

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Micro optoélectronique

présenté par

Laichi Mohamed

&

Boukhlef Billel

## Amélioration des structures à boîtes quantiques à base d'InAsSb/GaAs pour les cellules solaires

Proposé par : Aissat Abdelkader

Année Universitaire 2015-2016

## Remerciements

---

*Avant tout, je remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*On tient à exprimer nos vifs remerciements à notre 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.*

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

*On tient à exprimer nos vifs remerciements à monsieur F. Benyettou pour son entière disposition, et ses judicieux conseils, sa patience et sa gentillesse.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font d'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 nous amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation.*

*Un gros merci à nous familles et à nous amis, merci d'être toujours là ..... merci pour tout.*

*Tous ceux qui me sont chères*

---

ملخص:

هذا العمل يحتوي على دراسة الخلايا الشمسية التي هي عبارة عن محاولات مباشرة من الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. هدف العمل هو دراسة ومحاكاة هذه الخلايا الشمسية على أساس مادة InAsSb التي هي عبارة عن خليط ثلاثي شبه ناقل III-V الذي له عدة خصائص هامة (ضوئية، إلكترونية وفيزيائية) ودراسة هذه الخلايا على أساس InAsSb/GaAs وتأثير نقاط الكم على هذا الهيكل بهدف تحسين مردود هذا الأخير.

كلمات المفاتيح: الخلايا الشمسية، نقاط الكم، شبه ناقل III-V.

---

**Résumé :**

Ce travail porte sur l'étude de l'énergie photovoltaïque qui 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 InAsSb. Ces alliages ternaires qui sont des semi-conducteurs III-V présentent des caractéristiques importantes (optique, électronique et physique) et l'étude des caractéristiques d'une cellule solaire à base d'InAsSb/GaAs et l'influence des boîtes quantiques sur cette structure dans le but d'optimiser le rendement ont été étudiées.

**Mots clés :** cellule solaire, boîtes quantiques, semi-conducteur III-V.

---

**Abstract :**

This work focuses on the study Photovoltaic which converts Light energy directly into electrical energy by solar cells. This work aim to study and simulate solar cell based on InAsSb material. These ternary alloys which are semiconductors III-V present important characteristics (optical, electronic and physique) and study the characteristics of a solar cell based InAsSb / GaAs and influence of quantum dots on this structure in the mean of optimization of its efficiency it was studied

**Keywords :** Solar cells, quantum dots, semi conductor III-V

---

## Listes des acronymes et abréviations

**E** : Energie de photon

**h** : Constante de Planck

**C** : Vitesse de la lumière dans le vide

**$\lambda$**  : Longueur d'onde

**AM** : Air mass (masse d'air)

**In**: Indium

**Sb**: Antimoine

**As**: Arsenic

**Ga**: Gallium

**BC**: Bande de conduction

**BV**: Bande de valence

**$\alpha$** : Coefficient d'absorption

**$I_{obs}$** : Courant d'obscurité

**q**: Charge élémentaire

**K**: Constante de Boltzmann

**$I_s$** : Courant de saturation

**n**: Coefficient d'idéalité

**$I_{ph}$** : Courant photo-courant

**$F(\lambda)$**  : Spectre solaire

**$EQE(\lambda)$** : Efficacité quantique externe

**$I_{cc}$** : Courant de court-circuit

**$V_{oc}$** : Tension à circuit ouvert

**FF**: Facteur de forme

**$P_{max}$** : Puissance maximale

**$\eta(eff)$** : Rendement de conversion

**$P_{inc}$** : Puissance incidente

**$R_s$** : Résistance

**$R(\lambda)$** : Réflectivité de la cellule

**w**: Largeur de la couche active

**EQI**: Efficacité quantique interne

**E<sub>g</sub>**: Energie de gap

**ε** : Déformation hydrostatique

**a<sub>s</sub>**: Paramètre de maille du substrat

**a<sub>e</sub>**: Paramètre de maille de la couche active

**γ**: Coefficient de poisson

**C<sub>ij</sub>** : Tenseur d'élasticité

**E<sub>v,moy</sub>** : Centre de gravité de la bande de valence

**Δ<sub>o</sub>**: Energie de spin orbite

**a<sub>v</sub>**: Potentiel de déformation dans la bande de valence

**a<sub>c</sub>**: Potentiel de déformation dans la bande de conduction

**ΔE<sub>sh</sub>**: Décalage énergétique induit par la contrainte de cisaillement

**b**: Potentiel de déformation tétragonale

**AMN**: Paramètre de couplage de l'azote

**ΔE<sub>lh</sub>** : Décalage d'énergie de la bande de trou lourd

**ΔE<sub>hh</sub>** : Décalage d'énergie de la bande de trou léger

**n**: Indice de réfraction

**R**: Coefficient de réflexion

**θ<sub>i</sub>** : Angle de rayon lumineux incident

**θ<sub>r</sub>** : Angle de rayon lumineux réfracté

**μ<sub>n</sub>** : Mobilité d'électron

**μ<sub>p</sub>** : Mobilité de trous

**N<sub>D</sub>**: Concentration des donneurs

**N<sub>A</sub>**: Concentration des accepteurs

**B** : Le potentiel de déformation tétragonale

## **Table des matières**

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	01
Chapitre 1 : Notions de base	03
1-1 Introduction	03
1-2 Généralité sur les semi-conducteurs	03
1-2-1 Structure cristalline	04
1-2-2 Les types de semi-conducteurs	04
1-2-3 Les bandes d'énergies	08
1-3 Les semi-conducteurs III-V	11
1-3-1 Les différents composés semi-conducteurs III-V	12
1-3-2 Structures cristallines	12
1-3-3 Les propriétés optiques	13
1-3-4 Propriété électronique d'alliage ternaire	15
1-3-5 Notion de contrainte	16
1-3-6 Epaisseur critique	18
1-4 Le photovoltaïque	19
1-4-1 L'énergie solaire photovoltaïque	19
1-4-2 Spectre solaire	19
1-4-3 L'effet photovoltaïque	20
1-4-4 La cellule photovoltaïque	21
1-4-5 Avantages et inconvénients	29
1-5 Conclusion	30
Chapitre 2 : Résultats et discussions	31

2-1 Introduction	31
2-2 Description d'InAsSb	32
2-3 Propriété électronique d'alliage InAsSb	32
2-3-1 Etude de la contrainte	32
2-3-2 Les masses effectives	35
2-3-3 Le gap d'énergie	37
2-4 Propriétés optiques	41
2-5 Différents paramètres de la cellule photovoltaïque pour l'InAsSb	44
2-5-1 Caractéristiques courant-tension	45
A) Caractéristiques I(V) sans boîtes quantiques	45
B) Caractéristiques I(V) avec boîtes quantiques	46
2-5-2 Puissance et puissance maximal délivrée	47
A) Puissance et puissance maximal délivrée sans boîtes quantiques	47
B) Puissance et puissance maximal délivrée avec boîtes quantiques	48
2-5-3 Efficacité quantique externe	48
2-5-4 Le Rendement	49
2-5-5 Résultats final	50
2-6 Conclusions	51
Conclusions générale	52
Annexe	53
Bibliographie	58

