

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

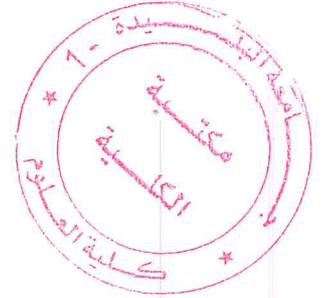
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة سعد دحلب البليدة 1

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



كلية العلوم – دائرة الفيزياء
Faculté des Sciences
Département de Physique



**MEMOIRE
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN PHYSIQUE**

Option : Nanophysique

THÈME

Etude et simulation des nanostructures InGaAs/Si pour
Nano systèmes photovoltaïque

Présenté par :

Mezari Abdessameud Lyes

Et

Mehrazi Oussama

Soutenu le 18/09/2018 devant le jury composé de :

Mr. A. Benhaffaf	MAA	USDB1	President
Dr. A.Hassein-Bey	MCB	USDB1	Examinateur
Pr. A.Aissat	Prof.	USDB1	Encadreur

Blida1-2017/2018

Remerciements

On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le Courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

mes on tient à exprimer vifs remerciements à mon promoteur monsieur A. Aissat Professeur à l'université de Blida, pour son entière disposition, et ses judicieux conseils, sa patience et sa gentillesse, mais surtout pour son esprit paternel.

Nous tenons aussi à remercier notre Dr. A Hassein-Bey qui nous a transféré savoir au long de notre formation de master avec passion et patience sans égal

Nos sentiments de profonde gratitude vont à mes professeurs qui tout au long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

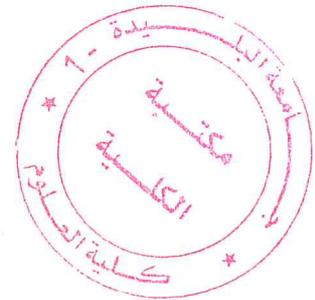
Nos remerciements s'adressent également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de la présente mémoire.

Enfin, on tient à remercier tous mes amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation.

On dédie ce modeste travail à : Mes très chers parents qui n'ont pas cessé de m'encourager et me soutenir dans les moments difficiles et qui ont prié Dieux pour moi, et qui ont su m'entourer de toute leur affection et amour.

Tous ceux qui me sont chères



ملخص:

الخلايا الضوئية تحول مباشرة الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية. هذا العمل هو دراسة ومحاكاة الخلايا الشمسية على أساس المواد InGaAs هذه الخلانت الثلاثية التي هي أشباه النواقل III/V لها خصائص مهمة. خصائص الخلايا الشمسية على أساس InGaAs/Si وتأثير نقاط الكم على هذا الهيكل بهدف تحسين مردود هذه الأخيرة تمت درستها.

كلمات المفاتيح: الخلايا الشمسية، أرسنيدالإنديوما الغاليوم، نقاط الكم.

Résumé :

La cellule photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par des cellules solaires.

Ce travail consiste à étudier et simuler une cellule solaire à base du matériau InGaAs.

Ces alliages ternaires qui sont des semi-conducteurs III-V présentent des caractéristiques importantes.

Les caractéristiques d'une cellule solaire à base d'InGaAs/Si et l'influence des boîtes quantiques sur cette structure dans le but d'optimiser le rendement ont été étudiées.

Mots clés : cellule solaire, *gallium arsenic Indium*, boîtes quantiques.

Abstract:

Photovoltaic converts Light energy directly into electrical energy by solar cells.

This work aim to study and simulate solar cell based on InGaAs material.

These ternary alloys which are semiconductors III-V present important characteristics.

The characteristics of a solar cell based InGaAs/Si and influence of quantum dots on this structure in the mean of optimization of its efficiency it was studied.

Keywords: Solar cells, *Gallium Arsenic Indium*, quantum dots.

Listes des acronymes et abréviations :

In: Indium.

Ga: Gallium.

As: Arsenic.

x : Concentration d'indium.

L_w : Largeur du puits quantique.

Δa : Désaccord paramétrique.

E_g : Énergie de gap.

Δ_{so} : Bande spin orbite « split-off ».

L_h : Trou léger (Light hole).

hh: Trou lourd (Heavy holes).

E_v: Energie de la bande conduction.

E_c : Energie de la bande valence.

BC: Bande de conduction.

BV : Bande de valence.

K: Vecteur d'onde.

a : Paramètre de maille.

c: Vitesse de la lumière dans le vide.

ϵ_0 : La permittivité du vide.

m₀: La masse effective de l'électron.

b : Coefficient de courbure (Bowling).

C_{fc} : Cubique à face centrée.

E_i : Niveaux d'énergies.

h ν : Énergie de photon.

n_1 : Le niveau fondamental.

n_2 : La première état excité.

E_{en} : L'énergie des électrons.

$E_{n_{hh}}$: L'énème niveau d'énergie des trous lourds (l'énergie quantifiée).

$E_{n_{lh}}$: L'énème niveau d'énergie des trous légers (l'énergie quantifiée).

ΔE_{sh} : Décalage énergétique induit par la contrainte de cisaillement.

ΔE_{hh} : Décalage d'énergie de la bande de trous lourds.

ΔE_{lh} : Décalage d'énergie de la bande de trous légers.

Γ : Centre de la première zone de Brillouin.

λ : Longueur d'onde.

λ_B : La longueur d'onde De Broglie.

m_e^* : Masse effective des électrons.

KT : L'énergie thermique.

E_n : L'énergie de quantification.

$\rho(E)$: Densité d'états.

$E_{x,l}$: Niveaux d'énergie discrets de confinement suivant x .

$E_{y,m}$: Niveaux d'énergie discrets de confinement suivant y .

$E_{z,n}$: Niveaux d'énergie discrets de confinement suivant z .

m_l^* : Masse effective longitudinale.

m_t^* : Masse effective transversal.

m_{hh} : Masses effectives isotropes.

m_{hh}^* : Masse effective supérieure (bande des trous lourds) .

m_{lh}^* : Masse effective inferieure (bande des trous légers) .

γ_1 et γ_2 : Paramètre de Luttinger.

a_{ep} : Le paramètre de maille de la couche épitaxie(InGaAs).

a_{sub} : Le paramètre de maille du substrat (GaAs).

ε : La déformation ou le désaccord de maille.

C_{ij} : Les coefficients d'élasticité.

$\varepsilon_{||}$ (ε_{yy} ou ε_{zz}): Déformation biaxiale.

ε_{\perp} (ε_{xx}) : Déformation uni-axiale.

$E_{v moy}$: L'énergie moyenne de la bande de valence.

m_e : la masse de l'électron

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

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

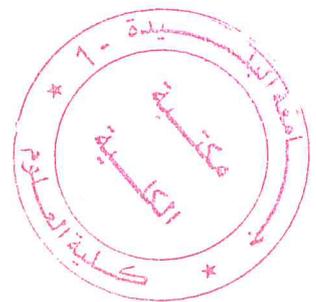
Δ_{hh-lh} : Dégénérescence des états énergétiques entre trous lourds et trous légers en $k = 0$.

$E_{V,moy}^{hyd}$: Énergie de centre de gravité de la bande de valence en $k=0$ qui varie à la contrainte.

E_c^{hyd} : Énergie de centre de gravité de la bande de v conduction en $k=0$ qui varie à la contrainte

a_v : Potentiels hydrostatiques de déformation pour la bande de valence.

a_c : Potentiels hydrostatiques de déformation pour la bande de conduction.



E_{hh}^{cisa} : Énergie induite par la contrainte de cisaillement avec la bande de trous lourds.

E_{lh}^{cisa} : Énergie induite par la contrainte de cisaillement avec la bande de trous légers.

E_{so}^{cisa} : Énergie induite par la contrainte de cisaillement avec la bande de trous spin-splittée.

b : Est le potentiel de déformation tétragonale.

E_V : L'énergie du haut de la bande de valence.

E_C : L'énergie du bas de la bande de conduction.

E_g^{cot} : Énergie de Gap sous contrainte.

h_c : L'épaisseur critique.

β : Coefficient qui prend les valeurs suivantes selon le type de la structure.

γ : Le coefficient de poisson.

m_e : Masse de l'électron.

h : Constante de Planck.

E_{ghh} Et E_{glh} : L'énergie de la bande interdite gap trous lourds et trous légers.

E_{tr} : L'énergie de transition.

λ_e : La longueur d'onde d'émission.

E_{ei} : Énergies de quantifications des électrons.

E_{hi} : Énergies de quantifications des trous.

L_{dot} : Largeur de la boîte.

E_n : Niveaux d'énergie dans la bande de conduction.

E_m : Niveaux d'énergie dans la bande de valence.

k : Constant de Boltzmann

E_{G-QD} : Gap d'énergie de la boîte quantique

E_{G-B} : Gap d'énergie de la couche barrière

Introduction général.....	1
---------------------------	---

Chapitre 1 :

1.1 Introduction.....	2
1.1 Les semi-conducteurs	2
1.2 Les types de semi-conducteurs	3
1.2.1 Semi-conducteur intrinsèque.....	3
1.2.2 Semi-conducteur extrinsèque	3
1.3 La jonction PN.....	3
1.4 Bande d'énergie	4
1.5 Définition de semi-conducteurs III-V	4
1.5.1 Les composés binaires, ternaires et quaternaires.....	5
1.5.1.1. Les composés binaires.....	5
1.5.1.2. Les composés ternaires et quaternaires	6
1.5.1.2.1. Ternaires	6
1.5.1.2.2. Quaternaires 1+3.....	6
1.5.1.2.3. Quaternaires 2+2.....	6
1.5.2 Structure cristalline.....	7
1.5.3 Le paramétré de maille	7
1.6 Propriétés optiques	8
1.6.1 Indice de réfraction.....	8
1.6.2 Coefficient de réflexion.....	9
1.6.3 Absorption.....	9
1.7. Energie du Gap (E_g)	10
1.8 Propriétés du silicium.....	10
1.8.1. Propriétés structurales.....	10
1.8.2. Propriétés électroniques.....	11
1.9. Propriétés de l'InGaAs.....	12
1.9.1. Propriétés structurales.....	12
1.9.2. Propriétés électroniques.....	13
1.10. Généralités sur le photovoltaïques.....	14
1.10.1. Qu'est-ce que la lumière.....	14
1.10.2. Couleur et longueur d'onde.....	15
1.10.3. Le rayonnement solaire.....	16
1.10.4. Rayonnement solaire et atmosphère.....	17
1.10.5. Cellules et panneaux photovoltaïques.....	18
1.10.5.1. Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque.....	19
1.10.5.2. Principe de fonctionnement.....	19
1.10.5.3. Schéma équivalente large d'une cellule solaire.....	20
1.10.5.4. Caractéristiques électriques et optiques d'une cellule solaire... 21	
1.10.5.4.1. Courant de court-circuit.....	21
1.10.5.4.2 Tension en circuit ouvert.....	21
1.10.5.4.3. Facteur de forme.....	22
1.10.5.4.4. Le rendement d'une cellule PV.....	22
1.10.6. Les points à retenir.....	23
1.11. Conclusion.....	24

Chapitre 2 :

2. Les boîtes et les puits quantique.....	25
2.0. introduction	25
2.1. Le paramétré de maille.....	25
2.2. Epaisseur critique.....	25

2.3. Masse effective.....	27
2.3.1. Masse effective des électrons.....	27
2.3.2. Masse effective des trous.....	28
2.4. Effets du confinement.....	28
2.4.1. Puits quantique.....	29
2.4.2. Fil quantique (1D).....	29
2.4.3. Boîte quantique (0D).....	30
2.5. Boîte quantique.....	30
2.5.1. Définition.....	30
2.6. Puits quantique.....	31
2.6.1 : Définition.....	31
a) puits quantiques de type-I	32
b) puits quantiques de type-II.....	33
2.7. L'équation de Schrödinger dans un puits quantique.....	33
2.8. La contrainte.....	34
2.9. Effet de la contrainte sur le Gap d'énergie.....	36
2.10. Conclusion.....	40
Chapitre 3 :	
3.1 Résultats et discussions des simulations.....	41
3.1.0. Introduction	41
3.1.1. Paramètre de maille.....	41
3.1.2. Désaccord de maille.....	42
3.1.3. L'épaisseur critique.....	43
3.1.4. La bande interdite contrainte et non contrainte.....	42
3.1.5. Energie de la bande interdite ou gap.....	45
3.1.6. Coefficient d'absorption.....	46
3.2.1. Barrière de potentiel.....	47
3.2.2. Énergies de quantifications.....	47
3.2.2.1. Quantification des porteurs dans le puits.....	47
3.2.2.2. Énergies de quantifications des trous lourds.....	49
3.2.2.3. Énergies de quantifications des trous légers.....	50
3.2.3. Énergies de transitions.....	50
3.2.4. La longueur d'ondes d'émissions.....	51
3.3. Boîtes quantique pour le photovoltaïque.....	53
3.3.1. Caractéristiques courant-tension.....	54
3.3.2. Caractéristiques I(V) boîtes quantiques.....	54
3.3.3. Puissance et puissance maximal avec boîtes quantiques.....	54
3.4. Conclusion.....	56
Conclusion Générale.....	57
Bibliographie.....	58

Liste des figures :

Chapitre 1 :

Figure 1.0.a : Diffusion des électrons et Diffusion des trous.....	3
Figure 1.0.b : \vec{E}_1 est dirigé de N vers P dans la zone de transition.....	3
Figure 1.1 : Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux.....	4
Figure 1.2 : Tableau périodique partiel.....	5
Figure 1.3 : mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.....	7
Figure 1.4 : Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan.....	9
Figure 1.5 : Maille élémentaire (a) et structure de bandes électroniques (b) du Si.....	11
Figure 1.6 : Energie de gap de différents SCs en fonction de leurs paramètres de maille a.....	13
Figure 1.7 : Maille élémentaire (a) et structure de bandes électroniques (b) de l'InGaAs.....	14
Figure 1.8 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme.....	16
Figure 1.9 : Le Soleil (document SOHO-EIT/ ESA-NASA).....	17
Figure 1.10 : Définition de l'Air Mass : $m = 1/\sin(h)$	18
Figure 1.11 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.....	20
Figure 1.12 : Schéma équivalente large d'une cellule solaire.....	20
Figure 1.13 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	21
Figure 1.14 : Évolution des rendements record en laboratoire par technologie (source : NREL).....	23

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : illustration d'une couche contrainte.....	26
Figure 2.2 : Différents types de confinement et densités d'états associées.....	30
Figure 2.3 : Illustration d'un puits quantique.....	31
Figure 2.4 : Profil de potentielle dans un puits quantique de type 1 et un puits quantique de type 2.....	32
Figure 2.5 : Puits quantique conventionnel.....	34
Figure 2.6 : illustration des types de déformation.....	35
Figure 2.7 : Évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de l'état de contrainte d'une couche déposée sur un substrat.....	36
Figure 2.8 : Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct.....	39

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Variation du paramètre de maille en fonction de la concentration d'indium.....	41
Figure 3.2 : Variation du désaccord paramétrique ε en fonction de la concentration d'indium.....	42
Figure 3.3 : Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium.....	43
Figure 3.4 : Variation de l'énergie de bande interdite de la structure contraint sur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$ en fonction de la concentration indium.....	44
Figure 3.5 : variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la température et de la concentration de l'Indium.....	45
Figure 3.6 : Variation du coefficient d'absorption α en fonction de la température et de la concentration indium.....	45
Figure 3.7 : La différence de variation d'énergie ($\Delta E_{v_{lh}}, \Delta E_{v_{hh}}, \Delta E_c$) de la barrière de potentiel dans la bande de conduction et dans la bande de valence en fonction de la concentration de l'indium.....	46

Figure 3.8 : Variation des énergies de quantifications des porteurs dans le puits quantique pour différentes concentrations d'indium.....	47
Figure 3.9 : La variation des énergies de quantifications des trous lourds en fonction de la largeur du puits L_w pour différentes concentrations d'indium.....	48
Figure 3.10 : La variation des énergies de quantifications des trous légers en fonction de la largeur du puits L_w pour différentes concentrations d'indium.....	49
Figure 3.11 : La Variation des énergies de transition entre la bande de conduction et la bande des trous lourds en fonction de la largeur de puits L_w	50
Figure 3.12 : Variation des longueurs d'ondes d'émissions en fonction de la largeur du puits quantique L_w pour différentes concentrations d'indium.....	51
Figure 3.13 : Diagramme de bandes de systèmes à points quantiques (BQ's) <i>InGaAs/Si</i>	52
Figure 3.14 : structure <i>In_{0.5}Ga_{0.5}As /Si</i> pour un système contient 10 couches QDs.....	52
Figure 3.15 : Caractéristiques courant-tension de la structure <i>In_{0.5}Ga_{0.5}As/Si</i> pour 10 couches QDs	53
Figure 3.16 : Puissance délivrée par la cellule solaire en fonction de la tension....	54

Liste des tableaux :

Chapitre 1 :

Tableau 1.1 : Paramètres des principaux composés binaires III-V.....6

Tableau 1.2 : a , E_g et λ pour différentes compositions $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ à 300K.....13

Chapitre 2 :

Tableau.2.1 : représenté la valeur de β27

Chapitre 3 :

Tableau 3.1 : Quelques valeurs des paramètres de maille en fonction de variation de concentration $\text{In}(x)$42

Tableau 3.2 : présente les différents paramètres de la cellule solaire avec les boîtes quantiques54

A l'heure actuelle, les semi-conducteurs III-V fournissent la base de matériaux pour un certain nombre de produits commerciaux et technologiques, ainsi que de nouvelles classes d'appareils électroniques et optoélectroniques de pointe. Les caractéristiques opérationnelles de ces dispositifs dépendent de manière critique des propriétés physiques des matériaux constitutifs, qui sont souvent combinés dans des hétérostructures quantiques contenant des porteurs confinés à des dimensions de l'ordre d'un nanomètre. Ce développement permet la maîtrise des matériaux utilisés dans la conception des composants optoélectroniques. La plupart de ces matériaux sont obtenus par alliage sur des substrats standard. Ils pourraient par conséquent ouvrir un vaste domaine d'applications par exemple télécommunications, photovoltaïques... etc.

Le développement des techniques nano technologiques au cours des dernières décennies a accéléré les recherches sur les semi-conducteurs III-V qui à été exploités pour la fabrication des émetteurs et détecteurs.

Ainsi l'énergie solaire photovoltaïque qui permet de convertir directement le rayonnement solaire en électricité à l'aide des composants optoélectroniques appelés cellules photovoltaïques. Ces composants sont aussi généralement à base des semi-conducteurs, cette énergie propre et nouvelle peut apporter de réelles solutions aux divers problèmes qui se posent actuellement concernant les changements climatiques, les crises énergétiques [1].

L'objectif principal de ce travail est la simulation des caractéristiques électriques et optiques d'un dispositif à hétérostructure de la famille III-V /IV des semi-conducteurs, à travers les logiciels MATLAB et SILVACO.

Dans le premier chapitre nous allons aborder des généralités sur les matériaux semiconducteurs III-V et IV et les paramètres photovoltaïques des cellules solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les équations de base des semiconducteurs et les modèles mathématiques utilisés pour les cas puits et boites quantique.

-Enfin nous présenterons au troisième chapitre les résultats de la simulation obtenus avec discussions.

Chapitre 1

État de l'art

1.0 Introduction :

Dans ce premier chapitre nous allons aborder les principales caractéristiques des semi-conducteurs et plus particulièrement les semiconducteurs III-V qui ont participé à une grande révolution en électronique et en optoélectronique, ce qui a abouti à l'apparition des structures à couches semiconductrices très fines et de très bonne qualité, D'où l'avènement des nouveaux produits (diodes, transistors, diodes laser à semi-conducteur) ainsi que les nanostructures (puits quantiques, boîtes quantiques).

Par la suite, nous nous pencherons sur le photovoltaïque qui représente un enjeu important dans les énergies renouvelables et plus généralement dans les énergies en général.

Nous aborderons brièvement l'historique du photovoltaïque : nous présenterons le principe de fonctionnement d'une cellule solaire ainsi que les paramètres photovoltaïques afin d'améliorer les performances des cellules solaires.

1.1 Les semiconducteurs :

On différencie trois types de matériaux : les isolants, les conducteurs et les semiconducteurs, qui se situent intermédiaires entre les métaux et les isolants.

