautier, T. Moudakir, S. Suresh, A.Ougazzaden. «Theoretical analysis of the influence of defect parameters on photovoltaic performance of composition graded InGaN solar cells. " *Materials Science and Engineering B* 178 (2013) 142-148.
- [34] Farahmand M, Garetto C, Bellotti. E, Brennan K F, Goano M, Ghillino E, Ghione G, Albrecht J D and Ruden P P 2001 Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride Wurtzite phase materials system: Binaries and Ternaries *IEEE. Trans. Electron Devices* 48 535–42
- [35] T.T. Mnatsakanov, M.E. Levinshstein, L.I. Pomortseva, S.N. Yurkov, G.S. Simin, M. A. Khan, *Solid-state Electron.* 47(2003)111–115.
- [36] Carlo Garetto, Enrico Bellotti, Kevin F. Brennan, Michele Goano, Enrico Ghillino, Giovanni Ghione, John D. Albrecht, and P. Paul Ruden'' Simulation of Electron Transport in the III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries and Ternaries Maziar Farahmand'' .
- [37] ATLAS User's Manual, Device Simulation Software, Version 5.20.2.R, SILVACO International, Santa Clara, CA, 2016.
- [38] Kwiseon Kim, Walter RL Lambrecht, and Benjamin Segall. Elastic constants and related properties of tetrahedrally bonded BN, AlN, GaN, and InN. *Physical Review B*, 53(24):16310, 1996. 29
- [39] J. W. Matthews and A. E. Blakeslee. Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations. *Journal of Crystal Growth*, 27:118–125, 1974. 30
- [40] R. People and J. C. Bean. Calculation of critical layer thickness versus lattice mismatch for GeSi/Si strained-layer heterostructures. *Applied Physics Letters*, 47(3) :322–324, 1985.

- [41] R. Belghouthi, S. Taamalli, F. Echouchene, H. Mejri, H. Belmabrouk, *Mater.Sci.Semicond. Process.* 2015, 40, 424.
- [42] Medjdoub, S. Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération (Doctoral dissertation, 04/01/2017).
- [43] 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).
- [44] 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 ParisSaclay).
- [45] Touafek, N. (2015). Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$.
- [46] N. Oleksiy, Simulation fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, Thèse doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [47] V. Yu. Davydov, Yu. E. Kitaev, I. N. Goncharuk, A. N. Smirnov, J. Graul, O. Semchinova, D. Uffmann, M. B. Smirnov, A. P. Mirgorodsky, and R. A. Evarestov. Phonon dispersion And Raman scattering in hexagonal GaN and AlN. *Physical Review B*, 58:12899–12907, Nov 1998. (Cité page 10.)
- [48] K. Kim, W. R. L. Lambrecht, and B. Segall. Elastic constants and related properties of tetrahedrally bonded BN, AlN, GaN, and InN. *Physical Review B*, 53:16310–16326, Jun 1996. (Cité page 10.)
- $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$.
- [49] Darga, A. (2015). Formation : Introduction à la Simulation de cellule photovoltaïque.
- [50] Zhang, X., Wang, X., Xiao, H., Yang, C., Ran, J., Wang, C & Li, J. (2007). Simulation of $\text{In}_0.65\text{Ga}_{0.35}\text{N}$.