## Liste des figures

### Chapitre 1 :

**Figure 1-1** : structure cubique et la représentation plane de cette structure

**Figure 1-2** : représentation plane d'un semi conducteur intrinsèque

**Figure 1- 3** : Silicium type N

**Figure 1- 4** : Silicium type P

**Figure 1-5** : diagramme de bandes d'énergies pour les matériaux semi-conducteurs

**Figure 1-6** : Les niveaux d'énergies intermédiaires dans un semi conducteur type N

**Figure 1-7** : Les niveaux d'énergies intermédiaires dans un semi conducteur type P

**Figure 1.8** Le gap direct et le gap indirect où  $\vec{k}$  est le vecteur d'onde associé à un à un électron (quantité du mouvement  $\rho = m\vec{v} = \hbar\vec{k}$  ).[

**Figure 1.9:** Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan

**Figure 1-10** : Illustration des deux types de contraintes. Où :  $a_s$  est le paramètre de maille du substrat et  $a_e$  est celui de la couche épitaxie

Figure 1-11 : illustration d'une couche contrainte

**Figure 1.12** : Schéma de la Terre et de son atmosphère montrant les paramètres AM0, AM1, AM1.5 et AM2

**Figure 1.13** Spectres solaires relevés selon la convention AM.

**Figure 1.14** Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule Photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées

**Figure 1.15** Structure d'une cellule photovoltaïque standard

**Figure 1.16** Effet de la couche de fenêtre



**Figure 1.17** Effet de la couche BSF

**Figure 1-18** : Caractéristiques courant-tension [ $I=f(V)$ ] sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque

**Figure 1.19** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à jonction PN.

**Figure 1.20** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque prenant en compte les différentes pertes, modèle à deux diodes.

**Figure 1.21** Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode avec pertes et un coefficient d'idéalité.

## Chapitre 2

**Figure 2.1:** *Variation de paramètre de maille d'InAsSb en fonction de la composition Sb*

**Figure 2.2:** Variation de la déformation Bi-axiale et Uni-axiale d'InAsSb en fonction de la composition d'antimoine

**Figure 2.3:** *l'épaisseur critique en fonction de la composition d'antimoine*

**Figure 2.4:** Variation des masses effectives en fonction de la composition x d'antimoine

**Figure 2.5:** Evolution de l'énergie du gap non contraint avec éclatement en fonction de la variation d'antimoine.

**Figure 2.6** : décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement pour chacune des bandes constituant la bande de valence en fonction des concentrations d'antimoine

**Figure 2.7** : le gap d'énergie contraint en fonction de la composition d'antimoine.

**Figure 2.8** Variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de l'énergie de photon

**Figure 2.9** Variation indice de réfractons  $n$  en fonction de la longueur d'onde

**Figure 2-10** Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde

**Figure 2-11** : la structure de la cellule solaire a base d'InAsSb/GaAs (10 couches BQs )

**Figure 2.12** Caractéristiques courant-tension de la structure GaAs PIN.

**Figure 2.13** Caractéristiques courant-tension de la structure  $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$  pour différentes couches BQs.

**Figure 2.14** Puissance délivrée par la cellule solaire en fonction de la tension.

**Figure 2.15** Puissance délivrée par la cellule solaire en fonction de la tension pour différentes couches BQs.

**Figure 2.16** variation de l'efficacité quantique externe en fonction de fractions d'antimoine sans et avec boites quantiques.

**Figure 2.17** Représentation du rendement de la structure InAsSb/GaAs en fonction de la concentration d'indium pour différentes couches a BQs.

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

**Tableau 1.1** Un extrait du tableau périodique qui présente le Placement des différents matériaux semi-conducteurs.

### Chapitre 2

***Tableau 2.1** Un extrait du tableau périodique qui présente le Placement des différents matériaux semi-conducteurs.*

**Tableau 2.2** différents paramètres de la cellule solaire sans BQs.

**Tableau 2.3** résultats finals de l'effet du nombre de BQs sur la structure InAs<sub>0.9</sub> Sb<sub>0.1</sub>.

# Introduction générale

---

L'avenir énergétique mondial est l'une des questions majeures et d'actualité qui se pose sur la scène internationale.

En effet l'énergie est au cœur de toutes les activités humaines mais les problèmes liés à la gestion de l'énergie dans le monde sont multiples. Il y a en premier lieu le danger de la radioactivité sur la vie humaine qui causant les explosions des centrales nucléaires comme l'accident de Fukushima au JAPAN en Mars 2011. A celle-là s'ajoutent les effets néfastes liés à l'environnement engendré par la difficulté de l'élimination des déchets nucléaires et les rejets du gaz dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> causé par l'utilisation des énergies fossiles comme le pétrole et le gaz naturel [32].

Par ailleurs, les réserves des énergies fossiles ne sont pas inépuisables ; ces multiples facteurs donnent une raison d'intérêt pour le développement et l'utilisation des énergies renouvelables sous ces différentes formes : Photovoltaïque, Eolienne et thermique [32].

L'énergie solaire photovoltaïque nous permet de convertir directement le rayonnement solaire en électricité à l'aide des composants optoélectroniques appelés cellules photovoltaïques. Ces composants sont généralement à base de semi-conducteurs et leur alliage correspondant comme le matériau ternaire III-V « InAsSb/GaAs » qui fait l'objet de ce mémoire.

L'étude présentée dans ce mémoire et organisée en deux chapitres d'une manière assez fusionnée, les différents paramètres électronique et optique des cellules photovoltaïques à base de « InAsSb/GaAs » ainsi que les équations mathématiques qui permettent de faire des analyses numériques.

- Le premier chapitre est consacré aux notions fondamentales des matériaux semi-conducteurs III-V, l'étude de ces matériaux et leur caractéristiques structurales, ainsi que des généralités sur le photovoltaïque et la description du principe de fonctionnement des cellules solaires.
- Le deuxième chapitre présente les résultats de simulation d'une structure à base de matériau InAsSb par SILVACO.

Le but de ce travail est d'améliorer les performances des cellules solaires en améliorant le rendement avec l'utilisation des nouveaux matériaux.

# Chapitre 1 Notions de base

---

## 1-1/ introduction :

Dans ce chapitre nous allons parler des principales caractéristiques et paramètres des semi-conducteurs sur tout les semi-conducteurs III-V qui ont connus grande révolutions en électronique et optoélectroniques ces dernier temps. Par la suite nous nous penchons sur le photovoltaïque et l'importance de l'énergie solaire comme une énergie du future.

Donc, nous racontons brièvement l'histoire du photovoltaïque en présentant le principe de fonctionnement des cellules solaires et nous définissons les paramètres photovoltaïques à partir des quelles nous évoluons les performances des cellules solaires.

## 1-2/ généralité sur les semi-conducteurs :

Par son habilité à conduire le courant un semi-conducteur est un matériau situé entre le conducteur et l'isolant. Un semi-conducteur à l'état pur (intrinsèque), n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant. Les éléments uniques les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le Silicium, le Germanium et le Carbone [1].

Les semi-conducteurs sont des éléments unique et sont caractérisés par des atomes à quatre électrons de valence [1]. Dans un semi-conducteur la résistivité varie en sens inverse de la température, est généralement comprise entre  $10^{-3}$  et  $10^7 \Omega \text{ cm}$  [2].

Un semi-conducteur a un gap assez faible, ce qui permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction simplement grâce à leur énergie d'agitation thermique [3].

### 1-2-1/Structure cristalline :

La structure de la plupart des semi-conducteurs est la même que celle de diamant (cubique). Chaque atome est lié à 4 voisins placés au sommet d'un tétraèdre par une liaison covalente (valence mono polaire). Ces éléments sont tétravalent [2].

Par exemple le Germanium ses atomes comporte quatre électrons périphériques ou électrons de valence : dans un cristal de germanium chaque atome met en commun ces électrons respectivement avec quatre atomes les plus proche (figure1-1-A) [2,3].