À $T = 0 \text{ K}$ un semiconducteur se comporte comme un isolant. Néanmoins, il conduit l'électricité dès que la température augmente. La résistivité des semi-conducteurs varie entre (10^{-3} - $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$), alors que celle des métaux est de l'ordre de $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ et celle des isolants peut atteindre $10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$.

Dans un semiconducteur, il existe deux types de porteur de charge participant à la conduction par électrons (e^-) et la conduction par trou (h^+). Lorsque dans un cristal certaines liaisons entre atomes se cassent, les électrons sont libres de se déplacer, l'emplacement de la liaison cassée est donc appelé trou. Sous l'effet du champ électrique les électrons se déplacent dans le sens inverse du champ et les trous se déplacent dans le sens de champ [2].

1.2 Les types de semi-conducteurs :

1.2.1 Semiconducteur intrinsèque :

Un semiconducteur est dit intrinsèque si le nombre d'électrons est égal au nombre de trous. Le taux d'impuretés y est très faible (moins d'un atome pour 10^{13} atomes de l'élément semiconducteur).

1.2.2 Semiconducteur extrinsèque :

Un semiconducteur est dit extrinsèque s'il comporte un taux d'impuretés très grand par rapport à celui du semiconducteur intrinsèque (un atome pour 10^5 atomes de l'élément semi-conducteur). Selon la nature des impuretés il existe deux types des semi-conducteurs : type n et type p.

1.3 La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

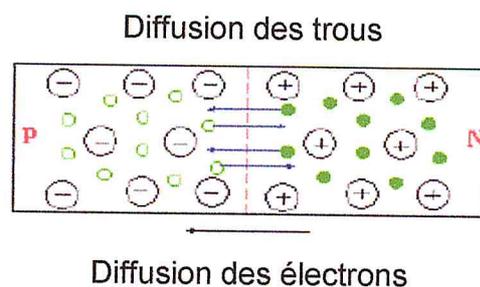


Figure 1.0.a : Diffusion des électrons et Diffusion des trous [3].

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui sont créés un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [4].

Zone de transition

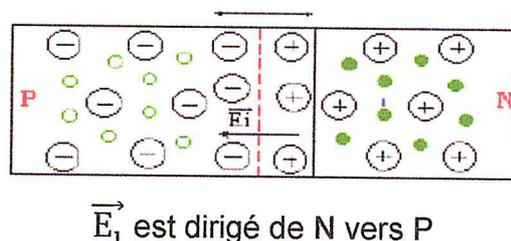


Figure 1.0.b : \vec{E}_1 est dirigé de N vers P dans la zone de transition [3].

1.4 Bande d'énergie :

En termes d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un écart énergétique. Il s'agit en fait de la quantité d'énergie que doit avoir un électron pour sauter de la bande de valence vers la bande de conduction. Une fois dans la bande de conduction, l'électron est libre de se déplacer à travers le matériau et n'est plus lié à aucun atome particulier.

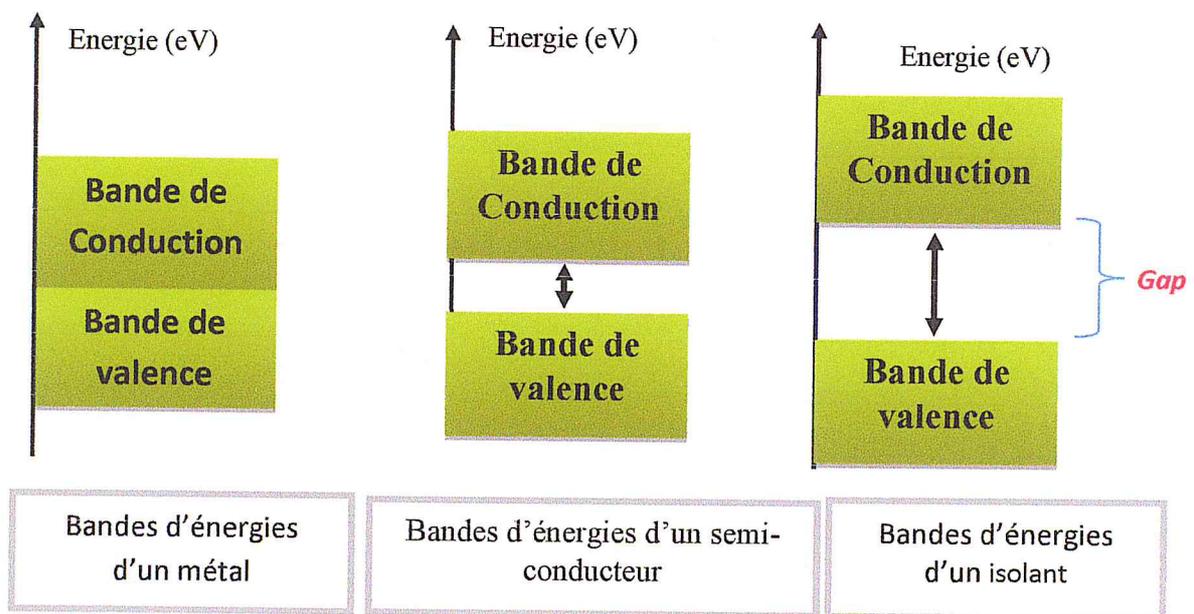


Figure 1.1 : Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux [4].

1.5 Définition de semiconducteurs III-V :

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V du tableau de la classification périodique de Mendeleïev (figure 1.2). Ainsi de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés [5].

		III	IV	V	VI
		5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène
		13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	
80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	

Figure 1.2 : Tableau périodique partiel [5].

1.5.1 Les composés binaires, ternaires et quaternaires :

1.5.1.1 Les composés binaires :

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont laquelle la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée. Les composés contenant du bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie ; ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou pour l'optoélectronique ou une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à base de Gallium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes [6,7].

Composé III-V	Eg (ev)	m*/m ₀	μ (cm ² /VS)	a (Å°)
GaP	2,26	0,82	110	5,4512
GaAs	1,42	0,067	8500	5,6533
GaSp	0,72	0,042	5000	6,0959
InP	1,35	0,077	4600	5,8686
InAs	0,36	0,023	33000	6,0584
InSp	0,17	0,0145	80000	6,4794

Tableau 1.1 : Paramètres des principaux composés binaires III-V [7,6].

1.5.1.2 Les composés ternaires et quaternaires :

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires, ou quaternaires qui sont identifiés de la façon suivante :

1.5.1.2.1 Ternaires :

S'il y a substitution de 2 atomes sur l'un des sous réseaux, soit : $A_xA'^{(1-x)}B$

Exemple : $Ga_xIn_{1-x}P$, lorsque la composition exacte compte peu, on écrit tout court $GaInP$.

1.5.1.2.2 Quaternaires 1+3 :

S'il y a substitution de 3 atomes sur des sous réseaux soit :

$A_xA'yA''^{(1-x-y)}B$.

Exemple : $xIn_yAl^{(1-x-y)}As$.

1.5.1.2.3 Quaternaires 2+2 :

S'il y a substitution de 2 atomes sur chacun des deux sous réseaux, soit : $A_xA'^{(1-x)}B_yB''^{(1-y)}$.

Exemple : $xIn^{(1-x)}P_yAs^{(1-y)}$. La plupart des solutions solides ainsi réalisées sont complètes, la loi de Vegard (relation linéaire entre le paramètre de réseau et la composition) est approximativement suivie, et on observe une évolution progressive

et régulière des propriétés (dont la bande interdite et les paramètres cristallins) en fonction du taux de substitution (composition) [7,6].

1.5.2 Structure cristalline :

La plupart des matériaux III-V se cristallisent dans la structure sphalérite dite « ZincBlende » présentée sur la Figure 1.3. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant, est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément V. Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube, d'une quantité $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$, a_0 étant le paramètre cristallin, c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire [8].

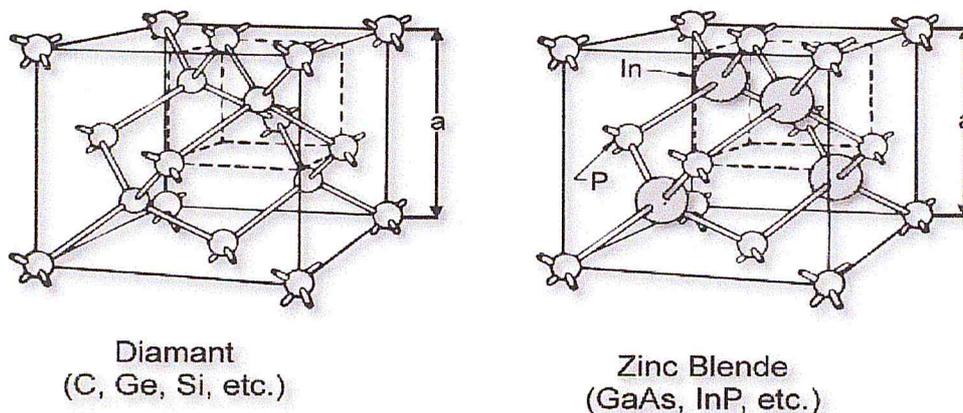


Figure 1.3 : mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende [8].

De ce fait dans les matériaux III-V, les liaisons ne sont pas simplement covalentes comme dans le Silicium. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III. Dans le cas du phosphore d'indium, le phosphore possède cinq électrons périphériques et l'indium trois. Dans le cristal, chaque atome de phosphore est entouré de quatre atomes d'indium, et chaque atome d'indium est entouré de quatre atomes de phosphore.

Il se produit alors un échange d'électrons, et le cristal se construit avec les ions P^+ et In^- , qui ont tous quatre électrons périphériques. Cette répartition est à l'origine du caractère partiellement ionique et partiellement covalent des liaisons (semi-conducteurs polaires), qui sont orientées dans l'espace suivant les axes de symétrie d'un tétraèdre régulier [9].

1.5.3 Le paramètre de maille :

Le paramètre de maille se définit comme étant la distance entre deux atomes dans un cristal. Lorsqu'un atome étranger est introduit dans le réseau cristallin, il provoque en général une variation du paramètre cristallin qui se traduit par une expansion ou une contraction du réseau, en fonction de la taille des atomes. On dit que la variation de « a » obéit à la loi de Végard si elle est linéaire avec le taux de substitution x. Nous avons utilisé la loi de Végard donnée par l'équation 1.1 pour le calcul du paramètre de maille [10] :

$$a(\text{InGaAs}) = (1 - x) * a(\text{GaAs}) + x * a(\text{InAs}) \quad (1.1)$$

1.6 Propriétés optiques :

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

1.6.1 Indice de réfraction :

L'indice de réfraction provient du phénomène de réfraction qui désigne le changement de direction de la lumière au passage d'un milieu à un autre. La notion d'indice de réfraction a d'abord été introduite empiriquement comme coefficient dans les lois de (snell-descarts) [11] :

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_r \quad (1.2)$$

avec :

- n_1 et n_2 : les indices de réfractons de deux milieux.
- θ_i et θ_r : les angles des rayons lumineux par rapport à la normale.

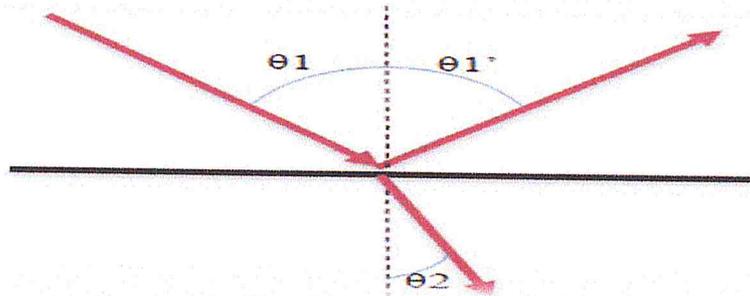


Figure 1.4 : Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan [11].

L'une des raisons pour laquelle nous étudions l'indice de réfraction est de réduire la réflectivité des matériaux et par conséquent, augmenter l'intensité du faisceau incident, et ce par l'introduction de couches additionnelles. Ces films doivent avoir une épaisseur bien spécifique et un indice de réfraction approprié pour pouvoir jouer le rôle de couches antireflet [11].

La variation de l'indice de réfraction n en fonction de la longueur d'onde a été évaluée selon la formule de sellmeier [12] :

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B}{1-C/\lambda^2} + \frac{D}{1-E/\lambda^2} \quad (1.3)$$

Avec A, B, C, D, E sont les coefficients de sellmeier.

1.6.2 Coefficient de réflexion :

La réduction de la réflexion de la lumière se fait en jouant sur les indices de réfraction des matériaux traversés. Plus la différence des indices de réfraction est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante [11].

La réflexion s'exprime par l'équation suivante :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.4)$$

1.6.3 Absorption :

Seule la lumière absorbée (photon) est restituée sous forme d'énergie électrique. Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau [11].

Le coefficient d'absorption (α), est une propriété qui définit la quantité de lumière absorbée par un matériau. Les électrons dans la bande de valence d'un semiconducteur peuvent absorber des photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite (E_g), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$, pour une énergie E supérieure à l'énergie de la bande interdite est donnée par :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (1.5)$$

où

$\alpha(E)$: coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon E .

α_0 : constante.

E_g : énergie de gap du matériau semi-conducteur.

1.7 Energie du Gap(E_g) :

L'énergie du gap E_g est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation.

Le gap énergétique pour la plupart des alliages ternaires est approximativement donné sous la forme d'une fonction quadratique [13] :

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}(1-x)\text{As}) = (1-x) * E_g(\text{GaAs}) + x * E_g(\text{InAs}) - b * x * (1-x) \quad (1.6)$$

avec

- b : le paramètre de courbure (en anglais : bowingparameter).

- x : la concentration d'In.

1.8 Propriétés du silicium :

1.8.1 Propriétés structurales :

Le silicium est le semiconducteur le plus utilisé dans l'industrie, principalement à cause de son faible coût de fabrication et surtout des propriétés de son oxyde naturel et de la qualité électronique de l'interface qu'il forme avec le silicium. Sur le marché standard de la microélectronique, le silicium se trouve sous forme de plaquette (*wafers*) de tailles variées (25-450 mm) issues de lingots fabriqués suivant la méthode de tirage « Czochralski ou Cz ».

Le silicium cristallise sous la forme diamant qui peut être décrite comme étant formée de deux structures cubiques à faces centrées (cfc.) décalées d'une translation $a/4$, $a/4$, $a/4$ suivant la diagonale du cube de côté a . La maille élémentaire du silicium est présentée dans la figure 1.5a.

L'arête du cube est le paramètre de maille $a=5,431 \text{ \AA}$. Le silicium est mécaniquement robuste avec un module de Young de $5,8 \cdot 10^{11} \text{ dyn.cm}^{-2}$.

Chimiquement le silicium est très stable. A l'air et à température ambiante, l'oxyde naturel SiO_2 se forme sur une épaisseur voisine de 2 nm. Habituellement une oxydation thermique ou un dépôt de silice est pratiqué pour protéger le silicium. Il faut noter que la forte adhésion de l'interface SiO_2/Si et l'isolation électrique remarquable de la silice ont permis le développement de la technologie CMOS. Ceci représente un avantage majeur de la filière Si comparée à celles des SCs III-V.

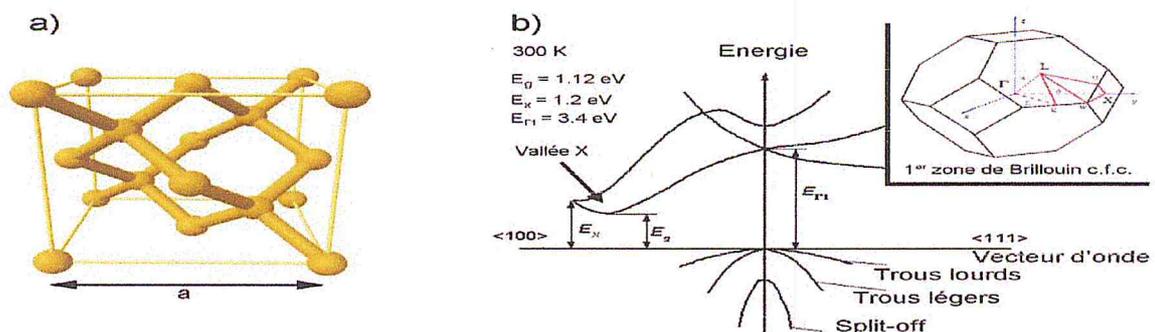


Figure 1.5 : Paramètre de Maille élémentaire (a) et structure de bande électroniques du silicium (b) [14].

1.8.2 Propriétés électroniques :

La périodicité du cristal mène à une distribution des états électroniques disponibles sous forme de bande. La figure 1.5b présente la structure de bandes électroniques du silicium. L'énergie est tracée en fonction du moment cristallin suivant des directions remarquables $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$. Nous voyons que le minimum absolu de la bande de conduction ne se trouve pas au-dessus du maximum de la bande de valence mais décalé dans les directions $\langle 100 \rangle$: à ce minimum est associée la vallée X. Le silicium est donc un SC à gap indirect, ce qui signifie qu'une émission d'un photon par désexcitation d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence est toujours accompagnée d'une perte en énergie sous forme de phonon. Le silicium est donc un mauvais émetteur de lumière : les durées de vie radiative des électrons dans le Si sont 1000 fois plus longues que dans le cas des SCs III-V à gap direct [14].

1.9 Propriétés de l'InGaAs :

1.9.1 Propriétés structurales :

L'InAs et le GaAs cristallisent dans la structure Zinc-Blende qui est semblable à la structure diamant du Si, la différence étant que l'un des deux sous réseaux cfc. est formé par les atomes d'éléments III et l'autre par les atomes d'éléments V.

Les liaisons entre les atomes III et les atomes V sont essentiellement de nature covalente (donc faiblement ionique) et les orbitales sont hybridées de type sp^3 . L'alliage ternaire $In_{1-x}Ga_xAs$ est réalisé par substitution aléatoire des atomes III (In et Ga) à l'intérieur du sous réseau d'éléments III. Ainsi la formation d'un tel alliage conserve la structure cristalline initiale Zinc-Blende.

La figure 1.6 montre l'évolution de l'énergie de gap et du paramètre de maille des SCs III-V en fonction de leur composition (courbe pleine). Le paramètre de maille de l' $In_{1-x}Ga_xAs$ varie linéairement en fonction de x suivant la loi de Vegard qui s'écrit dans notre cas (entre InAs et GaAs) : $a(\text{Å}) = 6,0583 - 0,405x$. Dans le tableau 1.2, nous retrouvons les valeurs de gap et du paramètre de maille pour différentes compositions pour le cas $In_{1-x}Ga_xAs$ à 300K. Les désaccords de maille avec le silicium en fonction de x sont aussi rappelés [14].

300K	Paramètre de maille(Å)	Energie de gap (eV)	Longueur d'onde (nm)	Désaccord Paramétrique Avec le Si (%)
InAs	6.0583	0.354	3503	11.5
In _{0.7} Ga _{0.3} As	5.93675	0.569	2179	9.3
In _{0.6} Ga _{0.4} As	5.89625	0.660	1879	8.5
In _{0.5} Ga _{0.5} As	5.85575	0.762	1627	7.8
GaAs	5.65325	1.424	871	4.1

Tableau 1.2 : a, E_g et λ pour différentes compositions In_{1-x}Ga_xAs à 300K.

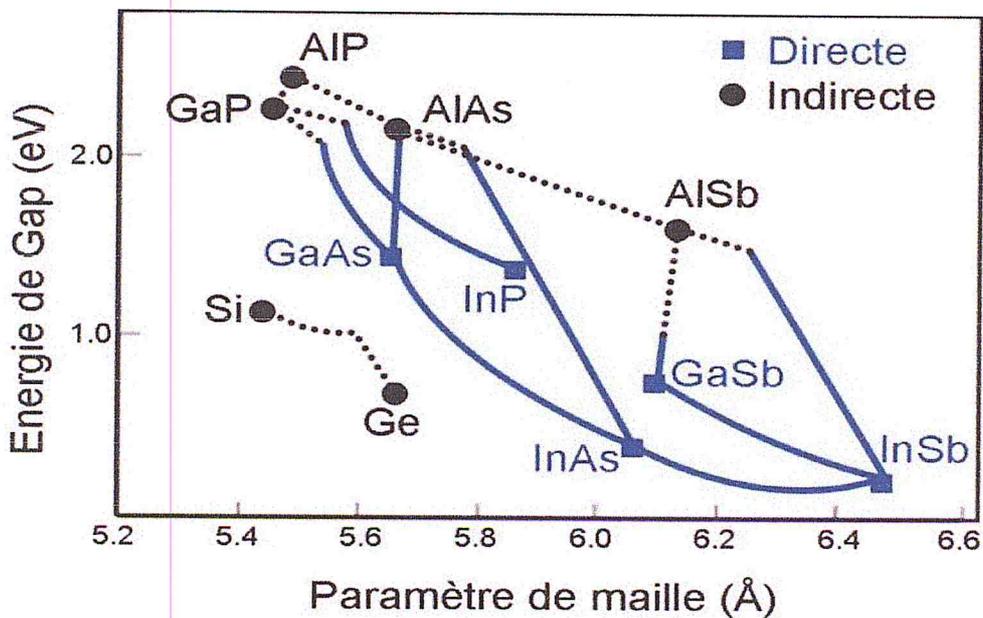


Figure 1.6 : Energie de gap de différents SCs en fonction de leurs paramètres de maille a.

1.9.2 Propriétés électroniques :

La figure 1.7 représente une maille élémentaire et la structure de bandes d'un alliage InGaAs. A la position Γ ($K=0$) sont placés les extrema absolus des bandes de valence et de conduction. Ainsi, l'InGaAs est un SC à gap direct. Dans ce matériau,

les transitions entre bandes de valence et de conduction sont le plus souvent radiatives et donc bien adaptées pour l'émission de lumière.

On peut remarquer sur la figure 1.6 que l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ est le candidat à gap direct le plus intéressant pour l'intégration sur Si : alliage III-V dont le gap peut être inférieur à celui du Si et dont le paramètre de maille est le plus proche de celui du Si. La bande interdite de l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ non contraint suit une dépendance parabolique avec x suivant la relation : $E_g(x) = A + B \cdot x - C \cdot x \cdot (1-x)$. Nous trouvons dans la littérature plusieurs valeurs très proches de A, B et C calculées à l'aide des gaps de l'InAs, du GaAs et d'un ternaire connu. Nous donnons à titre d'exemple [14] :

$$E_g^{4K}(x) = 0.418 + 1,0997x - 0,5212x \cdot (1-x) \quad (1.9a)$$

$$E_g^{300K}(x) = 0.354 + 1,0665x - 0,5017x \cdot (1-x) \quad (1.9b)$$

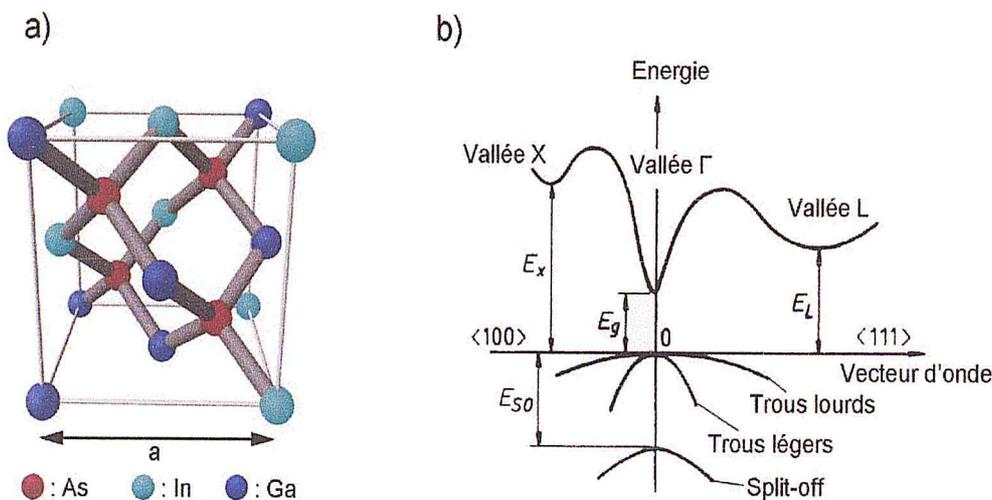


Figure 1.7 : Maille élémentaire (a) et structure de bandes électroniques (b) de l'InGaAs [14].

1.10 Généralités sur le photovoltaïques :

1.10.1 Qu'est-ce que la lumière :

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique. Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur

d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

1.10.2 Couleur et longueur d'onde :

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquences radio, microondes...

Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, et propres au développement de la vie.

Regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre : l'infrarouge procure de la chaleur, le visible est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie, s'il est besoin de le préciser), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3 μm (= 3 000 nm) figure 2.4.

Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer « ultraviolette » la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ? En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380 nm) au rouge (longueur d'onde 780 nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche.

On réalise la même décomposition avec un prisme Figure 1.8.

On appelle spectre, ou répartition spectrale, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent. Une lumière rouge est une portion de lumière blanche, de même qu'une lumière bleue ou orange. Les lampes artificielles les plus courantes, quoique blanches à l'œil, diffèrent par leur spectre [15].

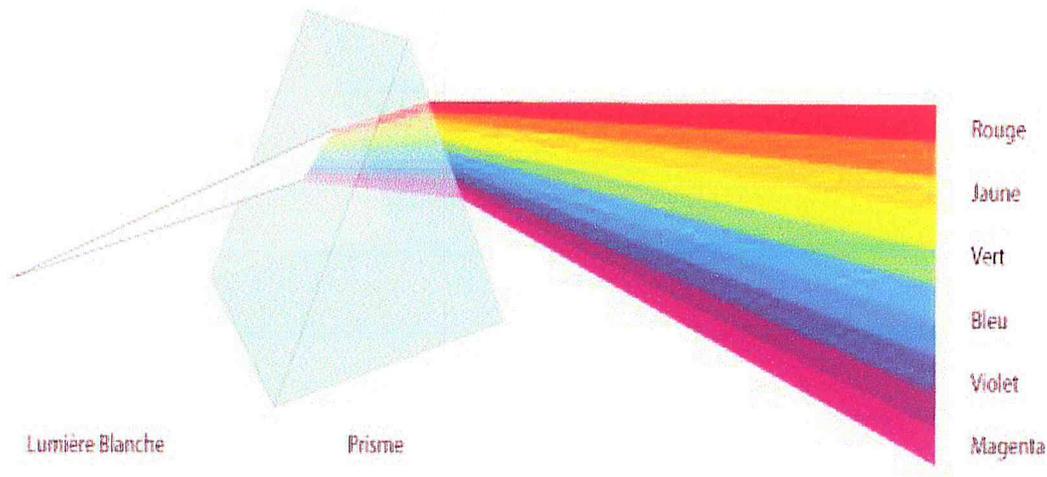


Figure1.8. Décomposition de la lumière blanche par un prisme [10].

1.10.3 Le rayonnement solaire :

Énergie naturelle par excellence, le Soleil, cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5 500 °C, nous dispense chaleur et lumière. Centre de notre système planétaire.

L'énergie solaires est une Source indirecte des énergies usuelles de notre temps (sous forme chimique et biochimique en particulier), ce n'est qu'au XVIIe siècle que l'on songea à utiliser directement le Soleil à des fins techniques : Lavoisier a, l'un des premiers, employé une lentille convergente de 1,30 m de diamètre pour obtenir la fusion d'un morceau de fer placé à son foyer.

Ce n'est qu'en 1954 que les premières piles solaires produisant de l'électricité firent leur apparition, grâce aux travaux de Bell Laboratoires (États-Unis).

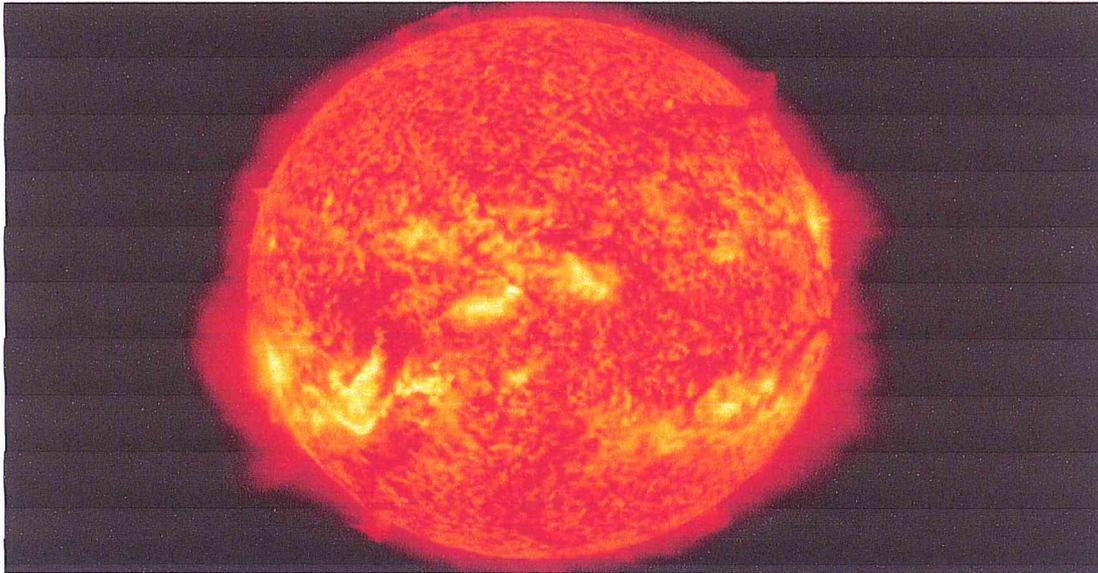


Figure 1.9 : Le Soleil (document SOHO-EIT/ ESA-NASA) [10].

On se reportera aux ouvrages cités en bibliographie pour tout savoir sur le Soleil : sa course, ses positions par rapport à la Terre et tous les paramètres physiques qui en découlent.

Nous nous contenterons ici de décrire les plus intéressants et utiles à l'exploitation du rayonnement solaire par les photo-générateurs.

1.10.4 Rayonnement solaire et atmosphère :

La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/s ; les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1 360 W/m^2 (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil) [15].

- **Définition de (W/m^2) :** Le watt par m^2 (W/m^2) est l'unité la plus utilisée pour quantifier le rayonnement solaire. C'est un flux, une puissance par unité de surface. 1 W/m^2 est aussi égal à 1 Joule par seconde et par m^2 puisque 1 W = 1 J/s. Ici l'énergie est électromagnétique, mais les unités sont les mêmes que pour une énergie électrique [15].

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1360 W/m^2 subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée.

En effet, si l'on fait face au Soleil, on le voit à une certaine hauteur, qu'on appelle hauteur apparente. C'est l'angle h entre le plan horizontal situé sous nos pieds et une droite pointée vers le Soleil.

On voit bien sur la Figure 1.10 que cet angle h détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère et donc les pertes engendrées.

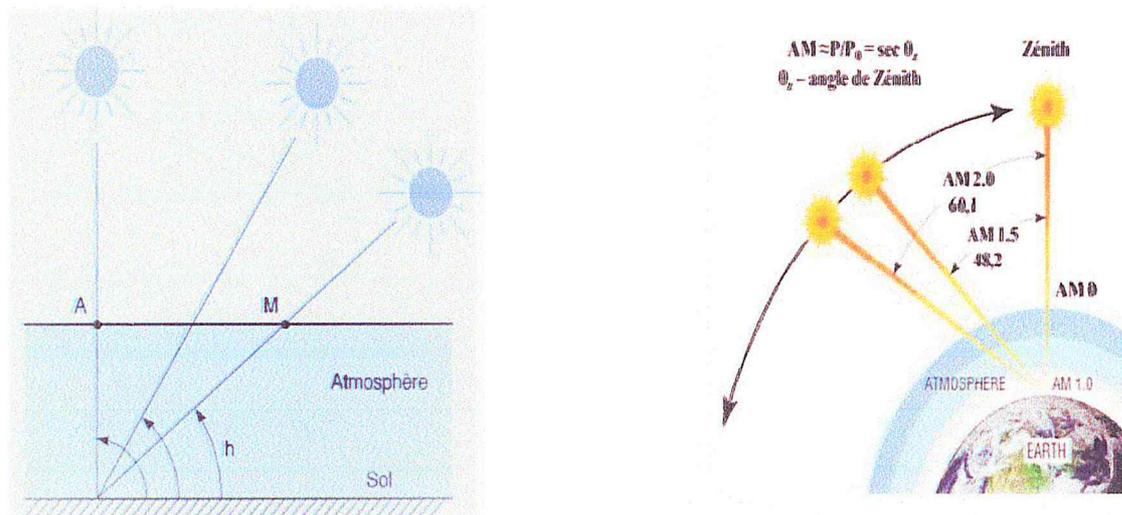


Figure 1.10 : Définition de l'Air Mass : $m = 1/\sin(h)$ [16].

On appelle m (masse atmosphérique), ou Air Mass, cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu.

Sur notre figure, $m = 1$ si le Soleil entre dans l'atmosphère au point A, et $m = 2$ s'il y entre en M, donc :

$$m = 1/\sin(h) \quad (1.7)$$

-Pour résumer, le soleil dispense typiquement à un instant t sur la terre (en rayonnement global) [14] :

- $1\ 000 \text{ W/m}^2$ avec un soleil au zénith et un ciel parfaitement dégagé.
- $100\text{-}500 \text{ W/m}^2$ sous un ciel nuageux.
- Moins de 50 W/m^2 sous un ciel vraiment couvert.

1.10.5 cellules et panneaux photovoltaïques :

Nous allons maintenant tenter de comprendre comment est produite l'électricité à partir de la lumière, et comment sont fabriqués les photo-générateurs.

Chacun sait que : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Convertir l'énergie lumineuse en électricité, telle est la fonction d'une photopile ou d'une cellule solaire.

Tous les photo-générateurs sont donc des transformateurs d'énergie qui, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, produisent de l'énergie électrique.

1.10.5.1 Historique : découverte de l'effet photovoltaïque :

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.8)$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ c'est la longueur d'onde.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte d'effet photovoltaïque valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

- L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.
- En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.
- 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.

1.10.5.2 Principe de fonctionnement :

Lorsqu'un matériau (semiconducteur) est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons auront l'énergie nécessaire pour franchir le Gap :

Les électrons sont excités des couches de valence pour se retrouver dans la couche de conduction. Les électrons " excités " créent une tension électrique continue faible.

Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [17].

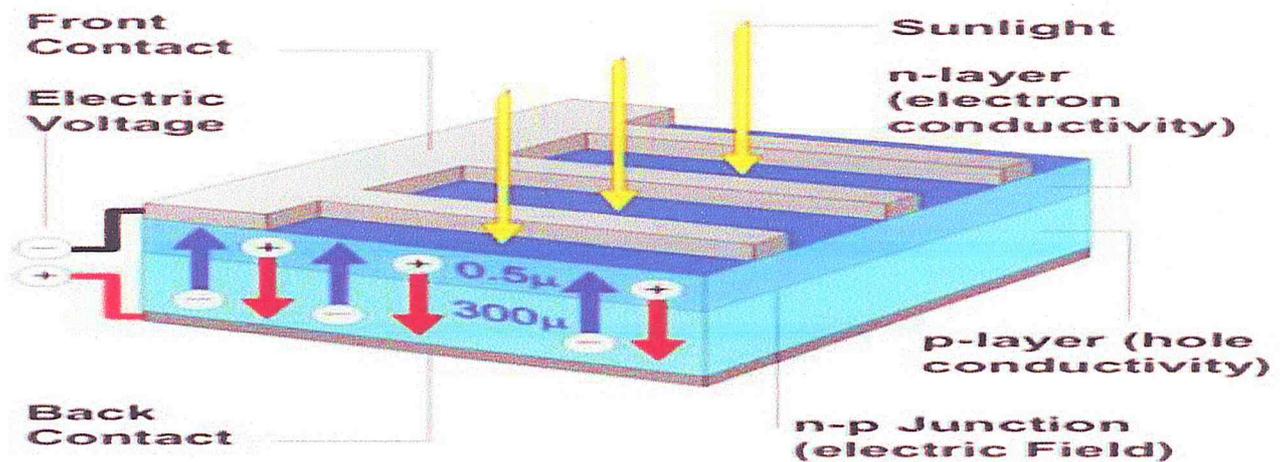


Figure 1.11 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique [18].

1.10.5.3 Schéma équivalent large d'une cellule solaire :

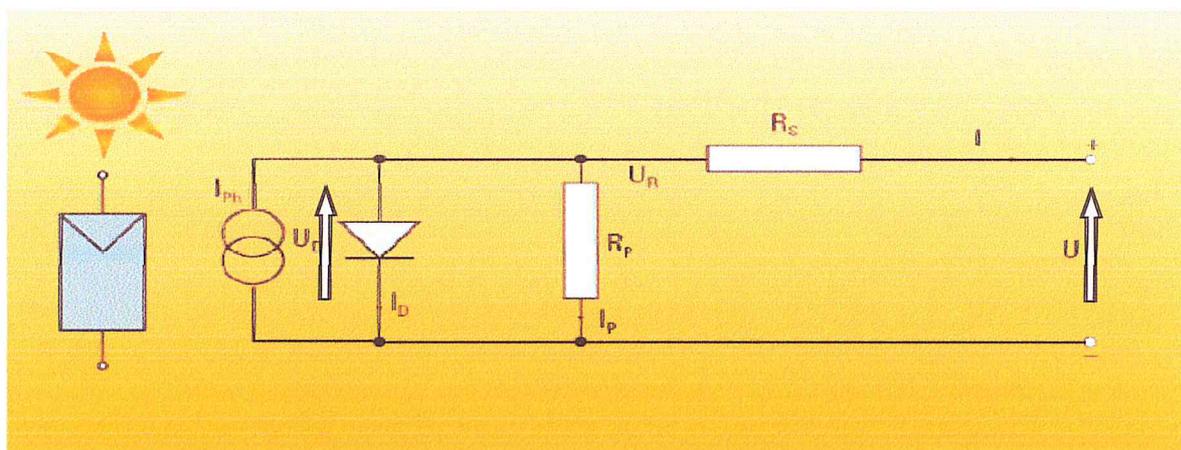


Figure 1.12 : Schéma équivalent large d'une cellule solaire [19].

1.10.5.4. Caractéristiques électriques et optiques d'une cellule solaire :

Le tracé de la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire est représenté sur la figure (1.7) qui montre la variation du courant en fonction de la tension ($I-V$) pour une cellule solaire typique. Sous obscurité, la courbe caractéristique est la même que celle d'une diode simple, et sous éclaircissement, la courbe est décalée vers le bas d'une valeur égale au photo-courant I_{ph} . I_{cc} et le V_{co} sont, respectivement, le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert.

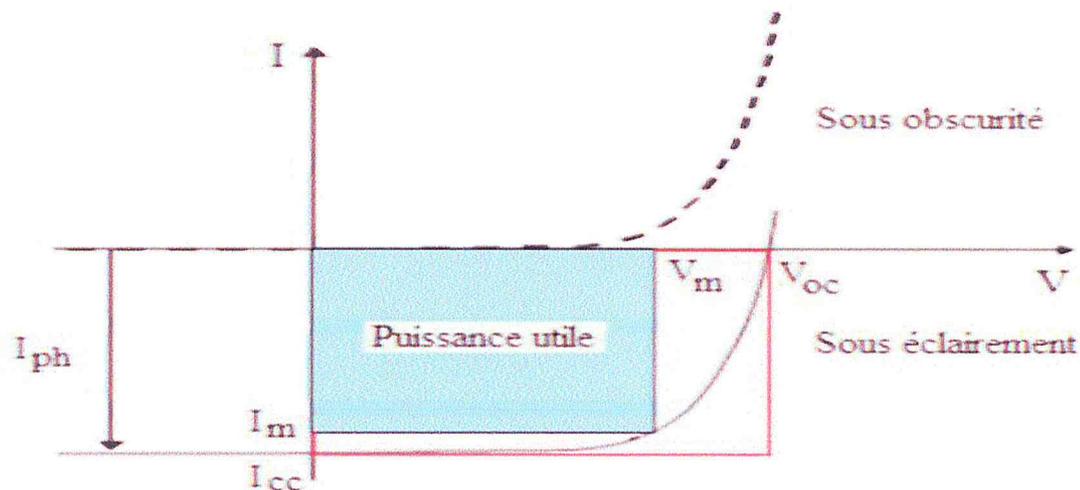


Figure 1.13 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [20].