Une liaison entre deux atomes est donc assurée par deux électrons communs. Pour chaque atome, tout se passe comme si la couche électronique périphérique avait huit électrons, ce qui correspond à une grande stabilité : cette mise en commun d'électrons est la source des forces de cohésion qui donnent au cristal sa rigidité et sa dureté [2,3]. Dans la représentation plane (figure1- 1-B) les traits figurent les électrons de valence [3].

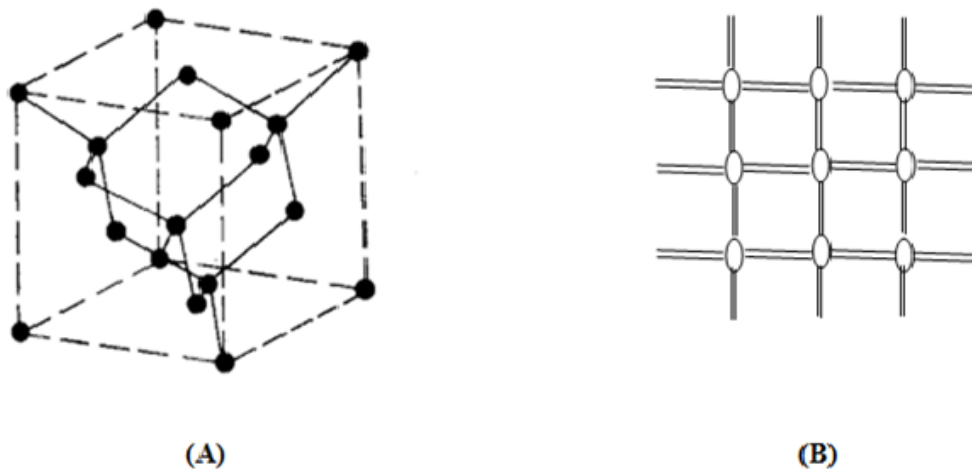


Figure 1-1 : structure cubique et la représentation plane de cette structure [2,3]

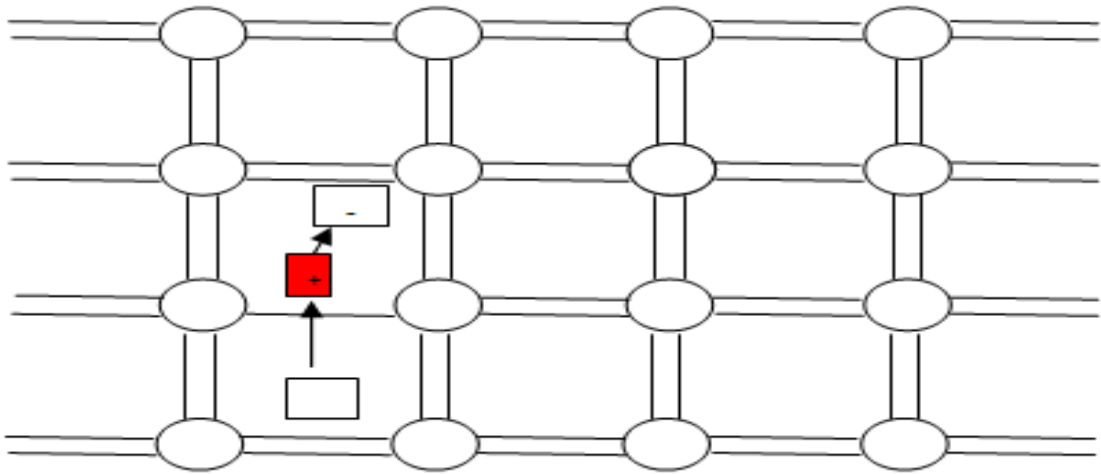
### 1-2-2/ les types de semi-conducteurs :

#### a) semi-conducteurs intrinsèques :

Si une liaison de valence est brisée (agitation thermique, photon ...) l'électron devient mobile : il laisse un excès de charge positive le « trou » (symbolisé par un + dans un carré). Cette lacune va être comblée par un électron voisin libéré par agitation thermique et qui va à son tour laisser un trou : ceux-ci semblent se déplacer dans le

réseau. Aux électrons (masse positive, charge négative) correspondent des trous (masse négative, charge positive).

Le déplacement des trous étant un processus à deux étapes, leur mobilité dans le réseau est plus faible que celle des électrons. Trous et électrons constituent les **porteurs libres intrinsèques** dont le nombre est fonction de la température. La neutralité électrique du matériau impose que les trous et les électrons soient en nombres identiques ( $n_i$  et  $p_i$ ) [4].



**Figure 1-2** : représentation plane d'un semi conducteur intrinsèque [4]

La conductivité intrinsèque du matériau est très faible

$$\sigma = q (\mu_n n_i + \mu_p p_i) \quad 1.1$$

avec  $n_i = p_i$

Donc :

$$\sigma = q n_i (\mu_n + \mu_p) \quad 1-2$$

En prenant l'exemple de Si pur à 300 K, on mesure :  $n_i = p_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Ce nombre est très faible si on le compare au nombre des atomes.

Toujours pour le silicium pur à 300 K, les mobilités sont :  $\mu_n = 12 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

et  $\mu_p = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

Donc la conductivité intrinsèque est très faible [4].



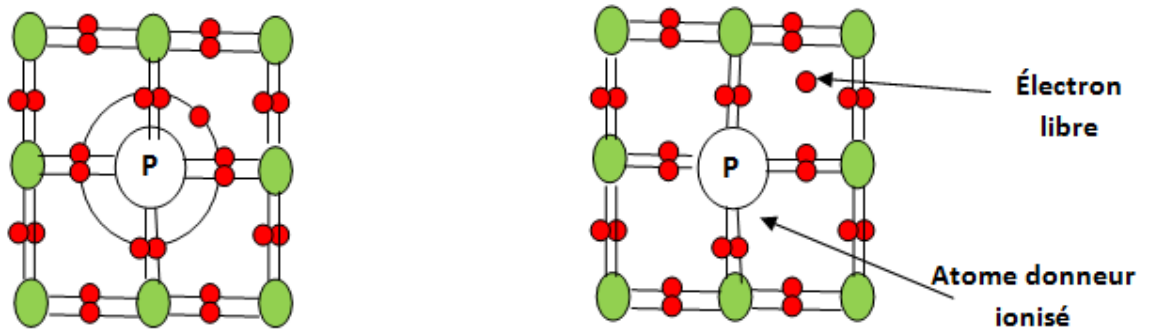
**b) semi-conducteurs extrinsèques :**

Un semi-conducteur extrinsèque si on lui ajoute des atomes étranges en faible proportion (Dopage) [3], et pour les semi-conducteurs extrinsèques il existe deux types :

**1) semi-conducteur type N : (dopage N, donneurs)**

Si on ajoute des atomes pentavalente (P, As, Sb) à un semi-conducteur ces atomes se substituant aux atomes cristallines et fournissent des électrons libres, et en obtient un semi-conducteur de type N

L'atome donneur participe avec 4 électrons et le cinquième électron devient libre voir la Figure 1- 3 [3, 4,5].



**Figure 1- 3 : Silicium type N [3]**

La conductivité du matériau (conductivité **extrinsèque**) devient à cause du taux de dopage, très supérieure à celle du matériau pur. Les atomes pentavalents ou donneurs deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction.

La conduction dite de **type N** (négative) est assurée par des électrons. Les électrons sont les porteurs majoritaires et Les trous sont les porteurs minoritaires qui signifie  $n \gg p$  [5].