1.10.5.4.1 Courant de court-circuit :

Courant de court-circuit est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V=0$). Il correspond au photo-courant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

1.10.5.4.2 Tension en circuit ouvert :

Si la cellule est laissée en circuit ouvert (courant nul), la tension mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{co} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant I_{cc} . Elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.9)$$

où : I_0 est le courant de saturation de diode

1.10.5.4.3 Facteur de forme :

Le facteur de forme ou FF (Fill Factor) est le rapport entre la puissance maximale débitée $V_m \cdot I_m$ (la surface du plus petit rectangle) et la puissance idéale $V_{co} \cdot I_{cc}$ (la surface du plus grand rectangle) .où V_m et I_m sont les valeurs de tension et du courant correspondant au point de fonctionnement pour lequel la puissance, qui est égale à $U \cdot I$, est maximale. Le FF, est. Donne par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (1.10)$$

1.10.5.4.4. Le rendement d'une cellule PV :

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque

avec :

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (1.11)$$

- η : rendement énergétique ;
- E : éclairement (W/m^2) ;
- S : surface active de la cellule (m^2) ;
- P_m : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : *Standard Test Condition*), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1\ 000\ W/m^2$, à la température de $25^\circ\ C$ sous un spectre AM 1,5.

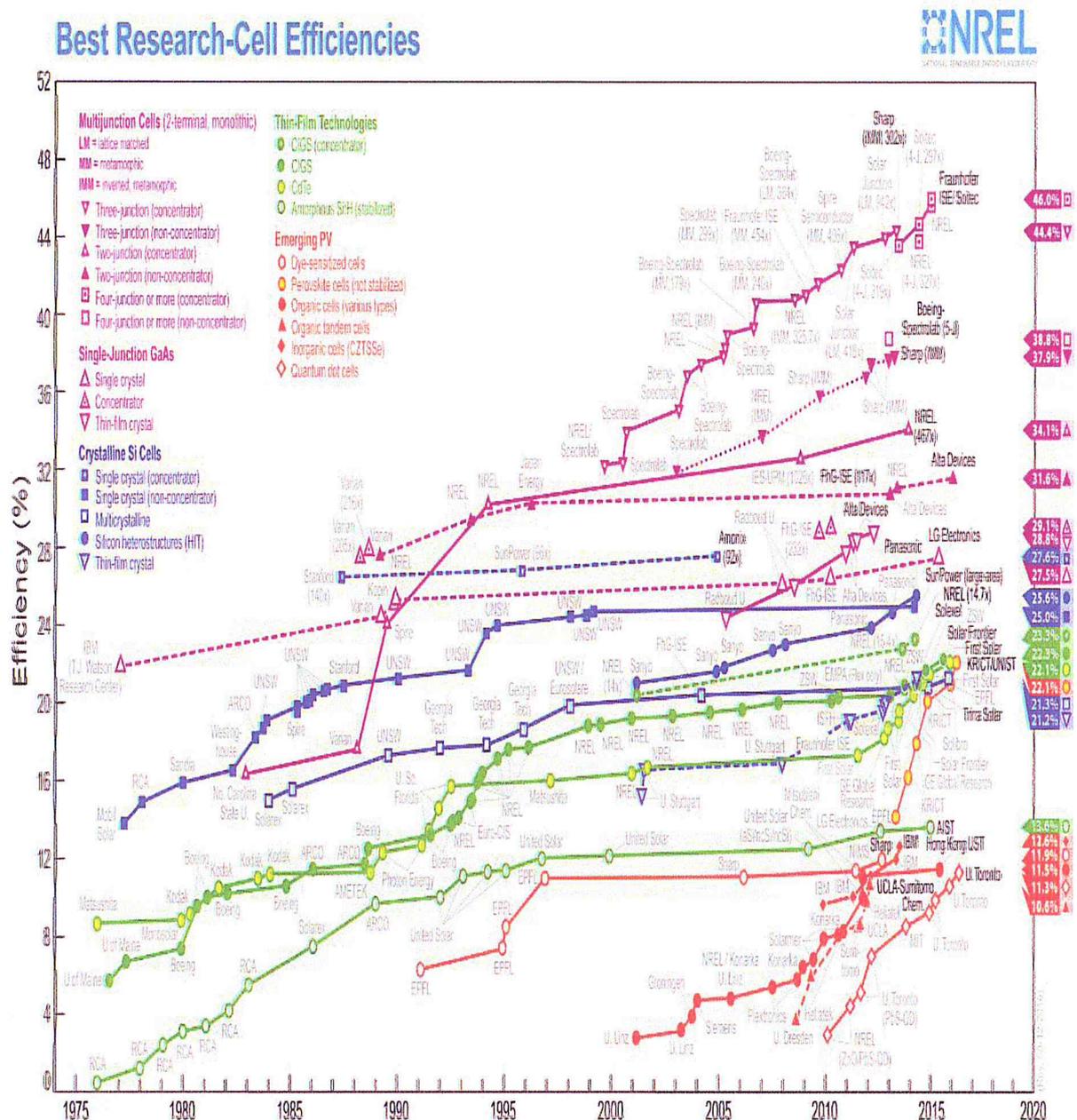


Figure 1.14 : Évolution des rendements record en laboratoire par technologie (source : NREL) [20].

1.10.6 Les points à retenir :

- La cellule PV convertit la lumière en électricité.
- Le courant et la tension d'une cellule PV et du type Continu.
- Point de la Puissance Maximale (MPP).
- $P_{max} = V_{max} \times I_{max}$.
- V_{CO} : C'est la tension maximale aux bornes de la cellule à courant nul.
- I_{CC} : C'est le courant maximum circulant dans la cellule à tension nulle.

Quelques remarques :

- W_c ou W_p aux STC (1000W/m^2 , 25°C , $AM=1,5$)
- Influence de l'ensoleillement sur le courant si E_s augment alors I augment, et si E_s diminué alors I diminué La tension reste inchangée
- Influence de la température sur la tension si T° augment alors V diminué, si T° augment alors V augment, sur le courant l'influence est minime si T° augment alors I augment, si T° diminué alors I diminué
- Le Montage en série additionne les tensions
- Le Montage en parallèle additionne les courants
- FF (facteur de forme) = $P_{\max} / (V_{CO} \times I_{CC})$
- η : rendement énergétique = $P_{\max} / (E \times S)$

1.10.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions fondamentales concernant les semi-conducteurs comme : l'énergie de gap, le dopage, la structure cristalline ainsi que les propriétés optique et électrique.

En suit nous avons rappelé quelques notions de base relatives au rayonnement solaire, tels que le spectre solaire, la masse de l'air.

Nous avons aussi 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 permettant la génération du photo-courant.

Chapitre 2

Partie théorique

2 Les boîtes et les puits quantique :

2.0 Introduction :

Nous allons donner des notions et des propriétés sur les boîtes quantiques et les puits quantique dans le domaine photovoltaïque.

2.1 Le paramètre de maille :

Le paramètre de maille a définit comme étant la distance entre deux atomes dans un cristal. Lorsqu'un atome étranger est introduit dans le réseau cristallin, il provoque en général une variation du paramètre cristallin qui se traduit par une expansion ou une contraction du réseau, en fonction de la taille des atomes. On dit que la variation de « a » obéit à la loi de Végard qui est linéaire en fonction du taux de substitution X [21].

Nous avons utilisé la loi de Végard donnée pour le calcul du paramètre de maille :

$$a(\text{GaAs}(z)) = (1 - x) * a(\text{GaAs}) + x * a(\text{Ga}(z)) \quad (2.1)$$

avec :

z est le concentration (In)

2.2 Epaisseur critique :

L'épaisseur au-delà de laquelle la couche épitaxiée commence à relaxer est appelé épaisseur critique. Cette épaisseur critique dépend des propriétés mécaniques des matériaux (coefficients élastiques c_{ij}), ainsi que du degré de désaccord paramétrique entre le substrat et la couche épitaxiée [22].

Si l'épaisseur de la couche épitaxie est supérieure à l'épaisseur critique, les mailles ne subissent plus les contraintes mécaniques imposées par le substrat et le paramètre de maille atteint celui du matériau massif. Le réseau est totalement relaxé [22].

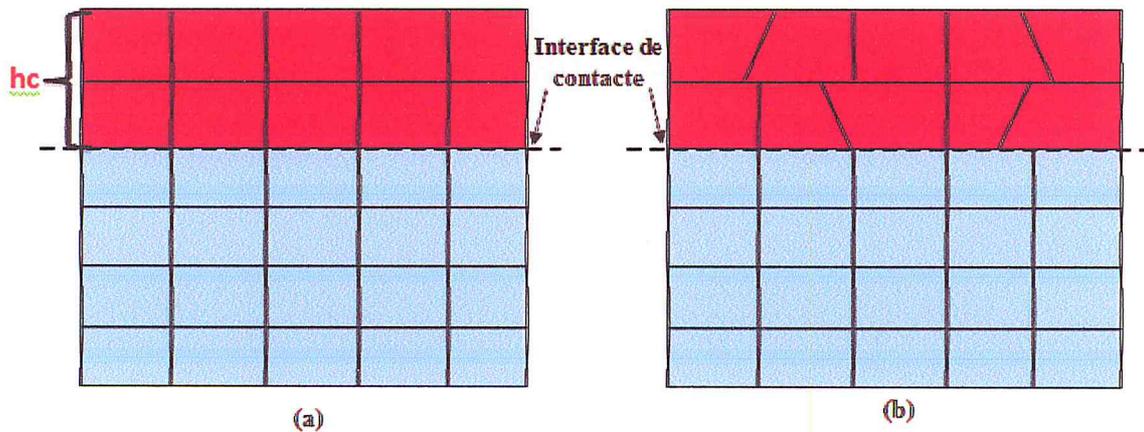


Figure 2.1 : illustration d'une couche contrainte [22].
a) Compression b) relaxée

Dans notre calcul, on a utilisé le modèle le plus classique, celui de K.Köksal et B.Gonul, qui traite le cas d'un matériau faiblement désaccordé par rapport au substrat (désaccord de maille < 2 %). La valeur de l'épaisseur critique h_c qui en résulte dans le cas d'un matériau de structure sphalérite (zinc blende) épitaxie sur la surface n'est donnée par l'équation suivante [22].

$$h_c = \frac{a_e}{\beta \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta_a} \times \frac{1 - (0.25 \cdot \gamma)}{(1 + \gamma)} \times \ln \left(\frac{h_c \cdot \sqrt{2}}{a_e} + 1 \right) \quad (2.2)$$

Δ_a : Le désaccord paramétrique qui est donné par :

$$\Delta_a = \frac{a_s - a_e}{a_s} \quad (2.3)$$

γ : Le coefficient de poisson qui est donné par :

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

Où, c_{11} et c_{12} sont les constantes d'élasticité obtenues par l'interpolation linéaire des binaires InAs, GaAs.

a_e : Paramètre de maille de la couche relaxée.

β : C'est un coefficient égal à 1 dans le cas d'un super-réseau ; à 2 pour un puits quantique

Où : c_{ij} sont les coefficients élastiques.

β : est un coefficient qui prend les valeurs suivantes selon le type de la structure.

Structure	Couche unique	Puits quantique	Super réseau
Valeur de β	4	2	1

Tableau.2.1 : représenté la valeur de β .

2.3 Masse effective :

2.3.1 Masse effective des électrons :

Dans la bande de conduction un électron est caractérisé par une fonction d'onde qui représente la somme d'ondes de Bloch d'orbitale anti liante. En termes corpusculaires, c'est une particule dans un potentiel cristallin. On représente cette particule quasi-libre de charge e^- et de masse m_e^* qu'on appelle masse effective de l'électron.

La masse effective des électrons est inversement proportionnelle à la dérivée seconde de la courbe de dispersion de l'énergie dans l'espace k

$$m_e^* = \frac{\hbar^2}{d^2E/dk^2} \quad (2.5)$$

Dans le cas d'un semi-conducteur à gap direct, la bande de conduction est uni vallée, centrée en $k_0=0$ et isotrope au voisinage de k_0 . Si on appelle E_c l'énergie minimum, l'expression $E(k)$ s'écrit :

$$E(K) = E_c + \frac{1}{2} \frac{d^2E(K)}{dk^2} K^2 \quad (2.6)$$

Ou, compte tenu de la définition de la masse effective (équation (2.7)).

$$E(K) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.7)$$

Ainsi l'électron au voisinage du minimum de la bande de conduction se comporte comme un électron libre de masse m_e^* .

Dans la mesure où la courbure de la bande de conduction varie peu au voisinage du minimum, la masse effective est constante et par suite l'énergie $E(K)$ varie quadratiquement en fonction du vecteur d'onde K .

Cette loi de variation constitue ce que l'on appelle l'approximation des bandes paraboliques. Lorsque l'énergie cinétique des électrons devient très importante, l'électron s'éloigne d' E_c dans l'espace des énergies, sa masse varie et l'approximation parabolique n'est plus justifiée.

Dans le cas d'un semi-conducteur à gap indirect, la bande de conduction est multi vallée et anisotrope avec plusieurs minima équivalents situés en différents points de la zone de Brillouin. Les surfaces d'énergies constantes au voisinage des minima K_0 sont des ellipsoïdes. Les expressions des masses effectives sont données par :

$$m_l^* = \frac{\hbar^2}{dE^2/dk^2} \quad (2.8.a)$$

$$m_t^* = \frac{\hbar^2}{dE^2/dk^2} \quad (2.8.b)$$

avec :

m_l^* : masse effective de l'électron de la vallée considérée, dans son mouvement suivant l'axe de révolution de l'ellipsoïde, appelée aussi masse effective longitudinale.

m_t^* : Masse effective de l'électron dans son mouvement dans le plan perpendiculaire à l'axe de révolution, appelée aussi masse effective transversal [23].

2.3.2 Masse effective des trous :

La masse effective des trous est définie comme celle des électrons, cependant la bande de valence des semiconducteurs cubique est composée de deux branches dégénérées en $K=0$.

Les énergies des trous sont comptées positivement vers le bas. La bande de plus grande courbure, bande inférieure, correspond à des trous de masse effective inférieure (bande des trous légers) et la bande de plus faible courbure, bande supérieure, correspond à celle des trous lourds.

$$m_{hh} = \frac{m^*_{hh}}{y_1+2y_2} m_{lh} = \frac{m^*_{lh}}{y_1-2y_2} \quad (2.9)$$

y_1 et y_2 paramètre de Luttinger [24].

2.4 Effets du confinement :

La longueur d'onde λ_B de Broglie associée à l'électron de conduction, de masse effective m_e^* et d'énergie thermique kT s'écrit [24].

$$\lambda_B = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_e^*kT}} \quad (2.10)$$

Si on restreint le mouvement de l'électron suivant une ou deux directions sur des distances inférieures ou égales à λ_B , les énergies des niveaux sont quantifiées suivant ces directions de confinement et peut s'écrire :

$$E_{n,\vec{k}} = E_{n,\vec{0}} + \frac{\hbar^2 \vec{k}^2}{2m_{e,n}^*} \quad (2.11)$$

Où E_n est l'énergie quantifiée associée au système. Le second terme est l'énergie cinétique due au mouvement libre de l'électron dans les directions sans confinement et k le vecteur d'onde associé. $\hbar = h/2\pi$.

Si un matériau semi-conducteur ayant un gap optique E_{g1} appelé couche active est entouré par un matériau de gap E_{g2} plus grand, appelé barrière, ceci crée des zones dans lesquelles les porteurs (électrons et trous) sont confinés avec des énergies quantifiées. La relation de dispersion dans le Matériau massif s'écrit :

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (2.12)$$

Cette relation de dispersion donne une densité d'états $\rho(E) = 1/\sqrt{E}$ comme on peut le voir sur la figure 2.2, cette quantification de l'énergie, différente selon le confinement, on confine l'électron suivant les directions x , y et z .

2.4.1 Puits quantique :

Si l'on confine l'électron suivant z , par exemple, le vecteur d'onde de l'électron est quantifié dans la direction z et prend des valeurs discrètes tandis que le mouvement reste libre dans le plan xy . La relation de dispersion s'écrit alors :

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2) + E_{z,n} \quad (2.13)$$

Où $n \in \mathbb{N}$ et les $E_{z,n}$ correspondent aux niveaux d'énergie discrets dus au confinement suivant z , qui sont définis par la taille du piège. Pour un $E_{z,n}$ donné, la densité d'états 2D est constante et définie pour $E > E_{z,n}$. La densité d'états finale est donc une fonction en marches d'escalier, où chaque marche correspond au passage de l'énergie $E_{z,n}$ d'un état confiné [24].

2.4.2 Fil quantique (1D) :

Si le confinement a lieu suivant z et y , le mouvement ne reste libre que dans la direction x . La relation de dispersion s'écrit [22] :

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} k_x^2 + E_{y,m} + E_{z,n} \quad (2.14)$$

où $m, n \in \mathbb{N}$. Dans un fil quantique, pour chaque combinaison $E_{m,n} = E_{y,m} + E_{z,n}$, la densité d'états sera de la forme $\rho(E) = 1/\sqrt{E - E_{m,n}}$. Pour chaque $E_{m,n}$, on obtient donc des pics similaires à ce qui est tracé sur la figure 2.2.

2.4.3 Boîte quantique (0D) :

Si l'on confine l'électron suivant toutes les directions, on obtient [24] :

$$E = E_{x,l} + E_{y,m} + E_{z,n} \quad (2.15)$$

C'est-à-dire que l'énergie de l'électron est totalement quantifiée et les niveaux d'énergie sont définis par la taille du piège. La densité d'états n'est alors non nulle que lorsque l'énergie vaut $E_{x,l} + E_{y,m} + E_{z,n}$

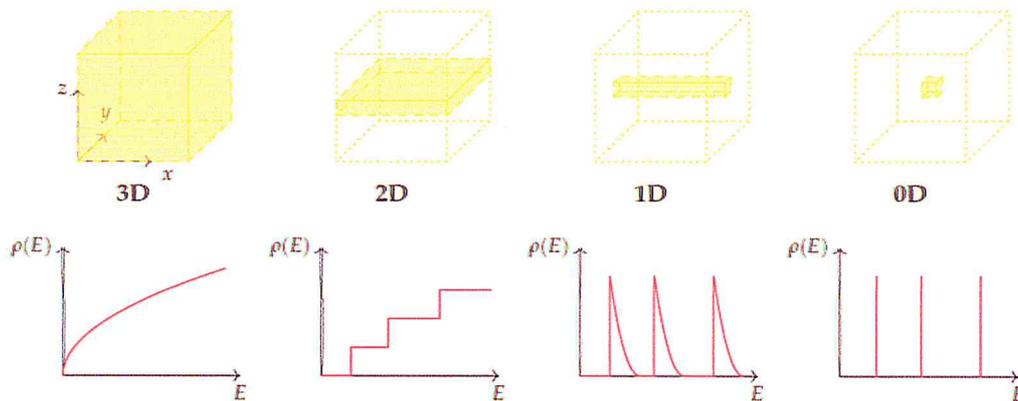


Figure 2.2 : Différents types de confinement et densités d'états associées [24].

2.5 Boite quantique :

2.5.1 Définition :

Une boîte quantique ou point quantique, aussi connu sous son appellation anglophone de quantum dot, est une nanostructure de semiconducteurs. Par sa taille et ses caractéristiques, elle se comporte comme un puits de potentiel qui confine les électrons (et les trous) dans les trois dimensions de l'espace et leur niveau d'énergie sont discrets, dans une région d'une taille de l'ordre de la longueur d'onde des électrons (longueur d'onde de De Broglie), soit quelques dizaines de nanomètres dans un semi-conducteur. Ce confinement donne aux boîtes quantiques des propriétés proches de celles d'un atome, raison pour laquelle les boîtes quantiques sont parfois qualifiées d'« atomes artificiels ». Typiquement, les boîtes quantiques ont une taille latérale dans le plan de croissance (~15-20 nm de diamètre) grande devant leur épaisseur (2-4 nm) selon l'axe de croissance (une forme qui ressemble à une lentille et dépend de la méthode de croissance). Ceci implique que le confinement hors du plan est beaucoup

Plus fort, et les états discrets de plus basse énergie sont généralement associés au confinement selon l'axe de croissance [25].

2.6 Puits quantique :

2.6.1 Définition :

Un puits quantique est constitué d'une fine couche quelques nm d'un matériau semi-conducteur de faible gap entourée de matériaux de plus grand gap. On réalise ainsi un puits de potentiel artificiel de taille quantique dans lequel les porteurs libres du semi-conducteur (électrons et trous) vont se retrouver confinés sur des niveaux d'énergie discrets. A chacune des énergies liées permises à l'intérieur du puits est associée une fonction d'onde dont le carré représente la densité de probabilité de présence sur le niveau d'énergie quantifiée. La figure 2.3 montrée une structure a puits quantique. [27,26].

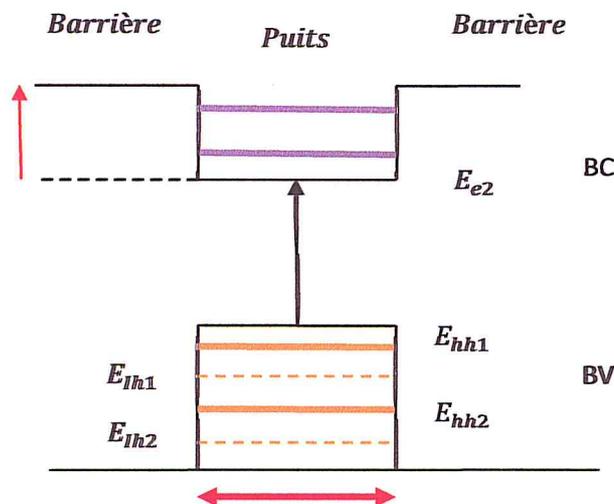


Figure 2.3 : Illustration d'un puits quantique [28].

E_{en} : L'ènième niveau d'énergie des électrons.

E_{hhn} : L'ènième niveau d'énergie des trous lourds.

E_{lhn} : L'ènième niveau d'énergie des trous légers.

L'utilisation de puits quantiques au sein de la zone active engendre un confinement des électrons et des trous dans un plus faible volume, ce qui pour une injection donnée qui permet d'augmenter la densité de porteurs et donc d'atteindre l'inversion de population plus facilement. Selon la nature de la discontinuité de bandes

interdites à l'interface puits-barrière, deux types de puits quantiques existent figure 2.5.

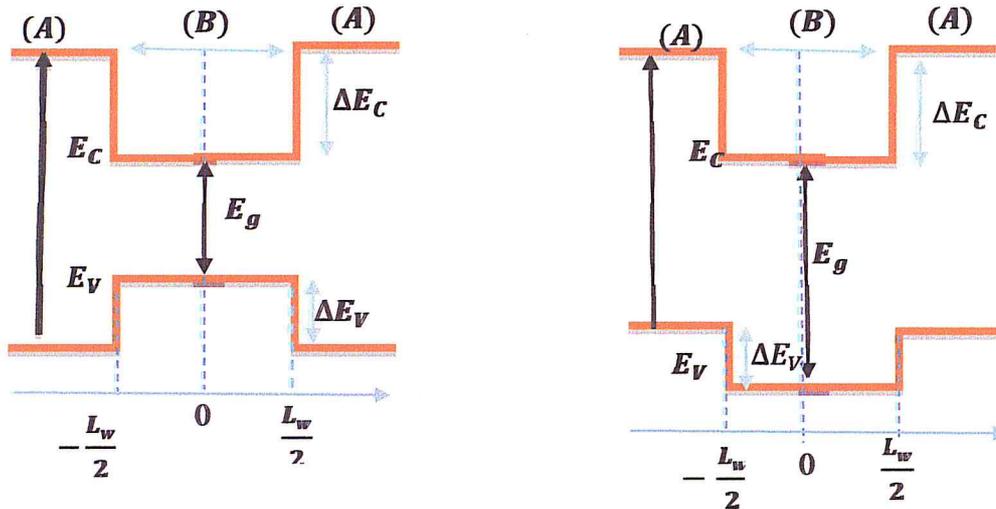


Figure 2.4 : Profil de barrière de potentiel dans un puits quantique de type 1 et un puits quantique de type 2 [29].

a) puits quantiques de type-I :

- Les électrons et les trous sont confinés dans le même matériau constituant le puits. L'énergie du photon dépend des énergies de confinement des porteurs et du gap du matériau puits.

b) puits quantiques de type-II :

- Les porteurs sont confinés dans deux matériaux adjacents. Dans ce cas, l'énergie du photon est fonction des énergies de confinement des porteurs mais aussi des gaps des deux matériaux formant l'hétéro structurent [30].

2.7 L'équation de Schrödinger dans un puit quantique :

En 1926 Schrödinger a montré que la fonction d'onde et l'énergie sont la solution d'une équation au dérivé partielle du second ordre cette équation s'écrit.

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta \Psi^i(z) + V(z) \Psi^i(z) = E^i \Psi^i(z) \quad (2.16)$$

où :

Δ : le Laplatien.

m_e : la masse de l'électron.

V : l'energie potentiel.

E^i : l'energie totale de l'électron.

Ψ^i : la fonction d'onde.

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$: h cest la constante de Planc.

On peut l'écrire sous la forme :

$$\left[-\left(\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m_e}\right) \Delta + V \right] \Psi^i = E^i \Psi^i \quad (2.17)$$

$$H^i \Psi^i = E^i \Psi^i \quad (2.18)$$

où H^i : l'opérateur Hamiltonien.

La résolution de l'équation de Schrödinger nécessite la connaissance de terme du potentiel ce qui veut dire que l'équation de Schrödinger et l'équation de Poisson sont couplées. Le potentiel V varie suivant un axe perpendiculaire à la structure de l'hétérojonction, ce potentiel est égal à la somme de 4 types de potentiel.

- La potentielle image qui est du à la différence des constante diélectrique.
- Le potentiel périodique qui est du à l'interaction des ions.
- Le potentiel d'inversion qui est du à l'accumulation des électrons à l'interface.
- Le potentiel de déplétion qui est du à l'ionisation des impuretés.

Le puits de l'énergie potentielle vu par les électrons de la bande de conduction est entièrement déterminé par la donnée de sa largeur L_w et de sa profondeur V_0 . Considérons l'exemple d'un puits simple dans la bande de conduction.

Pour des raisons de commodités, l'origine des énergies est prise au fond du puits. Le profil du potentiel est défini par la suite comme suit.

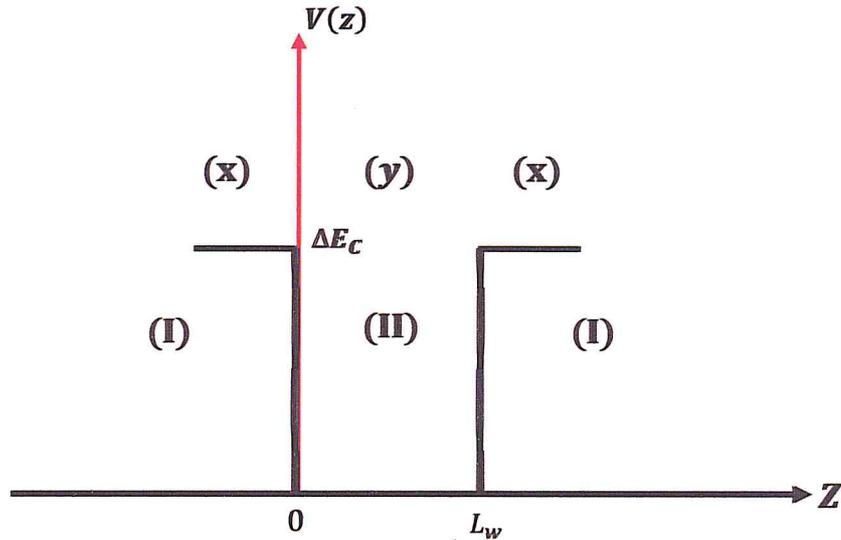


Figure 2.5 : Puits quantique conventionnel.

$$V(z) = \begin{cases} \Delta E_c & z < 0 \text{ et } z > L_w \\ 0 & 0 < z < L_w \end{cases} \quad (2.19)$$

2.8 La contrainte :

L'épitaxie de matériaux désaccordés est devenue bien maîtrisée, grâce notamment aux progrès accomplis au niveau des techniques de croissance. Ainsi, l'accord de maille n'est plus un impératif, mieux encore les effets des contraintes sont exploités dans plusieurs composants électroniques et optoélectroniques performants. En effet, l'utilisation d'hétéro structures à contrainte permet d'ajuster la longueur d'onde d'émission, en modifiant les positions en énergie des bandes de valence et de conduction.

L'épitaxie des matériaux InGaAs sur Si ont des paramètres de maille initialement différent provoque une contrainte. Le substrat de paramètre de maille a_s différent de celui de la couche épitaxie a_e , impose sa maille à cette dernière, cette différence de

maille provoque une déformation de la couche épitaxie, soit en tension ou en compression par des déformations biaxiales (ϵ_{yy} et ϵ_{zz}) et uniaxiale (ϵ_{xx}) [31].

Prenons le cas des deux cristaux comme le montre la Figure 2.6.

Les déformations sont données par [31] :

- Biaxialedans le plan de croissance :

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_s - a_e}{a_e} = \epsilon_{//} \quad (2.20)$$

- uniaxiale dans la direction de croissance :

$$\epsilon_{zz} = -2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \epsilon_{xx} = \epsilon_{\perp} \quad (2.21)$$

où :

- ϵ : La déformation ou le désaccord de maille.
- a_s : Le paramètre de maille du substrat (Si).
- a_e : Le paramètre de maille de la couche épitaxie.
- C_{ij} : Les coefficients d'élasticité.

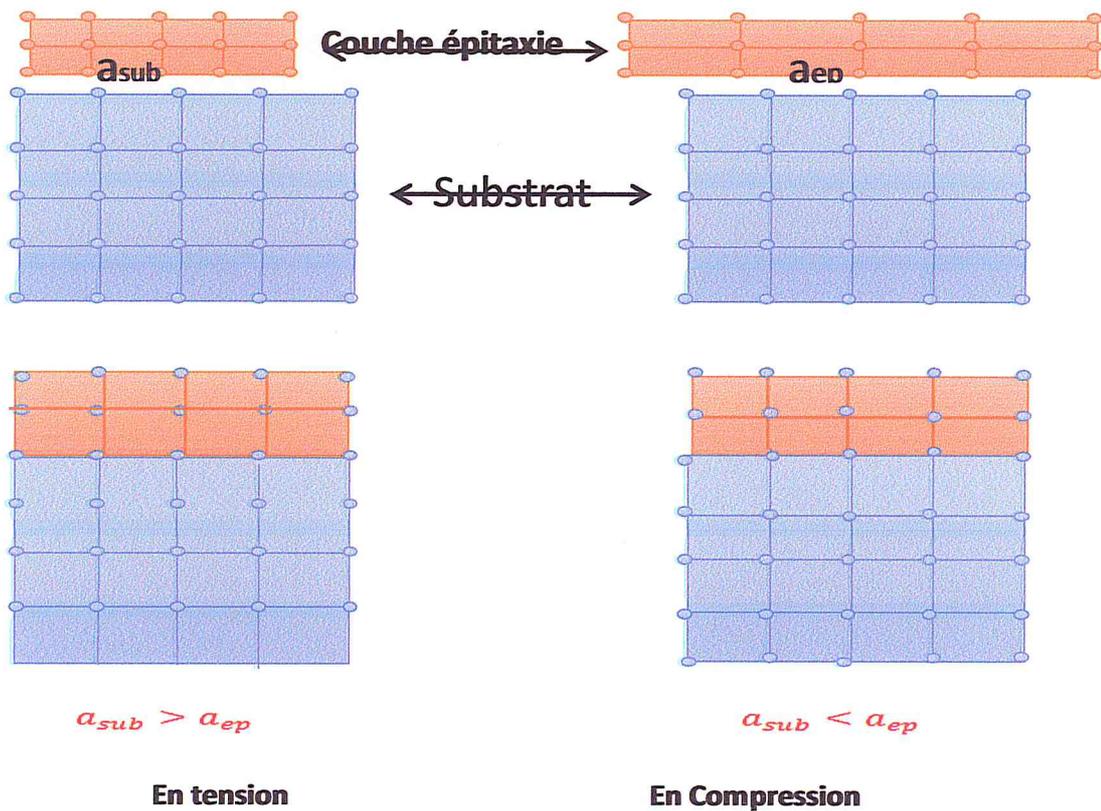


Figure 2.6 : illustration des types de déformation [31].

2.9 Effet de la contrainte sur le Gap d'énergie :

L'effet de la contrainte sur les bandes de valence et de conduction peut être décomposé en deux composantes [32].

- Une composante hydrostatique, qui diminue l'énergie de bande interdite dans le cas d'une augmentation de volume ou qui l'augmente dans le cas contraire.
- Une composante de cisaillement qui a pour effet de lever la dégénérescence trous lourds, trous légers du haut de la bande de valence figure 2.8

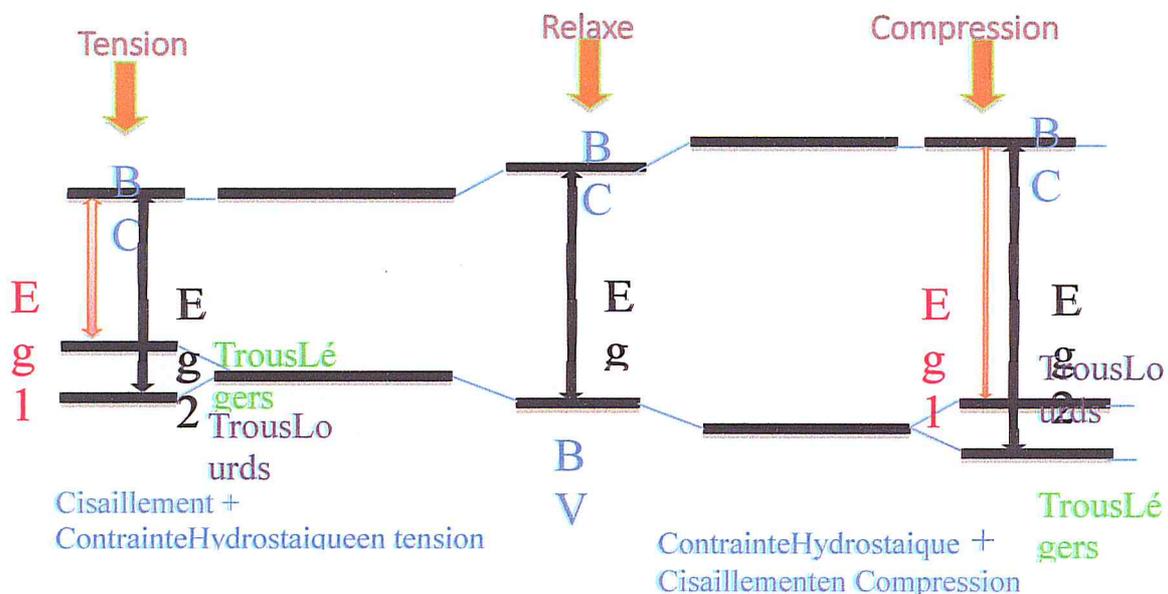


Figure 2.7 : Évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de l'état de contrainte d'une couche déposée sur un substrat [33].

En première approximation, même si les boîtes quantiques ne sont pas symétriques dans le plan perpendiculaire à l'axe de croissance, rappelons que la décomposition de la contrainte hydrostatique et biaxiale conduit aux composantes de déformations suivantes :

$$\varepsilon_{\perp}(\mathbf{r}) = \varepsilon_{xx}(\mathbf{r}) + \varepsilon_{yy}(\mathbf{r}) + \varepsilon_{zz} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_{//}(\mathbf{r}) = \varepsilon_{xx}(\mathbf{r}) + \varepsilon_{yy}(\mathbf{r}) - 2\varepsilon_{zz}(\mathbf{r}) \quad (2.23)$$

Nous savons que la composante hydrostatique a pour effet de variation de l'énergie de la bande interdite, alors que la composante uni axiale lève la dégénérescence différenciée entre les niveaux de trous lourds et trous légers.

En l'absence de contrainte les bandes de trous lourds et trous légers sont isotropes et dégénérées au centre de la zone de Brillouin, et la bande de trous spin-splittée est située à une énergie Δ_0 en dessous de ces deux bandes figure 2.9 [34].

$$E_{V,moy} = \frac{E_{HH} + E_{LH} + \Delta_0}{3} \quad (2.24)$$

avec :

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

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

Δ_0 : Energie de décalage des bandes des trous spin-splittée.

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

$$\Delta E_{V,moy}^{hyd} = a_v(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.25)$$

$$\Delta E_c^{hyd} = a_c(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.26)$$

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

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

$$\Delta E_{hh}^{cisa} = -\frac{1}{2}\delta E^{cisa} \quad (2.27)$$

$$\Delta E_{lh}^{cisa} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{cisa} + \frac{1}{2}\sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{cisa} + \frac{9}{4}(\delta E^{cisa})^2} \quad (2.28)$$

$$\Delta E_{so}^{cisa} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{cisa} + \frac{1}{2}\sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{cisa} + \frac{9}{4}(\delta E^{cisa})^2} \quad (2.29)$$

avec

$$\delta E^{cisa} 100 = 2. b. (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.30)$$

Où b est le potentiel de déformation tetragonal.

E_V : L'énergie du haut de la bande de valence est :

$$E_V = E_{V,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_{v,moy}^{hyd} + \max(\Delta E_{lh}^{hyd}, \Delta E_{hh}^{hyd}) \quad (2.31)$$

E_C : L'énergie du bas de la bande de conduction est :

$$E_C = E_{V,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_g + E_C^{hyd} \quad (2.32)$$

Dans ces expressions $E_{V,moy}$, l'éclatement Spin-orbite Δ_0 et l'énergie de gap sont relatifs au matériau non contraint. Via les équations (2.22) et (2.23) on peut déterminer l'équation du Gap contraint E_g^{cot} :

$$E_g^{cot} = E_C + E_V = \Delta E_C^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \max(\Delta E_{lh}^{cisa}, \Delta E_{hh}^{cisa}) \quad (2.33)$$

Pour une couche soumise à une contrainte en compression la bande des trous lourds est au-dessus de la bande des trous légers (figure 2.8. b) et l'on a :

$$\max(\Delta E_{lh}^{cisa}, \Delta E_{hh}^{cisa}) = \Delta E_{lh}^{cisa} \quad (2.34)$$

Donc l'équation (2.32) devient pour une couche en compression :

$$E_g^{cot comp} = E_g + \Delta E_C^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{hh}^{cisa} \quad (2.35)$$

Et pour une couche en tension :

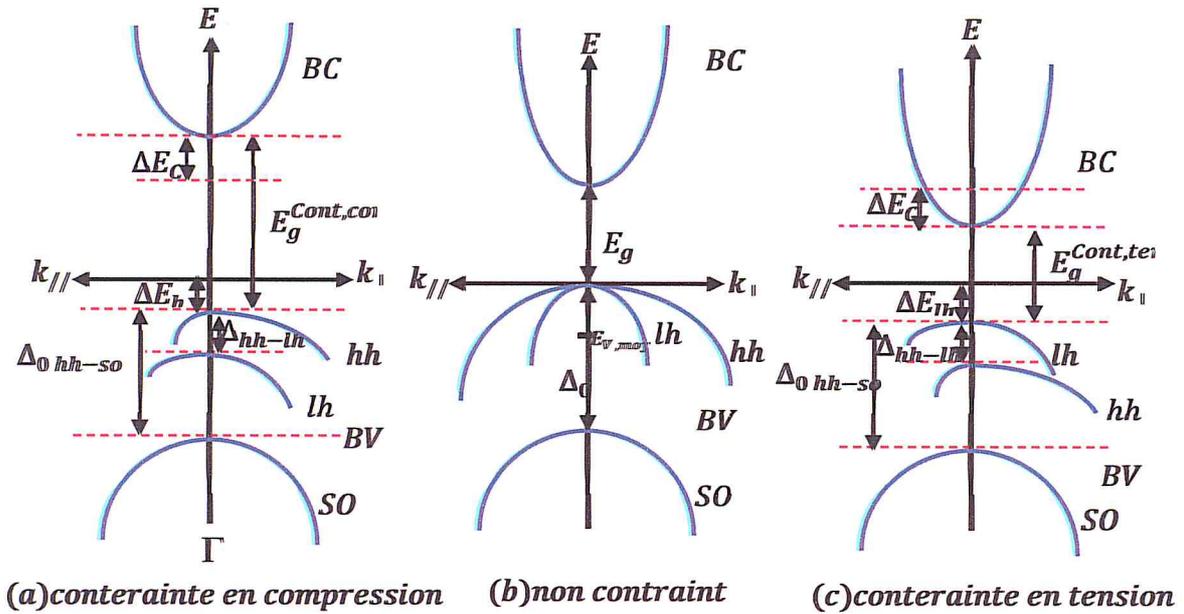


Figure 2.8 : Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct.