Donc la loi 1-1 devient :

$$\sigma = q N_D \mu_n \quad 1-3$$

Ou

$N_D$  : concentration des donneurs.

## 2) semi-conducteur type P : (dopage P, Accepteur)

Si on ajoute des atomes trivalentes (Bore) à un semi-conducteur ces atomes se substituent aux atomes cristallins et mettent les électrons de valence dans des liaisons, il y a donc apparition d'un trou et on aura un semi-conducteur de type P.

L'atome accepteur à 3 électrons donc elle va recevoir un quatrième électron. Voir illustration de la Figure 1-4 [3, 4,5].

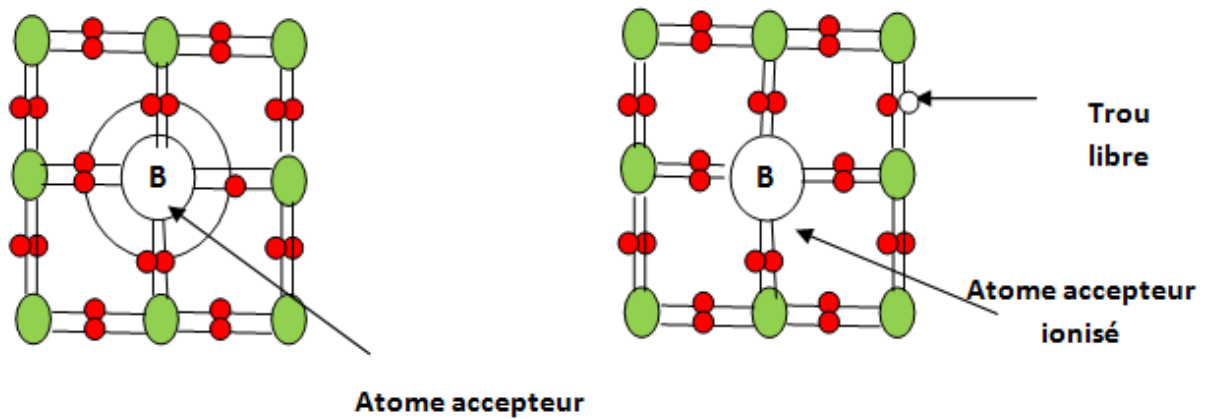


Figure 1-4 : Silicium type P [3]

La conduction dite de **type P** (positive) est assurée par des trous. Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons sont les porteurs minoritaires qui signifie  $p \gg n$  [5].

Donc la loi 1-1 devient :

$$\sigma = q N_A \mu_p \quad 1-4$$

ou

$N_A$  : concentration des donneurs.

### 1-2-3/Les bandes d'énergies

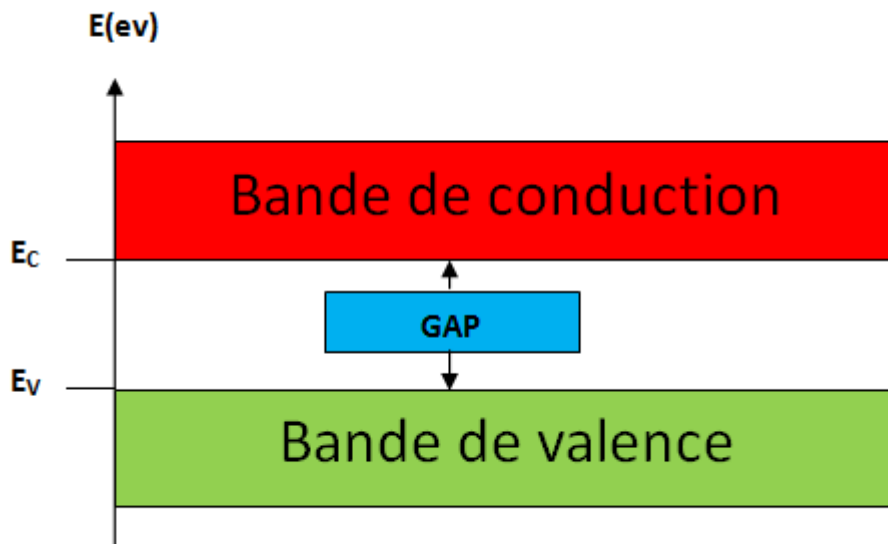
On appelle bande d'énergie l'ensemble des niveaux énergétiques discrets, mais très serrés, en nombre égale au nombre d'atomes, qui substituent à chacun des niveaux d'énergies de l'atome isolé lors de la condensation à l'état solide d'un ensemble d'atomes [2].

Pour la conduction électrique, seules les bandes correspondantes à la couche externe d'électrons interviennent, ces électrons assurent les liaisons entre atomes voisines (valence), lorsque les atomes s'ionisent, leur déplacement d'ensemble d'un champ électrique constitue le courant électrique [1, 2,3].

#### A) Bande de valence ; bande de conduction ; bande interdite :

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite ou gap. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie.

La **figure 1.5** représente le diagramme de bandes d'énergies pour les matériaux semi-conducteurs [1.2.6].

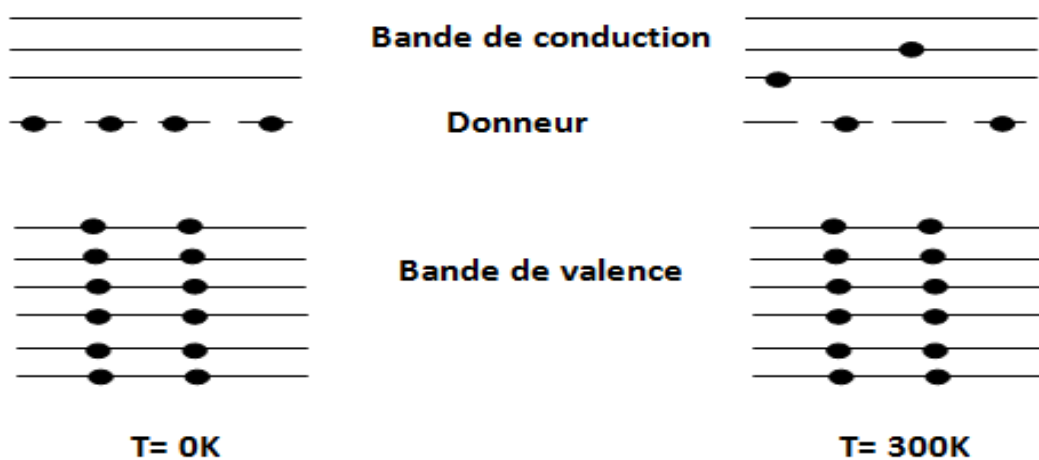


**Figure 1-5** : diagramme de bandes d'énergies pour les matériaux semi-conducteurs.[6]

## B) Bandes d'énergie des semi-conducteurs dopés

### 1) semi-conducteur type N :

Les atomes de pentavalents (donneurs) introduisent des charges positives dans le réseau, charges qui attirent les électrons en créant ainsi de nouveaux niveaux dont l'énergie est légèrement inférieure à ceux de la bande de conduction du matériau pur. Si on élève la température, ces électrons peuvent passer dans la bande de conduction. La figure 1-6 représenté comment les impuretés introduisent des niveaux d'énergies intermédiaires dans la bande interdite [1,2].