2.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelle que notions fondamentales concernant les puits, les boites quantique, le paramètre de maille, épaisseur critique, les masses effectives et effet de la contraint pour le domaine télécommunication et photovoltaïque.

Chapitre 3

Résultats et discussions

3.1 Résultats et discussions des simulations :

3.1.0 Introduction :

Nous allons discuter les résultats de simulation obtenu par les logicielles de simulation MATLAB et SILVACO.

3.1.1 Paramètre de maille :

Pour déterminer l'effet de la variation de concentration l'indium (In) sur le paramètre de maille de la structure *InGaAs* nous avons varié la concentration d'indium (x) dans une l'intervalle [0 1]. La figure (3.1) représente la variation du paramètre de maille de la structure *InGaAs* en fonction des concentrations d'In [36].

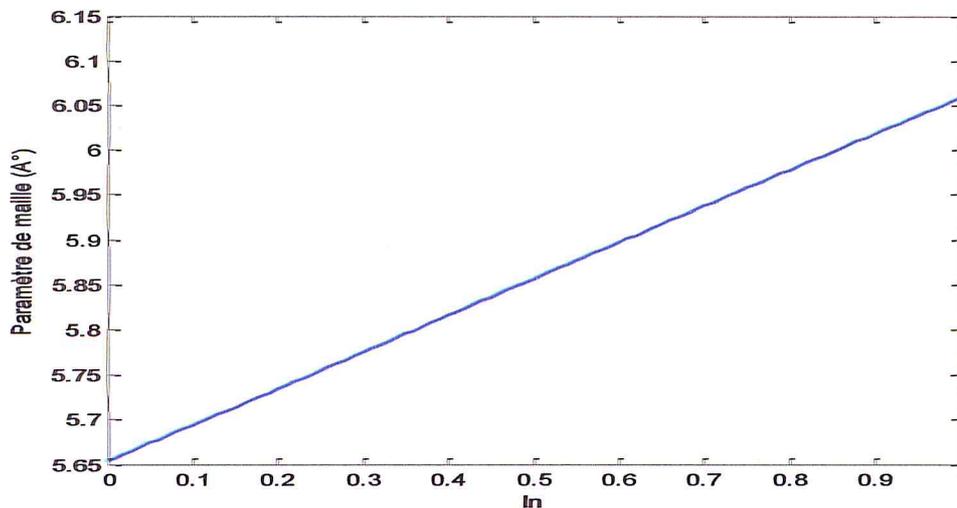


Figure 3.1 : Variation du paramètre de maille en fonction de la concentration d'indium.

En considérant cette variation linéaire par la loi de Vegard les paramètres de mailles a varient de manières constantes par rapport à la concentration de l'indium (x). On sait que les paramètres de mailles obéit bien à la loi de Vegard, c'est-à-dire qu'elle varie linéairement avec la composition [36].

$$a_{\text{InGaAs}}(x) = a_{\text{InAs}} \cdot x + (1 - x) \cdot a_{\text{GaAs}} \quad (3.1)$$

Avec :

$$a_{\text{InAs}} = 6.0583 \text{ \AA}; a_{\text{GaAs}} = 5.6532 \text{ \AA}$$

Ce tableau présente quelques résultats dans :

Concentration In (x)	0	0.5	0.6	1
Paramètre de maille (Å)	5.65	5.85	5.9	6.06

Tableau 3.1 : Quelques valeurs des paramètres de maille en fonction de variation de concentration In(x)

À partir de là, nous observons que l'augmentation de la concentration d'indium induit une augmentation de paramètre de maille de l'alliage.

3.1.2 Désaccord de maille :

La figure (3.2) montre la variation du paramètre de contraintes ε en fonction de concentration l'indium (x) d'après l'utilisation de l'équation suivante.

$$\varepsilon = \frac{a_{\text{sub}} - a_{\text{ep}}}{a_{\text{ep}}} \quad (3.2)$$

Comme $a_{\text{sub}} < a_{\text{ep}}$ est presque toujours contrainte compressive malgré l'augmentation de la concentration de l'indium (In). Par exemple, pour $x = 0.30$ la déformation est égale à $\approx 6\%$. Si les concentrations augmentent jusqu'au $x = 0.60$, la déformation reste encore compressive et égale à $\approx 8\%$, On déduit alors que l'augmentation de la concentration de l'indium induit une augmentation du désaccord de maille avec $\Delta\varepsilon = 2\%$.

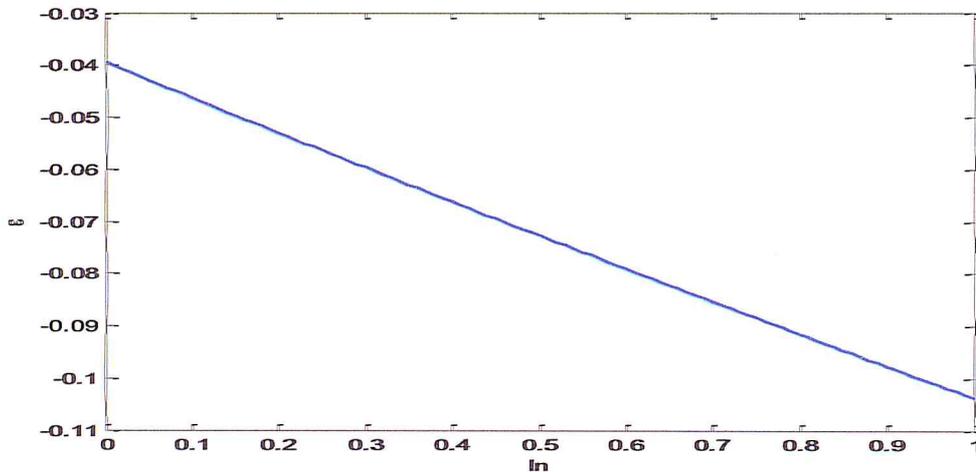


Figure 3.1 : Variation du désaccord paramétrique ε en fonction de la concentration d'indium.

Nous concluons à partir de nos résultats comparons avec la limite pratique que la valeur x optimale correspond à une valeur de déformation minimale allant jusqu'à 5 %. D'après la figure on constate que pour $x=0,1$ la déformation ($\varepsilon \approx 4.5\%$).

3.1.3L'épaisseur critique :

Cette figure (3.3) décrit la variation de l'épaisseur critique de l'alliage InGaAs en fonction des concentrations de l'Indium (In).

Pour calculer l'épaisseur critique (h_c) de cette couche active $In_xGa_{1-x}As$ épitaxiée sur un substrat de Si. On a exploité le modèle de Matthews et Blackesle [37,38].

On constate si on augmente la concentration de l'In l'épaisseur entamera une diminution atteignant 45 Å pour des concentrations de In à 0.1, et ce, pour une contrainte de 4.5%.

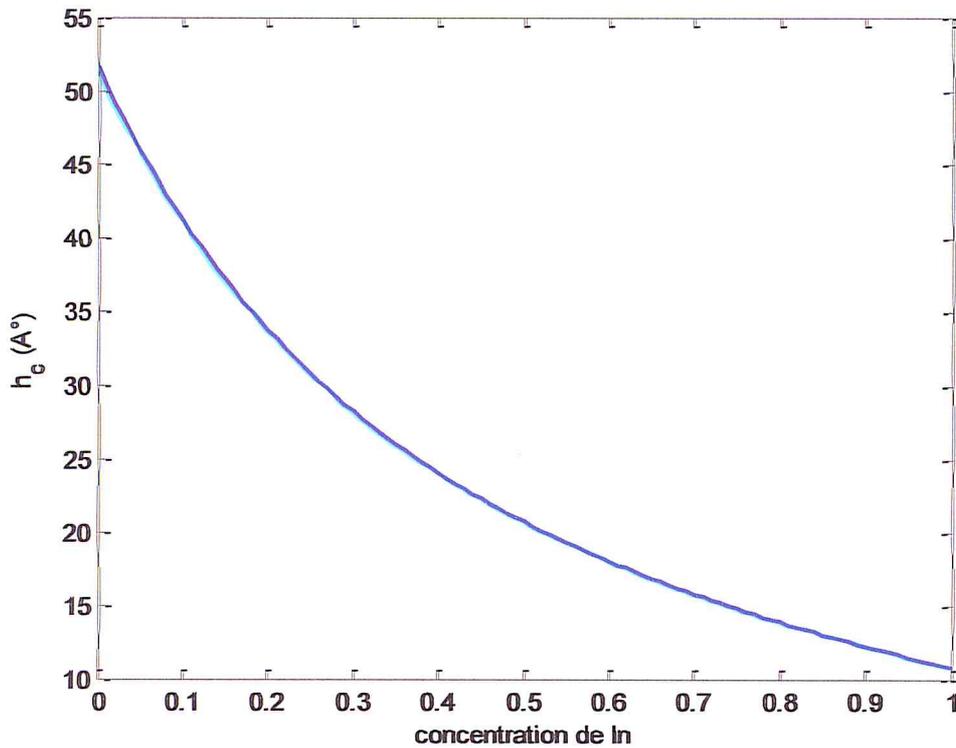


Figure 3.2 : Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium.

Pour une concentration d'indium $x=0.2$ l'épaisseur critique vaut $h_c=33$ (Å) et en augmentant la concentration de l'indium jusqu'à atteindre $x=0.5$ on a $h_c=21$ (Å). On constate alors que l'augmentation de la concentration de l'indium cause une diminution de l'épaisseur critique avec $\Delta h_c=12$ (Å) [39].

3.1.4 La bande interdite contrainte et non contrainte :

La Figure (3.4), illustre la variation de l'énergie de la bande interdite (gap) de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ contrainte sur un substrat de Si. Avec l'incorporation de concentration d'Indium dans l'alliage, l'énergie de la bande interdite (E_g) décroît. Suite à la contrainte compressive de notre structure l'énergie de bande interdite gap trous lourds est toujours inférieure à l'énergie de la bande interdite gap trous légers ($E_{g_{hh}}$ et $E_{g_{lh}}$) quel que soit les concentrations de l'Indium (In). La figure montre l'influence de concentration d'In. Par exemple pour le cas $E_{g_{hh}}$, pour $x = 0,1$ la valeur de bande interdite est de 1.1eV, en augmentant x à 0.7, la bande interdite diminue

jusqu'à 0.2 eV, on constate une diminution de l'énergie de la bande interdite avec $\Delta E_{ghh}=0.9$ eV. Ce qui rend l'effet de la contrainte affecter de manière indésirable sur l'énergie de la bande interdite qui provoque une diminution de l'énergie et rend les bandes de valence avec une forte clarté ($\Delta E_{g_{hh}}$ et $\Delta E_{g_{lh}}$) [40].

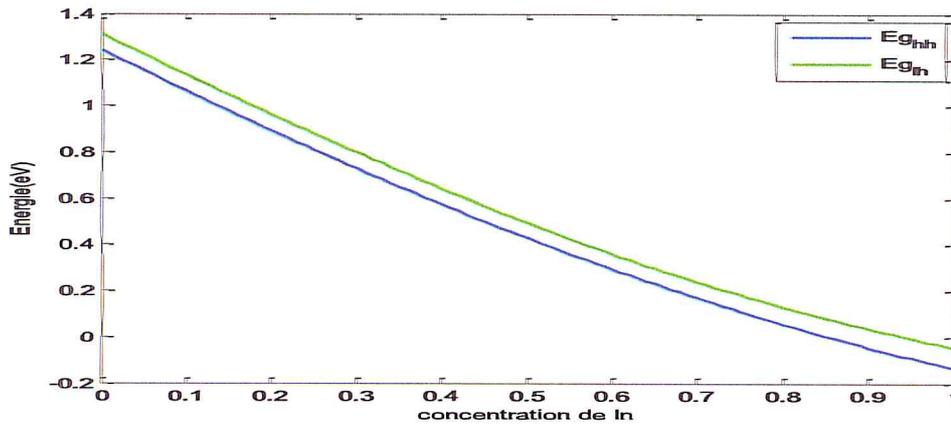


Figure 3.4 : Variation de l'énergie de bande interdite de la structure contraint sur $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$ en fonction de la concentration indium.

3.1. 5 Energie de la bande interdite ou gap :

La Figure (2.1), illustre la variation de l'énergie de la bande interdite (gap) de la structure InGaAs contraint sur un substrat de Si . Avec l'incorporation des concentrations d'Indium dans l'alliage, et la variation de la température ; l'énergie de la bande interdite décroît [42].

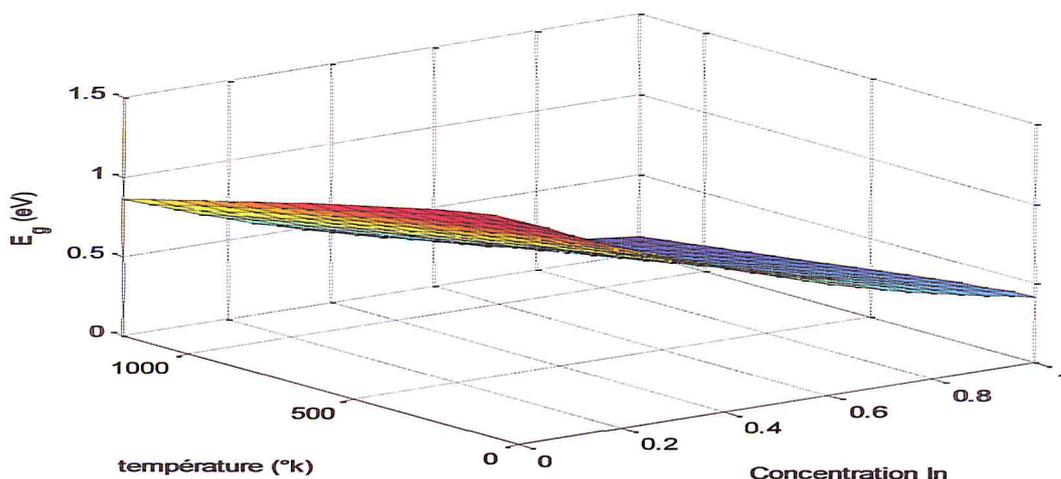


Figure 3.5 : variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la température et de la concentration de l'Indium.

3.1.6 Coefficient d'absorption :

La figure se représente la variation de coefficient d'absorption en fonction de l'effet de température et de concentration d'indium. On observe que l'augmentation de coefficient d'absorption elle est relié par augmentation de température et la concentration d'indium en relation relative [43].

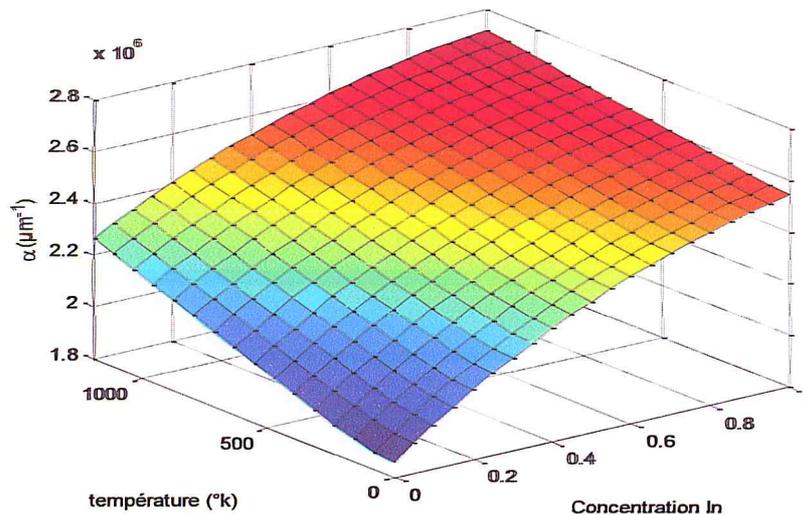


Figure 3.6 : Variation du coefficient d'absorption α en fonction de la température et de la concentration indium

3.2.1 Barrière de potentiel :

La figure 3.7, illustre La différence de variation d'énergie ($\Delta E_{v_{hh}}$, $\Delta E_{v_{hh}}$, ΔE_c) de la barrière de potentiel dans la bande de conduction et dans la bande de valence en fonction de la concentration de l'indium. On note que L'augmentation de la concentration en indium entraîne une augmentation des différences d'énergie $\Delta E_{v_{hh}}$, $\Delta E_{v_{hh}}$, ΔE_c . Pour la barrière de potentiel dans la bande de valence, d'après nos résultats on remarque que l'effet de la contrainte produit les décalages d'énergies ($\Delta E_{v_{lh}} < \Delta E_{v_{hh}}$).

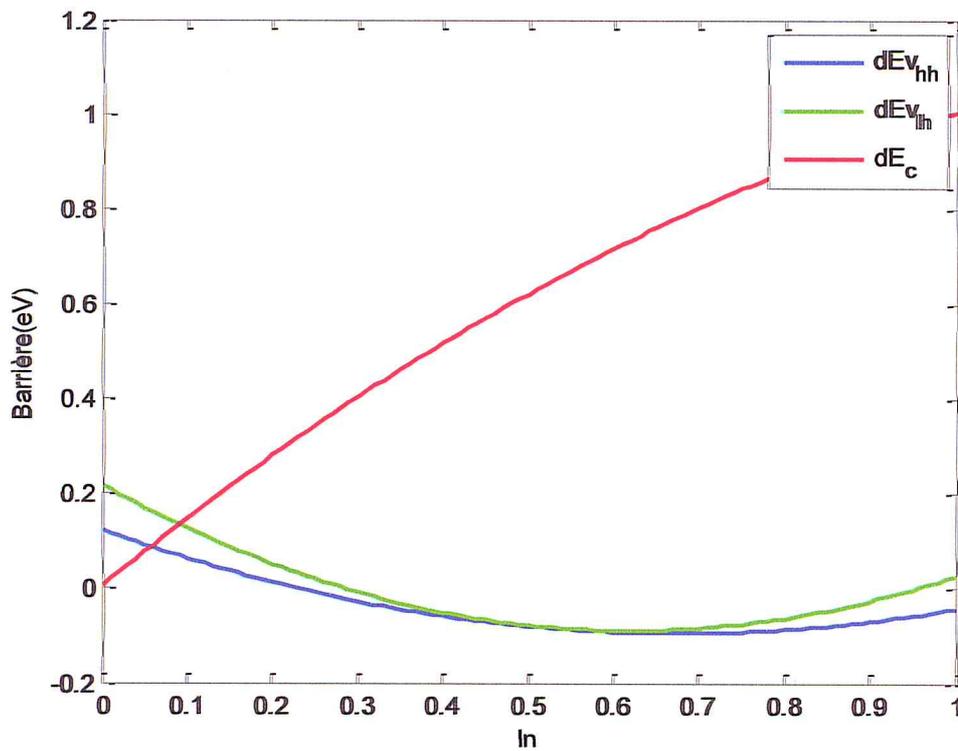


Figure 3.7 : La différence de variation d'énergie ($\Delta E v_{lh}, \Delta E v_{hh}, \Delta E c$) de la barrière de potentiel dans la bande de conduction et dans la bande de valence en fonction de la concentration de l'indium.

3.2.2 Énergies de quantifications :

3.2.3 Quantification des porteurs dans le puits :

Les figures (3.6) Montre la variation des énergies de quantifications des porteurs, on constate qu'il y a une augmentation des niveaux d'énergies des électrons dans le puits quantique InGaAs/Si en fonction de l'accroissement largeur L_w . Ces niveaux d'énergie augmentent aussi avec l'incorporation de l'Indium.

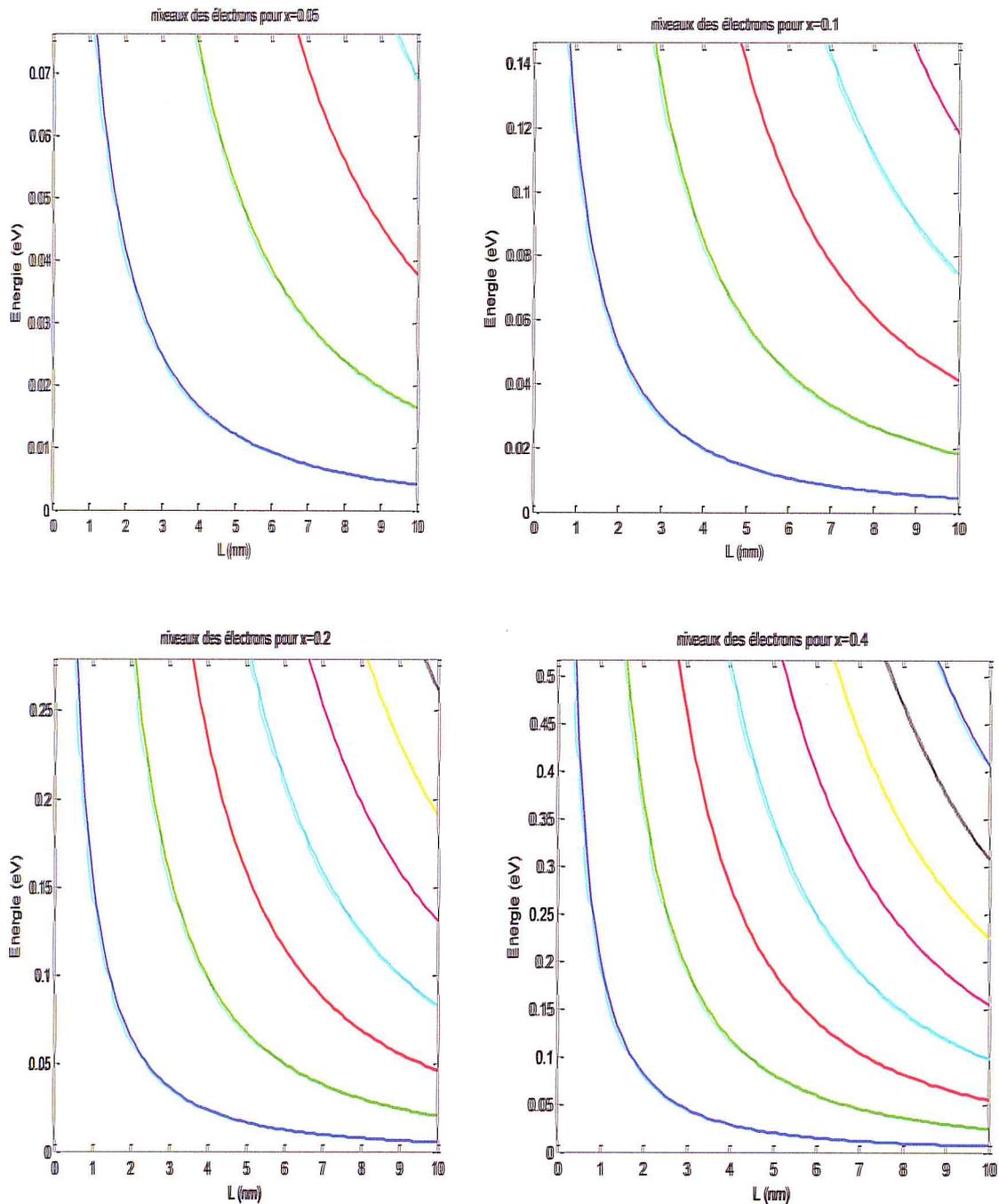


Figure 3.8 : Variation des énergies de quantifications des porteurs dans le puits quantique pour différentes concentrations d'indium.

3.2.4 Énergies de quantifications des trous lourds :

Les figure 3.9 représente la variation des énergies de quantifications des trous lourds dans le puits quantique à base de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$, on remarque qu'il y a une diminution du niveau d'énergie avec l'élargissement du puits quantique. Également,

l'incorporation de l'Indium dans notre structure induit une diminution remarquable de l'énergie.

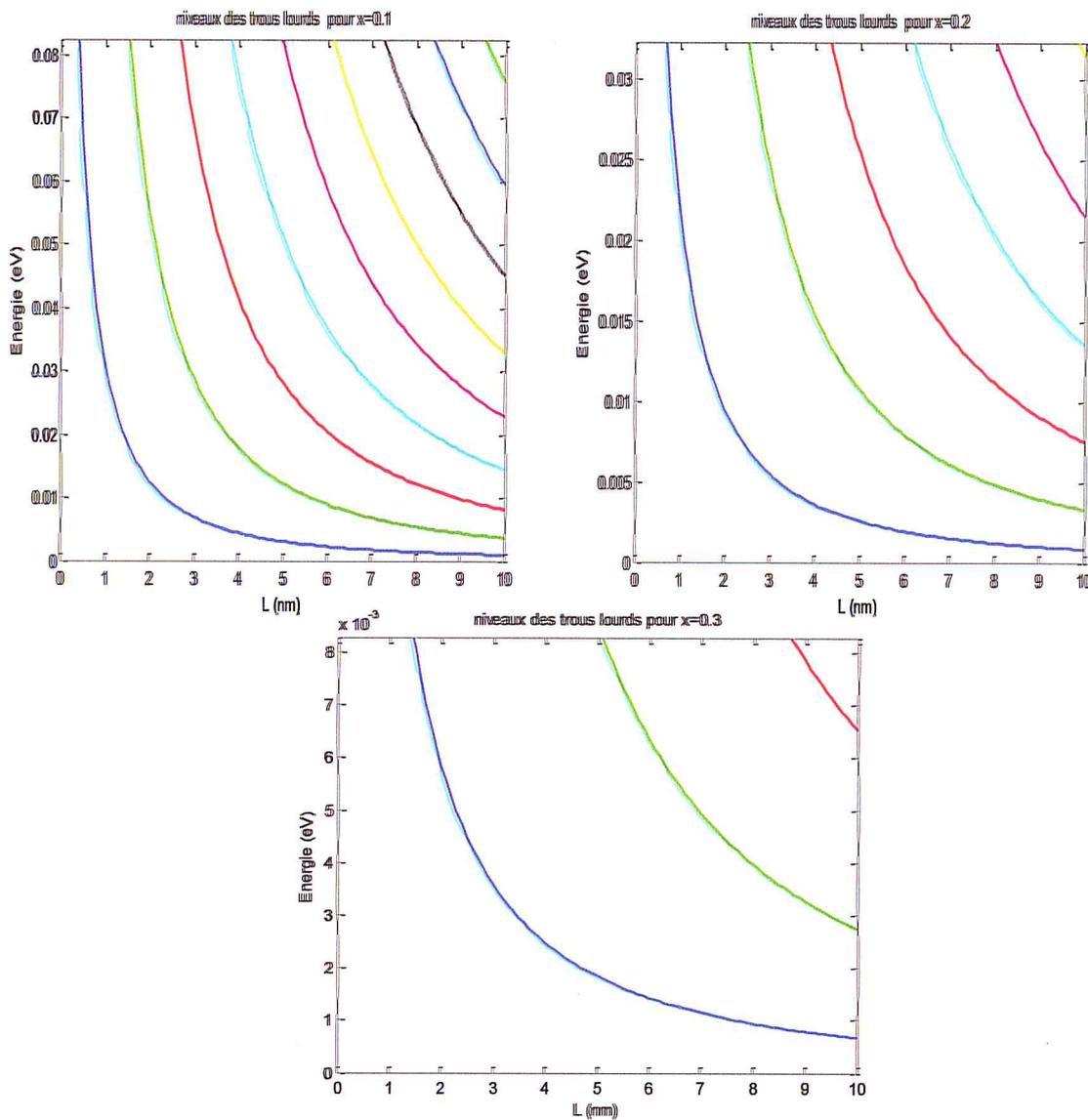


Figure 3.9 : La variation des énergies de quantifications des trous lourds en fonction de la largeur du puits L_w pour différentes concentrations d'indium.

3.2.5 Énergies de quantifications des trous légers :

Les figure 3.10 représente la variation des énergies de quantifications des trous légers dans le puits quantique à base de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$, on remarque qu'il y a une diminution du niveau d'énergie avec l'élargissement du puits quantique. Également, l'incorporation de l'Indium dans notre structure induit l'apparition de nouveaux niveaux d'énergie

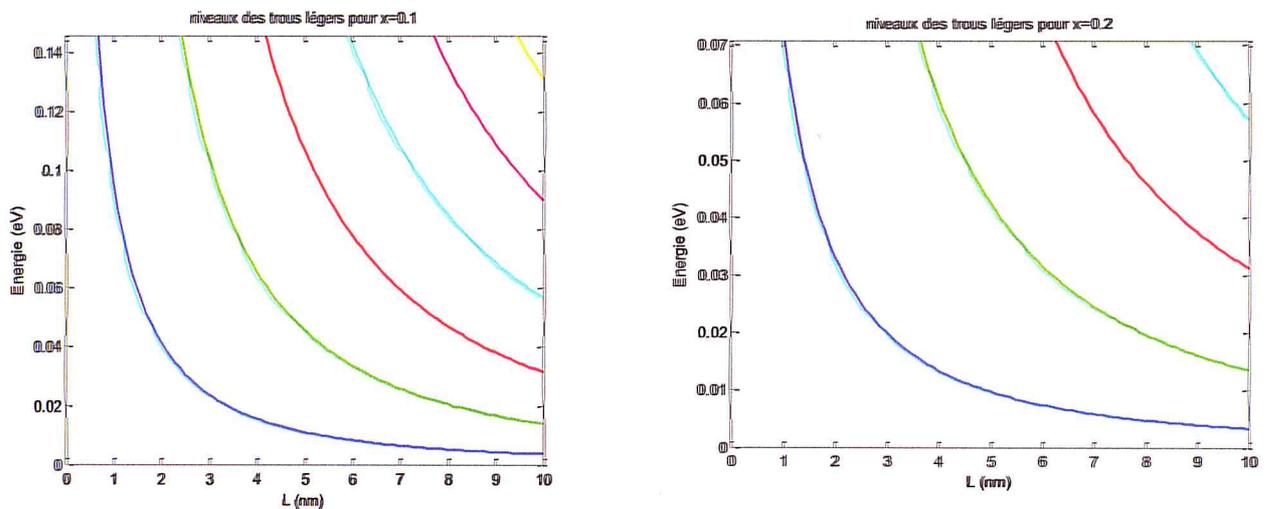
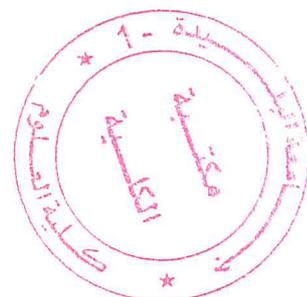


Figure 3.10 : La variation des énergies de quantifications des trous légers en fonction de la largeur du puits L_w pour différentes concentrations d'indium.

3.2.8 Énergies de transitions :

Les figures 3.11 illustrent la variation de l'énergie transitions en fonction de la largeur du puits quantique pour les trous lourds.

La contrainte, induit un décalage du centre de gravité de la bande de valence dans la couche active InGaAs et rend les bandes de valence anisotropes. Comme le nombre des niveaux d'énergie dans la bande des trous lourds est supérieur à celui des trous légers, donc les trous lourds plus intense en terme de valeur (expérimentalement) donc on s'intéresse aux transitions entre la bande de conduction et la bande trous lourds. avec l'élargissement du puits, on remarque une diminution des énergies de transition avec un stabilité du nombre des transitions possible entre la bande de conduction et la bande des trous lourds.



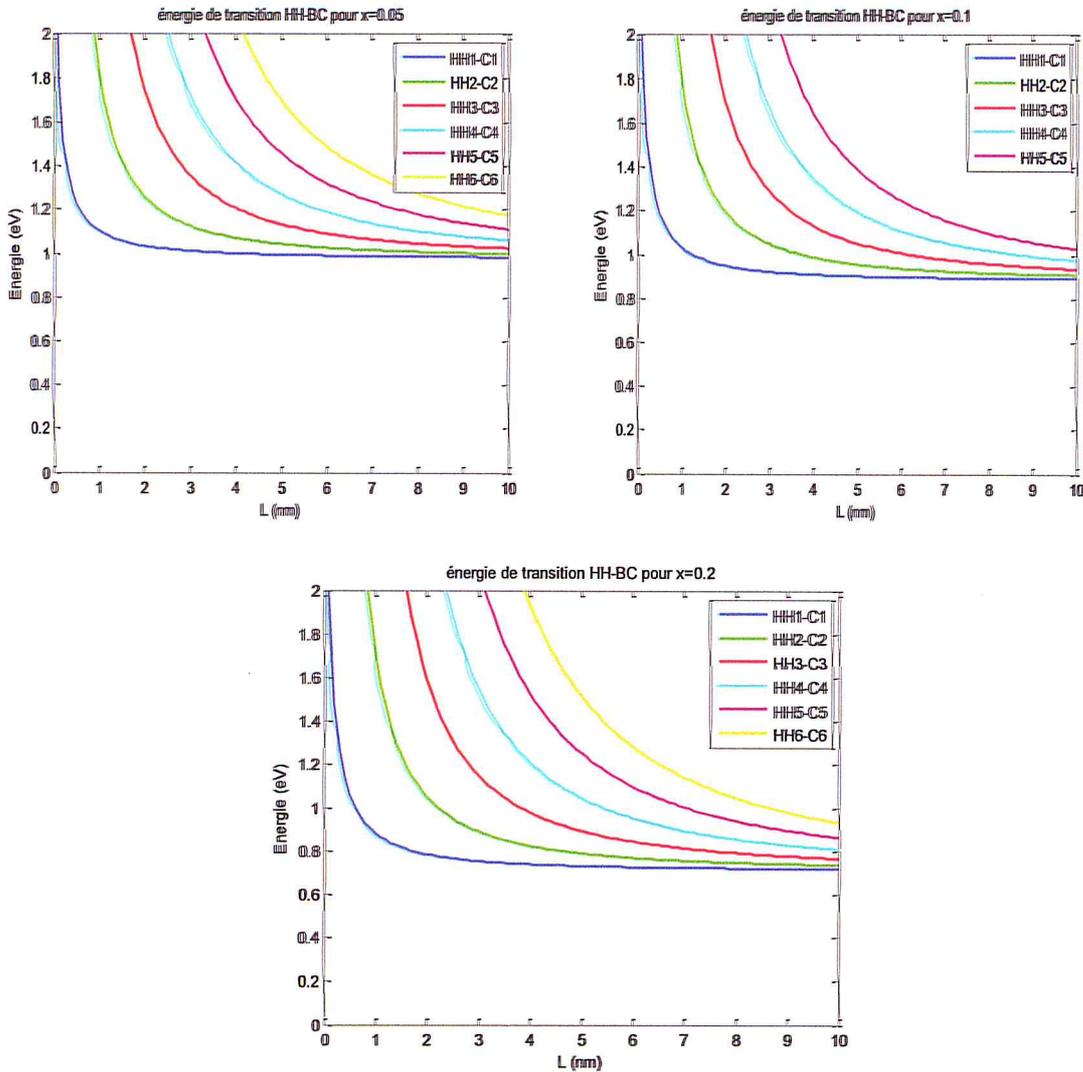


Figure 3.11 : La Variation des énergies de transition entre la bande de conduction et la bande des trous lourds en fonction de la largeur de puits L_w .

3.2.9 La longueur d'ondes d'émissions :

Les figures 3.12 montrent la variation des longueurs d'onde d'émissions relatives aux transitions bande de conduction et bande trous lourds, On remarque que cette longueur d'onde augmente avec le changement de la concentration de l'indium. Nous concluons que La longueur d'onde augmente avec l'élargissement de puits quantique et la concentration de l'indium.

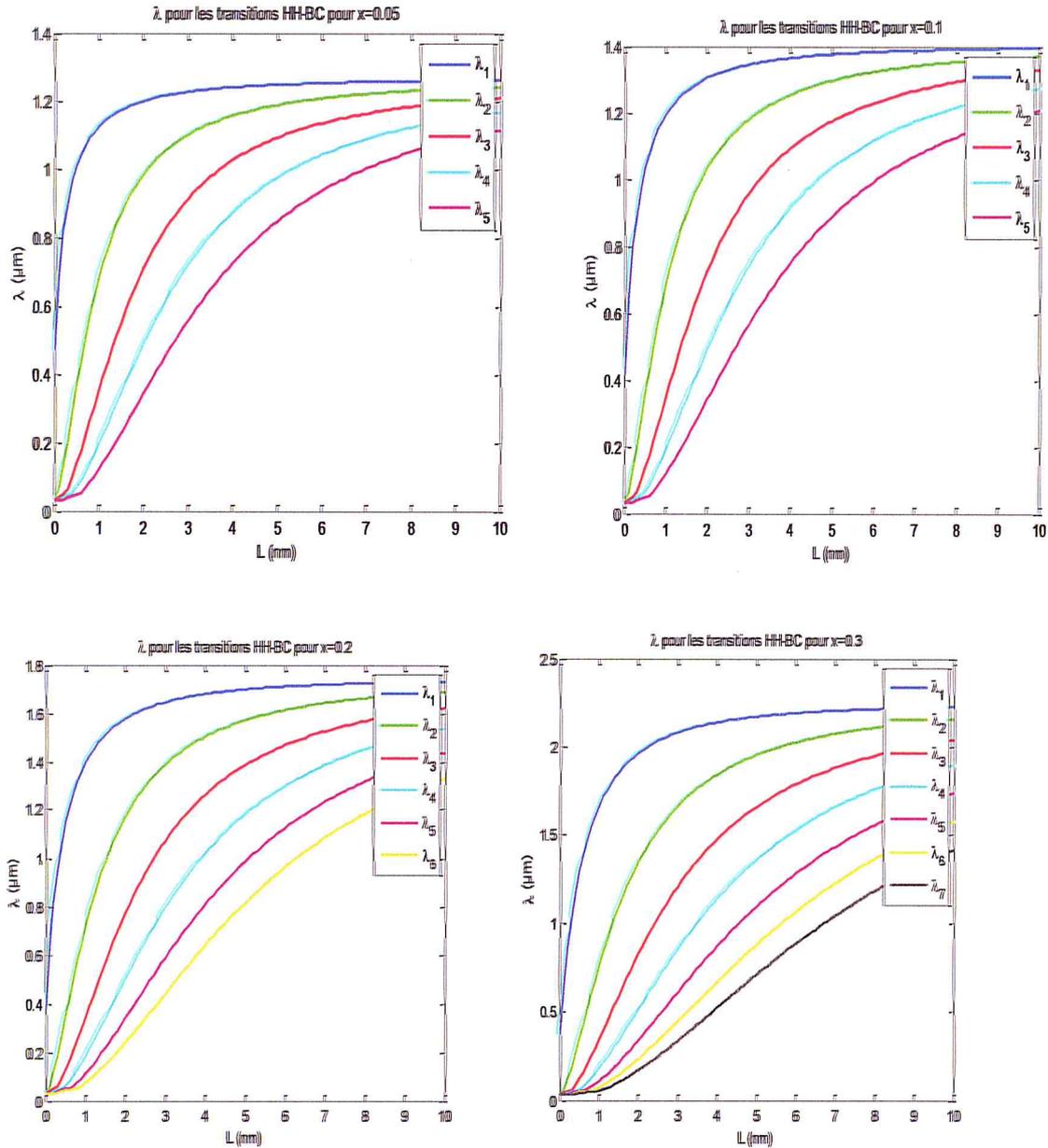


Figure 3.12 : Variation des longueurs d'ondes d'émissions en fonction de la largeur du puits quantique L_w pour différentes concentrations d'indium.

Les figures 3.12 montrent la variation des longueurs d'onde d'émissions relatives aux transitions bande de conduction et bande trous lourds, Nous concluons que La longueur d'onde augmente avec l'élargissement de puits quantique et la concentration de l'indium.