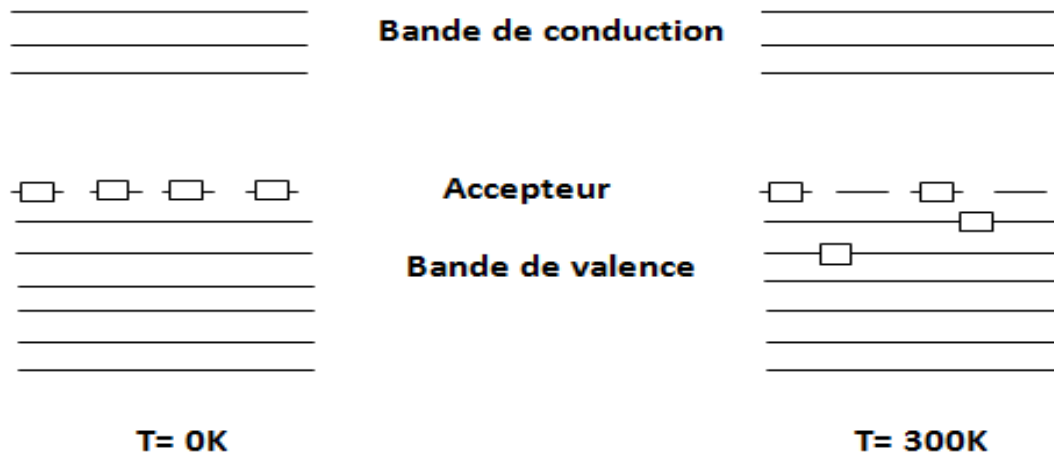


**Figure 1-6 :** Les niveaux d'énergies intermédiaires dans un semi conducteur type N [1,2]

### 2) semi-conducteur type P :

Les atomes de trivalents (accepteurs), introduisent des trous dans la bande de valence. Si on élève la température, ces trous se comportent des charges positives libres [1,2].

La figure1-7 représenté comment les impuretés introduisent des niveaux d'énergies intermédiaires dans la bande interdite [1,2].



**Figure 1-7** : Les niveaux d'énergies intermédiaires dans un semi conducteur type P[1,2]

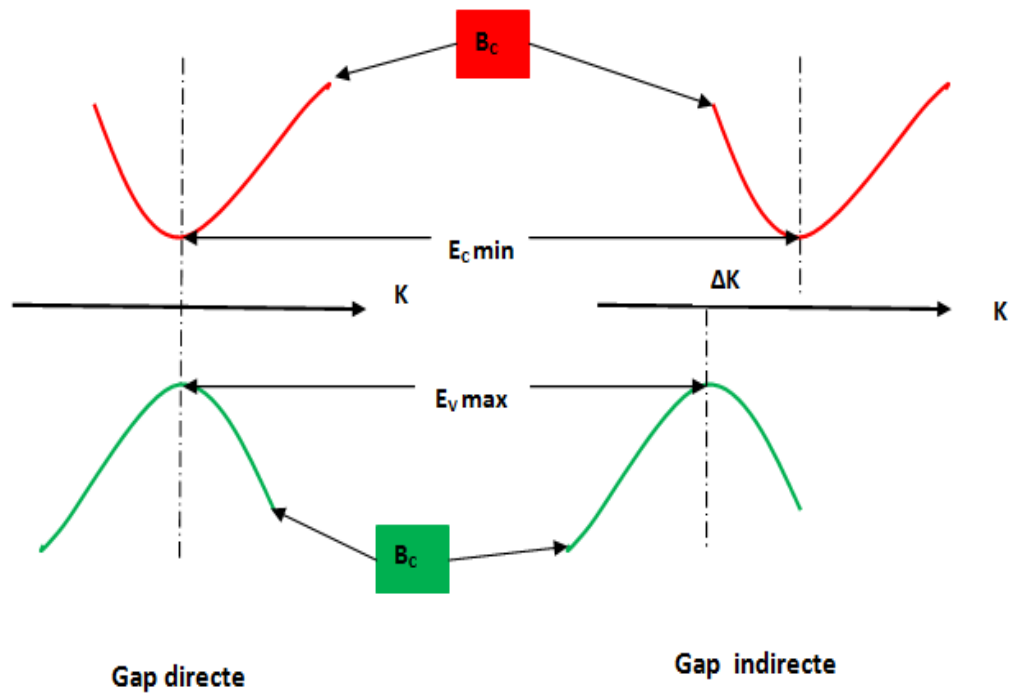
### 3) L'énergie de la bande interdite :

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

La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique et par suite dans le fonctionnement des composants optoélectroniques [7].

On distingue deux types de gap (**figure 1.8**), suivant lesquels les matériaux semi-conducteurs se divisent : à gap direct et à gap indirect.

Les semi-conducteurs à gap direct sont ceux qui ont le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sur le même point de l'espace des  $k$ , et les semi-conducteurs à gap indirect pour lesquels ces extrema sont situés aux points différents de l'espace des  $k$  [7].



**Figure I.8** Le gap direct et le gap indirect où  $\vec{k}$  est le vecteur d'onde associé à un à un électron (quantité du mouvement)  $\vec{p} = m\vec{v} = \hbar\vec{k}$ ).[7]

### 1-3/Les semi-conducteurs III-V :

Un grand nombre de semi-conducteurs ont été obtenus par combinaisons d'un élément du groupe III et d'un du group V de la classification périodique ils ont des propriétés électroniques très intéressantes.

Le tableau 1-1 représente une partie du tableau périodique (table de Mendeleïev) contenant des matériaux semi-conducteurs.

II	III	IV	V	VI
	B	C	N	
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te

**Tableau 1.1** Un extrait du tableau périodique qui présente le Placement des différents matériaux semi-conducteurs.

### 1-3-1/ Les différents composé semi-conducteurs III-V :

#### a/ Les composés III-V de base (composés binaires) :

L'étude de propriétés des composés binaires, 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.

Nous pouvons classer les alliages semi-conducteurs en plusieurs catégories : les antimoines, les arséniures, les phosphures et les nitrures des éléments : Aluminium, Gallium, Indium et Bore [2].

#### b/ Les composés ternaires et quaternaires :

Il est possible d'associer un ou deux éléments de substitution dans un matrice principale III-V, on obtient alors des composé ternaires ( $A_xB_{1-x}C$ ) ou quaternaires ( $A_yB_xC_{1-x}D_{1-y}$ ) [8].

- Les composés ternaires : lorsque les éléments binaires  $A^N B^{8-N}$  et  $A^N C^{8-N}$  sont associer, l'alliage formée peut être soit :
  - Alliage ternaire anionique :  $A^N_x B^N C^{8-N}_{1-x}$
  - Alliage ternaire cationique :  $A^N_x B^N_{1-x} C^{8-N}$
- Les composés quaternaires : ces alliages peuvent être divisés en deux classes :
  - Les solutions quadratiques : ces alliages ont la forme :  $A^N_{1-x} B^N_x C^{8-N}_y D^{8-N}_{1-x-y}$
  - Les solutions triangulaires dans cette classe, deux cas se présentent, les solutions purement anioniques  $A^N B^{8-N}_x C^{8-N}_y D^{8-N}_{1-x-y}$  et les solutions cationiques  $A^N_x B^N_y C^{8-N}_{1-x-y} D^{8-N}$

### 1-3-2/ structure cristalline :

La structure de la plupart des semi-conducteurs III-V est la même que celle de Zinc Blende. Cette structure est composée de deux interpénétrations réseau cubique face centrée, une ayant un atome de groupe III comme le Ga, et l'autre un atome de groupe V comme As. Un cristal de Zinc Blende est caractérisé par un seul paramètre « a » constante,

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

décrivant la séparation des sous réseaux des anions et des cations selon l'axe c. Ce dernier est défini comme étant la longueur de la liaison cation-anion divisée par c [11].

### **1-3-3/ Les propriétés optiques :**

Les propriétés optiques des semi-conducteurs sont initialement liées à leur structure électronique dans la mesure où elles mettent en jeu des transitions entre différents états électroniques. Ces propriétés sont généralement l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption, ces propriétés sont essentielles pour les composantes optoélectroniques car ces composantes contrôlent le mouvement de la lumière [8]. Et le fait que ces composantes sont composées de différents matériaux, la lumière a tendance à se propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. On peut alors confiner la lumière dans une couche particulière, comme dans les lasers. Cette propriété est aussi très intéressante pour les applications de cellules solaires afin d'augmenter les efficacités d'absorption de la lumière [9].

#### ***A/Indice de réfraction :***

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

$$n = \frac{c}{v} \quad 1-5$$

Il intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad 1-6$$

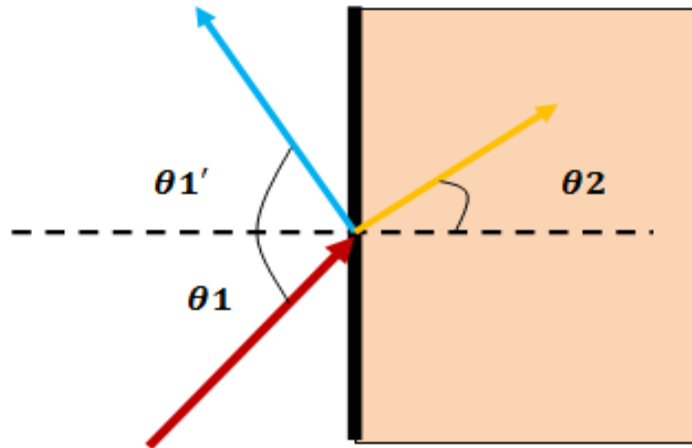
avec :

$n_1$  et  $n_2$  : Les indices de réfractifs de deux milieux.

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

La **figure 1.11** représente les chemins optiques au niveau d'un dioptre plan. Le rayon incident arrive sur le dioptre avec un angle  $\theta_1$  par rapport à la normale. Une partie du rayon est réfléchi avec le même angle, appelé  $\theta_1$ , l'autre partie du rayon est transmise avec un angle  $\theta_2$  par rapport à la normale. Dans cet exemple, on a pris  $n_1 < n_2$ , donc  $\theta_1 > \theta_2$ .





**Figure 1.11:** Schéma des chemins optiques au niveau d'un dioptre plan [10].

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 [10].

L'indice de réfraction donnée par :

$$n^2 = A + \frac{B}{1-c/\lambda^2} + \frac{D}{1-E/\lambda^2} \quad 1-7$$

avec A, B, C, D, E sont les coefficients de sellmeier [10].

### **B/ 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 [10].

La réflexion s'exprime par l'équation suivante :

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad 1-8$$

### **C/ Absorption :**

Seule la lumière absorbée est restituée sous forme d'énergie électrique. Le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il

transforme l'énergie d'un rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau [10].

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

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad 1-9$$

avec

- $\alpha(E)$  : coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon  $E$ .
- $\alpha_0$  : constante.

Pour les cellules solaires, le coefficient d'absorption est un paramètre important puisqu'il va déterminer la quantité de photons absorbés par le matériau, et donc la quantité de porteurs pouvant être produits. On choisira donc des matériaux avec de forts coefficients d'absorption pour la fabrication de cellules solaires [9].

### 1-3-4/Propriété électronique d'alliage ternaire :

L'alliage ternaire est formée de deux composés binaires  $(AB)_{1-x}$  et  $(AC)_x$ , où  $x$  désigne la composition d'alliage. La combinaison de ces deux éléments se traduit par une perturbation des atomes du réseau, et déformation de la structure et donc on aura un désordre d'alliage qui se traduit par ce qu'on appelle coefficient de courbure (**bowing**) : le gap, paramètre de maille et les masses effectives.

- **Variation de paramètre de maille** : le paramètre de maille varie linéairement selon la loi de Vegard comme suit [12] :

$$a(AB_{1-x}C_x) = (1-x)a_{(AB)} + xa_{(AC)} \quad [\text{Å}] \quad 1-10$$

- **Variation du gap d'énergie** : l'énergie de la bande interdite d'un alliage ternaire donnée par la relation suivante [12] :

$$E_g(AB_{1-x}C_x) = (1-x)E_{g(AB)} + xE_{g(AC)} - b(1-x)x \quad [\text{eV}] \quad \mathbf{1-11}$$

Où **b** est le coefficient de courbure (bowing).

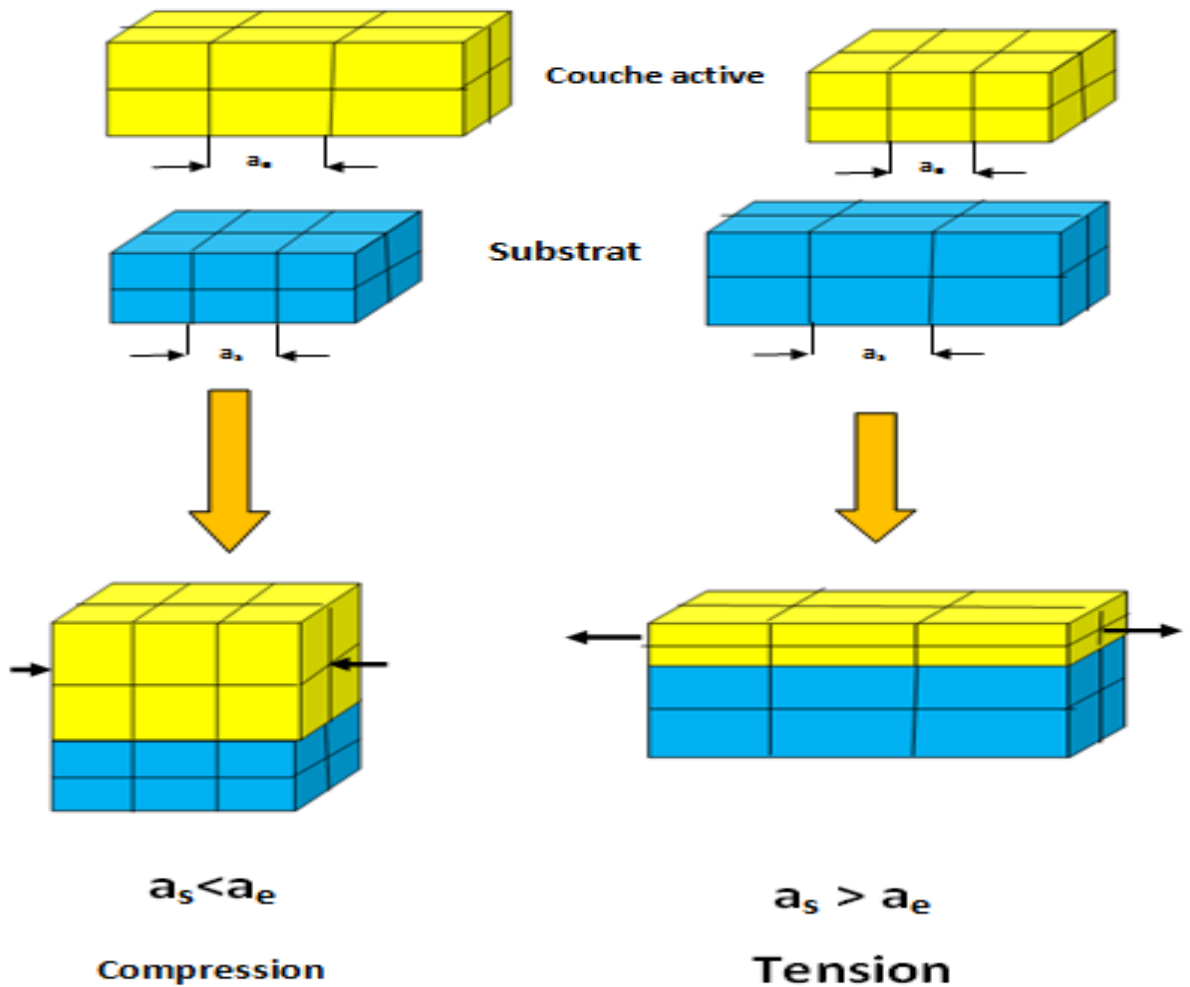
- **Variation des masses effectives** : les masses effectives d'un alliage ternaire varie avec la composition de x comme suit [12] :