Conclusion : Comme

$$\lambda_e = \frac{h\nu}{E_{tr}} \quad (3.3)$$

on constate que plus l'énergie de transition E_{tr} est petite plus la longueur d'onde d'émission λ_e devient plus grande.

3.3 Boîtes quantique pour le photovoltaïque :

Les boîtes quantiques semi-conductrices sont des inclusions nanométriques tridimensionnelles d'un matériau de faible gap dans un autre matériau de gap plus élevé. Elles sont ainsi souvent considérées comme des « atomes artificiels », grâce à leurs tailles (quelques dizaines de nanomètres dans un semi-conducteur) [40].

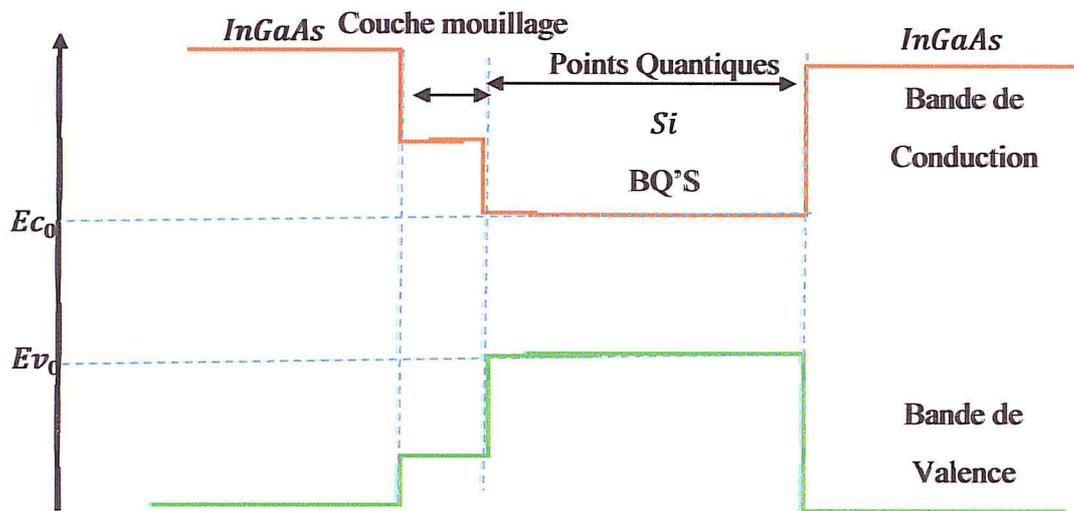
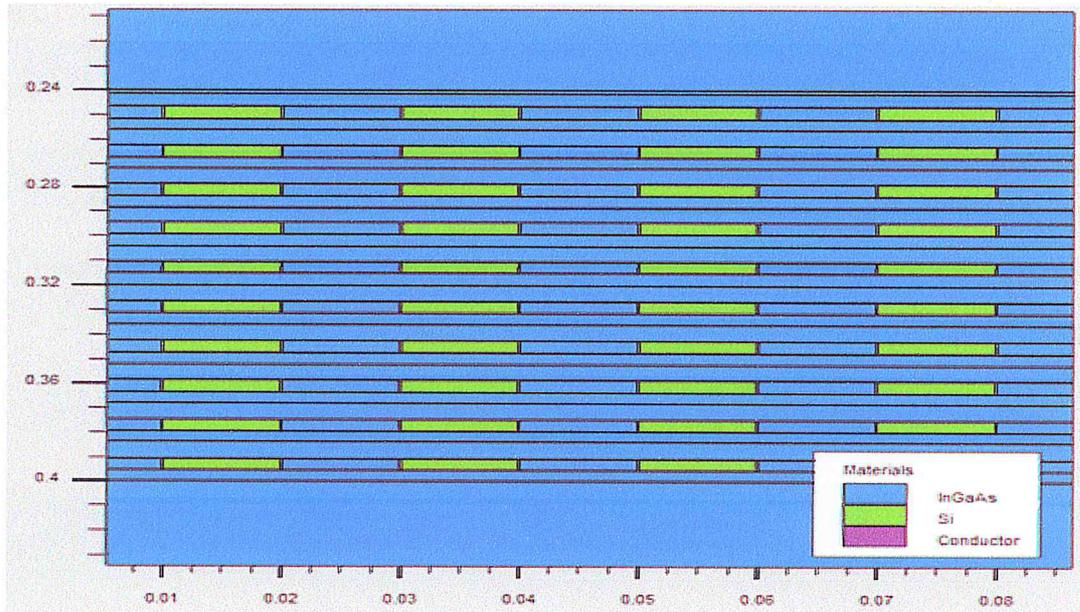


Figure 3.13 : Diagramme de bandes de systèmes à points quantiques (BQ's) InGaAs/Si.

Nous avons fixé le nombre de boîtes quantique (4 boîtes dans une couche) et on a fixé le nombre de couches (10 couches).

La largeur de la boîte = 10 nm et X (Indium) = 50%



La figure 3.14 : structure $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Si}$ pour un système contient 10 couches QDs.

3.3.1 Caractéristiques courant-tension :

3.3.2 Caractéristiques $I(V)$ boîtes quantiques :

Sur la figure 3.15 illustre l'évolution de la densité de courant en fonction de la tension. Nous pouvons voir que la densité de courant est stable 59.2 (mA/cm^2) pour des valeurs de tension de 0 à 0.22(V), après elle diminue jusqu'à égale ou tend vers 0.

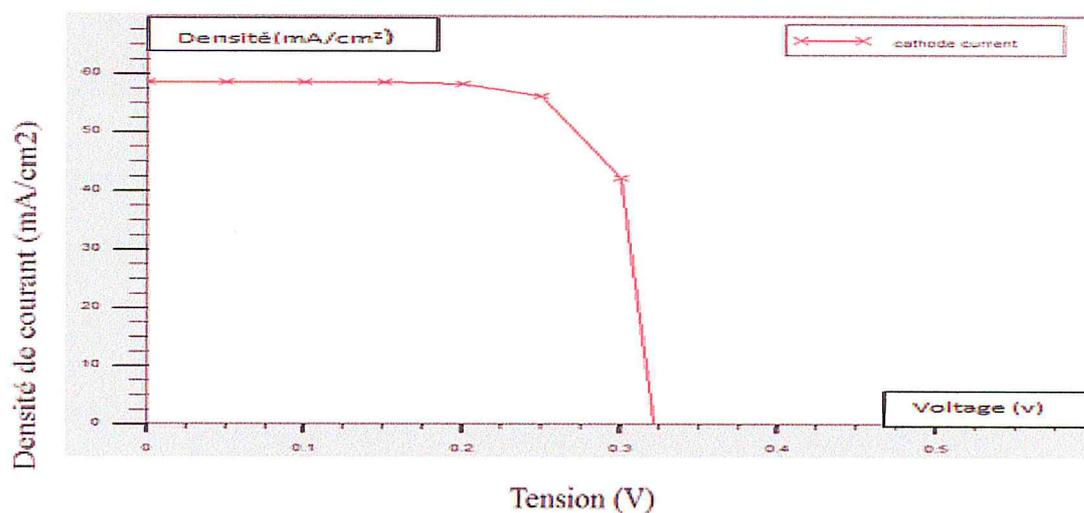


Figure 3.15 : Caractéristiques courant-tension de la structure $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Si}$ pour 10 couches QDs.

3.3.3 Puissance et puissance maximal avec boîtes quantiques :

La figure 3.16 montre la puissance délivrée pour une cellule solaire de la structure InGaAs/Si. D'après les résultats expérimentaux Nous pouvons voir que la puissance maximale augmente, en augmentant le nombre des couches QDs.

Par exemple pour notre cas et étude nous avons fixé le nombre des couches et la concentration de l'indium, on constate que pour :

- 10 couches QDs on a une puissance maximum $P_{\max}=14.02$ (mW /cm²)

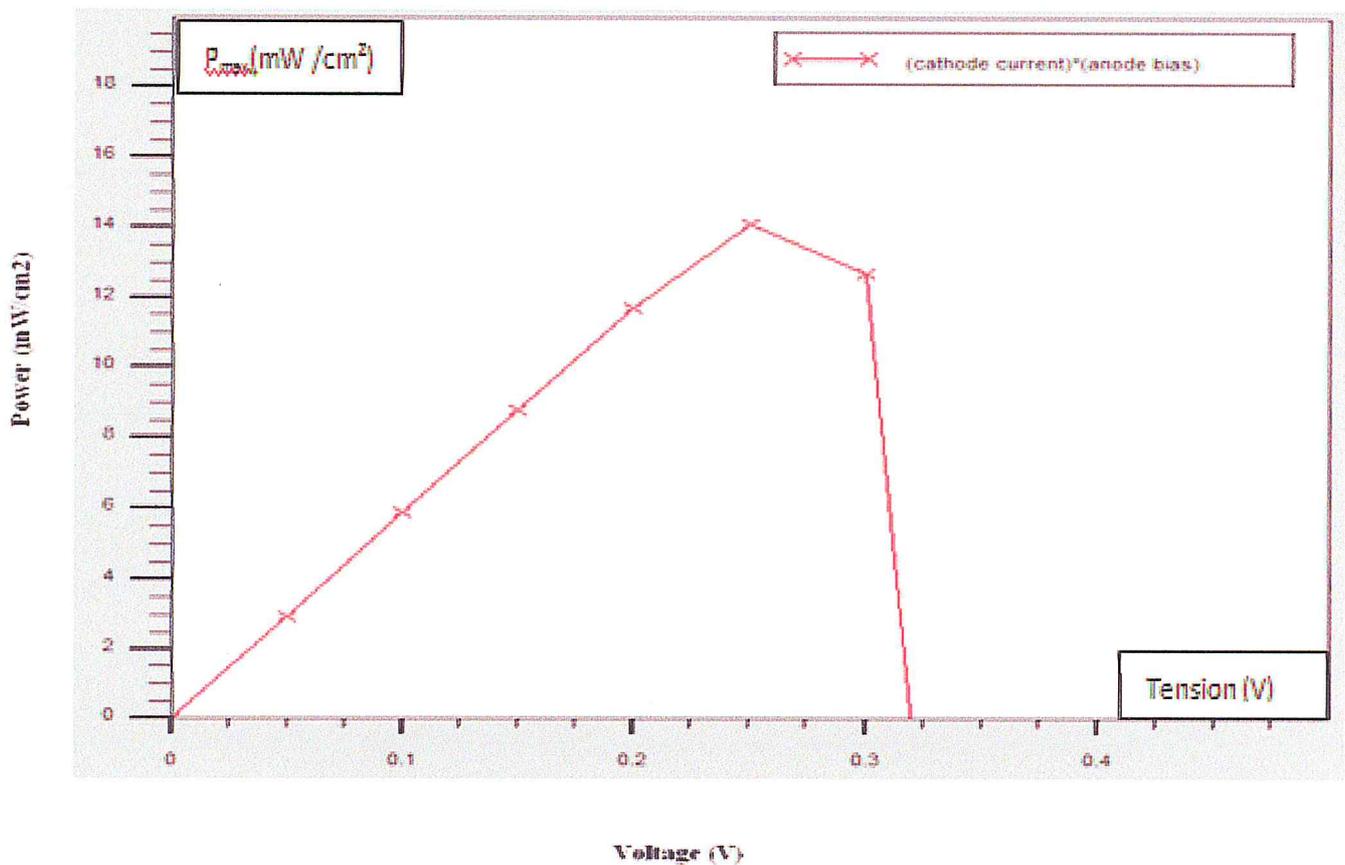


Figure 3.16 : Puissance délivrée par la cellule solaire en fonction de la tension.

J_{cc} (mA/cm²)	58.7505
V_{oc} (Volt)	0.321664
FF (%)	74.5044
P_{max} (watt)	14.02
Rendement (%)	14.0797

Le tableau 3.2 : présente les différents paramètres de la cellule solaire avec les boîtes quantiques.

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les propriétés très particulières de matériau InGaAs sur un substrat du Si. Nous avons aussi étudié l'effet de l'incorporation par l'indium sur les différents paramètres électroniques et optiques et nous avons obtenu les longueurs d'ondes d'émissions optimales et exploitable en télécommunications, nous avons trouvées les fameux lambda $\lambda_1 = 0.8$, $\lambda_2 = 1.3$ et $\lambda_3 = 1.55$ pour différentes concentrations ($x=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$) et largeur du puits.

Après nous avons établis la simulation des différents paramètres caractérisant la cellule solaire à base des matériaux InGaAs/Si et nous avons aboutis à ces résultats utilisons des boîtes quantiques à l'aide de logiciel SILVACO ont arrivé à un rendement important égale $\text{eff} = 14.07\%$ et puissance maximale $P_m = 14 \text{ mW /cm}^2$.

Conclusion Générale :

Ce projet de fin d'étude porte sur la modélisation et l'optimisation de la forme d'investigation de la structure à base de InGaAs/Si pour diverses applications, dans notre étude nous avons intéressé aux applications photovoltaïque et télécommunication et ceci à partir des différentes relations théoriques et des simulations faites sous les logiciels Silvaco et MATLAB. Malgré certains problèmes engendrer par la structure elle-même. Nous avons trouvé les fameuses longueurs d'ondes d'émissions qui exploitable en télécommunications, $\lambda_1=0.8$, $\lambda_2=1.3$ et $\lambda_3=1.55$ pour différentes concentrations ($x=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$) et largeur du puits et un rendement important en photovoltaïque égale =14.07% et puissance maximale $P_m=14 \text{ mW /cm}^2$.

Bibliographie :

- [1] Baldomero Garcia, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas, these, 2007, U. Monterey, California.
- [2] A.Chovet et P.Masson: « physique des semi-conducteurs », Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, 2004/2005.
- [3] Classes préparatoires CPE Institution des Chartreux Année 2004-2005 (Les cellules photovoltaïques)
- [4] Allaoui Abdelmadjid « simulation numérique des caractéristiques électriques des cellules solaires en GaAs » UNIVERSITE DE BECHAR (2009).
- [5] M. Benaïcha : « Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque », Magister en physique Université Algérie, 107p, 2007.
- [6] R. Castagné et all : « Circuits Intégrés en arséniure de Gallium. Physique, technologie et règles de conception », Masson et CINET ENST Paris, 1989.
- [7] S.Laval : « Physique des semi-conducteurs III-V », Ecole d'été d'optoélectronique, 2002.
- [8] <http://www.polytech-lille.fr/cours-transistor-effet-champ/hemt/Hemtc1b1.htm>.
Consulte le 27/02/ 2016.
- [9] F. Levy : « Traité des matériaux (18) », Physique et technologie des semi-conducteurs, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.
- [10] N.Sayah : « Etude et optimisation des paramètres physiques de la diode laser GaAsSbN/GaAs », mémoire de MAGISTERE, Université Djillaliliabès de Sidi bel abas, 2011
- [11] S.Kaci et al: « Etude et simulation d'une structure a base de GaInNAs/GaAs pour le photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur d'état, Université Saad Dahleb Blida, 2011.
- [12] G. Ghosh: « Handbook of thermo-optic coefficients of optical materials with applications », Academic Press, 1998.
- [13] F.Kerkar: « Calcul du gain optique d'un puits quantique à base de GaInNAs/GaAs pour son utilisation dans les télécommunications optiques émettant à une longueur d'onde de 1.3 μm », Université Saad Dahleb de Blida, 2006.
- [14] McPheeters, C. O.; Yu, E. T. Computational Analysis of Thin Film InGaAs/GaAs Quantum Well Solar Cells with Back Side
- [15] M. Planck : Distribution of energy in the normal spectrum, 1900.

- [16] M.PETIBON Stéphane : thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, janvier 2009.
- [17] : Allaoui Abdelmadjid « simulation numérique des caractéristiques électriques des cellules solaires en GaAs » UNIVERSITE DE BECHAR (2009).
- [18] : zighedlilia « Etude de l'influence de nouveaux films antiréfléchissante sur la conversion photovoltaïque » université é de Constantine(2007).
- [19] : Bestam Rachid «Modélisation et Simulation d'une Structure à base de Semiconducteur III-V pour le Photovoltaïque » Université Saad dahleb de Blida.
- [20] : Malika Madani « réalisation des couche antireflets dans les cellules solaire a couche mince» Université Abou-BakrBelkaid de Tlemcen (2006).
- [21] N.Sayah : «Etude et optimisation des paramètres physiques de la diode laser GaAsSbN/GaAs», mémoire de MAGISTERE, Université Djillaliliabès de Sidi bel abas, 2011.
- [22] K. Köksal et al: «Critical layer thickness of GaIn(N)As(Sb) QWs on GaAs and InP substrates for (001) and (111) orientations», Eur. Phys. J. B69, pp. 211–218 ,2009.
- [23] B .Hadda , ' Modélisation et étude d'un puits quantique contraint à base de GaInAs/GaAs et calcul du courant de seuil ', mémoire Magister, Université de Blida, juillet 2011.
- [24] Raïssa RAY-DJONDANG 'Spectroscopie optique de boîtes quantiques d'InAs sur substrats d'InP et de GaAsNanopixelsemiconducteur pour l'étude de l'influence d'un champ électrique', No d'ordre 2010-ISAL-0XXX Année 2010.
- [25] Claire-Marie Simon,'Contrôle optique de l'exciton dans des boîtes quantiques individuelles', HAL Id: tel-00707530Submitted on 12 Jun 2012.
- [26] H. Y. Fan, 'Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors', Phys.Rev., vol. 82, p. 900, 1951.
- [27] J. Piprek,' Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics andSimulation', California : Academic Press, 2003.
- [28] AISSAT Abdelkader, "Cours matériaux pour l'optoélectronique" Université de Blida 2017.
- [29] Frédéric Fossard 'Spectroscopie infrarouge des fils et boîtes quantiques InAs/InAlAs /InP (001) ', université Paris XII Orsay; 2002.
- [30] AouatiRedha, 'Etude de l'interaction électron-matière des nanostructures del'arséniure de gallium', université Mentouri Constantine, 2011.

- [31] F.Kerkar: «Calcul du gain optique d'un puits quantique à base de GaInNAs/GaAs pour son utilisation dans les télécommunications optiques émettant à une longueur d'onde de 1.3 μm », Université Saad Dahleb de Blida, 2006.
- [32] Y. Zhang, A. Mascarenhas, H.P. Xin, and C.W. Tu, 'Valence-band splitting shear deformation potential of dilute GaAs_{1-x}N_x alloys', Phys. Rev., 61, n° 7, 4433- 4436 (2000).
- [33] Abdelmoumene benahmed 'étude et modélisation des structures à base des boites quantiques pour la conversion photovoltaïque ', these de doctorat, universite de blida 1, 2017.
- [34] rachid bestam 'modelisation et simulation d'une structure a base de semiconducteur iii-v pour le photovoltaïque ', memoire de magister, universite saad dahled de blida, 2011.
- [35] Y. Zhang, A. Mascarenhas, H.P. Xin, and C.W. Tu, 'Valence-band splitting shear deformation potential of dilute GaAs_{1-x}N_x alloys', Phys. Rev., 61, n° 7, 4433-4436 (2000).
- [36]. M. A. Cusack, P. R. Briddon, and M. Jaros "Absorption spectra and optical transitions in InAs/GaAs self-assembled quantum dots", Phys. Rev. B 56, 4047 (1997).
- [37]. V. Gorge. «Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V», thèse de doctorat université paris sud 11, 2012.
- [38]. A. AISSAT : «Modélisation et Simulation du gain optique et du courant de Seuil d'un laser à puits quantique contraint à base de GaXIn_{1-X}NYAs_{1-Y}/GaAs»,Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [39] K. Köksal, B. Gönül, and M. Oduncuoğlu : «Critical Layer Thickness of GaIn(N)As(Sb) QWs on GaAs and InP Substrates for (001) and (111) Orientation », The European Physical Journal B , 69, 211-218(2009).
- [40] Ghione, G., "Semiconductor Devices for High-Speed Optoelectronics", PolitecnicoDitorino,Italy,Cambridge University Press,(2009).
- [41] Bediar, M., "Caracteristiques des Structures Laseres a Puits Quantiques Contraints", Universite de Bataba,(2007).
- [42] S.Kaci et al: «Etude et simulation d'une structure a base de GaInNAs/GaAs pour le photovoltaïque»,
- [43] Hegedus, A. I., "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering". England,Wiley, (2003).