$$m^*(AB_{1-x}C_x) = (1-x)m^*_{(AB)} + x m^*_{(AC)} - b'(1-x)x \quad [m_0] \quad \mathbf{1-12}$$

Où **b'** est le coefficient de courbure

### **1-3-5/ Notion de contrainte :**

Lorsqu'on fait croître un semi-conducteur sur un autre, si les deux matériaux constituant le substrat et la couche active ont des paramètres de mailles différents, évidemment ces deux matériaux doivent avoir la même structure cristalline ainsi que des paramètres de maille voisins ; la maille du matériau épitaxié se déforme de manière élastique dans les deux directions parallèle et perpendiculaire à la surface de croissance, et selon que le paramètre de la couche épitaxiale est petite ou grande que celui du substrat, la déformation est soit un rétrécissement (**Figure 1.9.a**), soit un allongement (**Figure 1.9.b**) [13].



**Figure 1-9** : Illustration des deux types de contraintes. Où :  $a_s$  est le paramètre de maille du substrat et  $a_e$  est celui de la couche épitaxie [13].

Les déformations sont données par [14] :

- Bi-axiale dans le plan de croissance :

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{(a_s - a_e)}{a_s} \quad \mathbf{1-13}$$

- Uni-axiale dans la direction de croissance :

$$\epsilon_{zz} = -2 \frac{c_{12}}{c_{11}} \epsilon_{xx} \quad \mathbf{1-14}$$

- $\epsilon$  : la déformation ou désaccord de maille.
- $a_s$  : paramètre de maille de substrat.
- $a_e$  : paramètre de maille de couche mince.
- $C_{11}$  et  $C_{12}$  : coefficient d'élasticité.

### 1-3-6 épaisseur critique :

L'épaisseur critique d'une couche mince est l'épaisseur à partir de laquelle la contrainte contenue dans la couche devient trop importante et la couche se relaxe plastiquement en créant des défauts structuraux. En dessous de cette épaisseur, la couche mince a donc le même paramètre de maille que le substrat, on dit que cette couche est pseudo-morphique. Au contraire, si l'épaisseur de la couche mince est supérieure à l'épaisseur critique, alors la contrainte contenue dans la couche est trop grande. Le matériau va se relaxer plastiquement en créant des défauts, principalement des dislocations. L'épaisseur critique dépend donc fortement du désaccord de maille entre la couche et son substrat, du procédé de croissance, et des propriétés du matériau déposé [13].

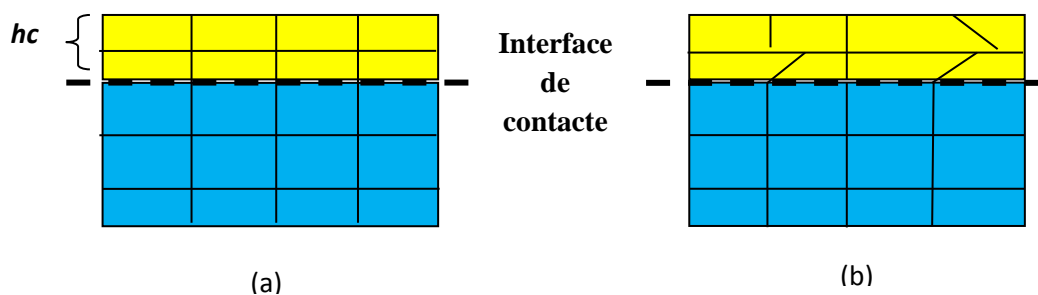


Figure 1-10 : illustration d'une couche contrainte [13]

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 (001) est donnée par l'équation suivante [14] :

$$h_c = \frac{ae}{\beta \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta} * \frac{1 - 0.25 \cdot \gamma}{1 + \gamma} * \ln \left( \frac{hc \cdot \sqrt{2}}{ae} + 1 \right) \quad \mathbf{1-15}$$

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

## **1-4 /Le photovoltaïque**

### **1-4-1/ l'énergie solaire photovoltaïque**

Le soleil peut être une solution unique à nos futurs besoins en énergie depuis presque toutes les sources d'énergie renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. La quantité d'énergie solaire atteignant la surface de la Terre est d'environ 100 000 TW. La consommation totale d'énergie primaire mondiale en 2012 est 12,476.6 millions de tonnes d'équivalent pétrole ou 145 103 TWh. Il est la source d'énergie la plus abondante et permanente du monde qui montre différents aspects en fonction de la surface de la topographie de la terre. L'énergie solaire est censée jouer un rôle très important dans les futurs besoins énergétiques mondiaux et surtout, dans les pays en développement [15].

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque.

### **1-4-2/ Spectre solaire**

#### **a) le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement de [16] :

- lumière visible de longueur d'onde comprise entre 380nm et 780 nm ;
- rayonnement infrarouge (IR) de longueur d'onde supérieure à 780nm;
- rayonnement ultraviolet (UV) de longueur d'onde inférieure à 380 nm.

Le spectre du rayonnement solaire reçu au sol est modifié par l'atmosphère à travers trois mécanismes principaux [17] :

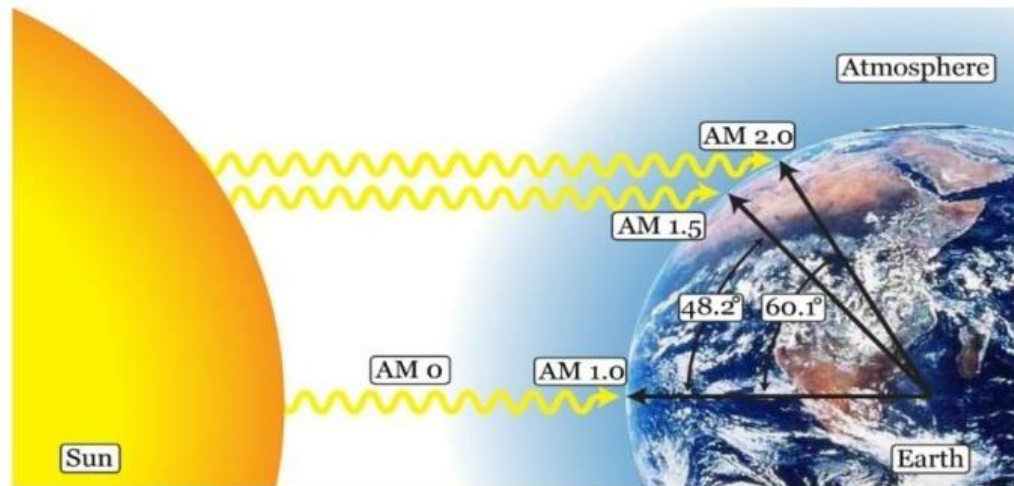
- L'absorption par les différents gaz de l'atmosphère, chacun ayant des raies caractéristiques ;
- la diffusion moléculaire de Rayleigh ;
- la diffusion par les aérosols, les poussières et les nuages.

## b) Masse d'air

On appelle "masse d'air" AM, la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire [17].

$$AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad \mathbf{1-16}$$

Avec  $\theta$  qui représente l'angle entre la position du soleil et l'horizon.



**Figure 1.11** : Schéma de la Terre et de son atmosphère montrant les paramètres AM0, AM1, AM1.5 et AM2.

## 1-4-3 / L'effet photovoltaïque

### a) Historique

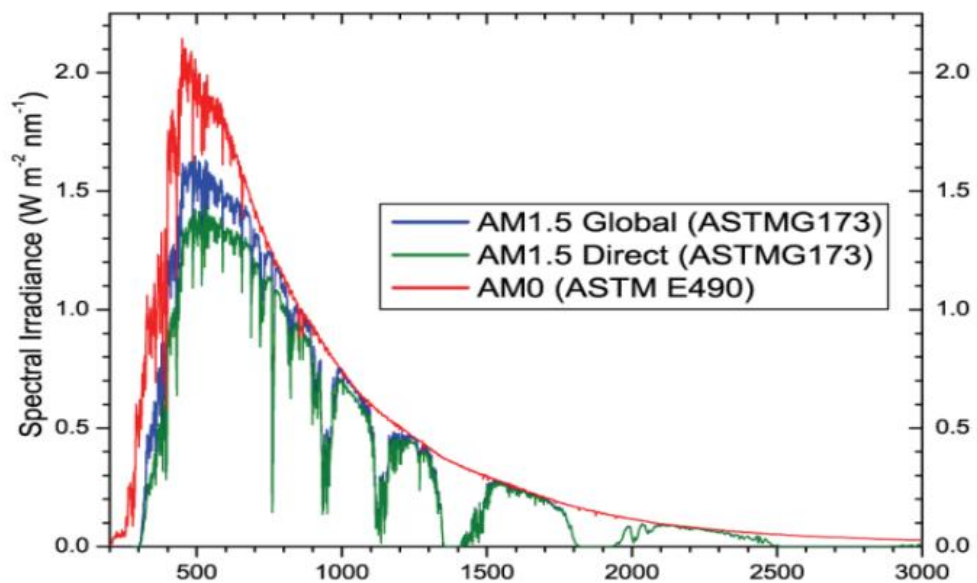
Le scientifique Edmond Becquerel, a découvert en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation [18] :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \mathbf{1-17}$$

Où :

- h : La constante de Planck.
- C : La vitesse de la lumière.
- $\lambda$  : La longueur d'onde.

Ainsi, comme il est montré sur la **figure 1.12**, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.



**Figure 1.12** Spectres solaires relevés selon la convention AM.

## **b) Principe de l'effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque est défini comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière.

Les principaux matériaux présentant l'effet photovoltaïque sont les semi-conducteurs. Ils sont caractérisés par leur gap d'énergie interdite,  $E_g$ , c'est à dire l'énergie à partir de laquelle ils deviennent absorbants et produisent de l'électricité quand ils sont éclairés par une lumière [19].

### **1-4-4 /La cellule photovoltaïque**

#### **a) Principe de fonctionnement**

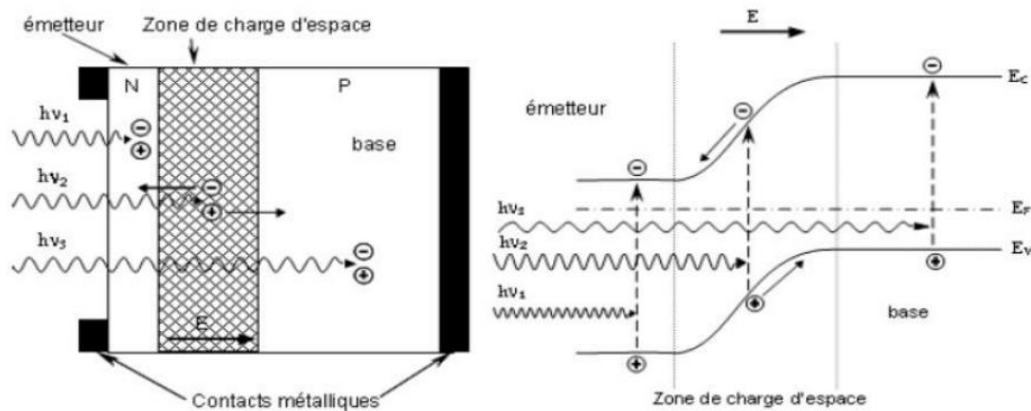
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique,
- Collecte des particules générées dans le dispositif [20].



La structure d'une cellule solaire est similaire à une jonction P-N, c'est-à-dire sur la mise en contact d'un matériau de type P avec un matériau de type N (**Figure 1.13**) [19,20].

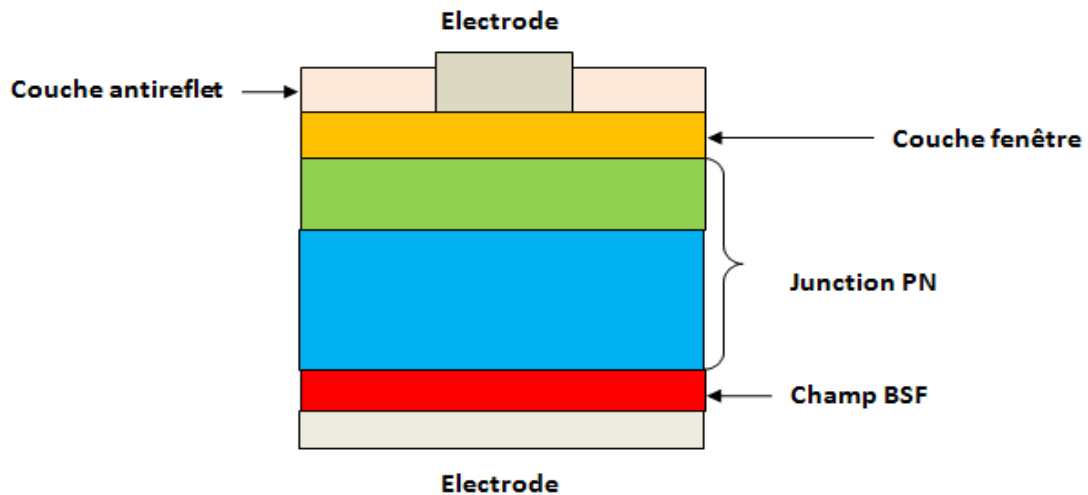
Lorsqu'un photon arrivant sur le matériau constituant la cellule solaire, et que ce photon a une énergie supérieure ou égale à  $E_g$ , il sera alors absorbé et son énergie sera transmise à un électron qui passera par la suite vers la bande de conduction. [21].



**Figure 1.13** Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule Photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées [20].

### b) Structure de la cellule solaire standard

La structure standard d'une cellule solaire généralement construit d'une Jonction PN, avec d'autres couches sont déposées autour de jonction, telle que la couche fenêtre, la couche antireflet, la couche de champ (BSF), et des électrodes métalliques [32], voire la figure 1.14 :



**Figure 1-14** : Structure d'une cellule solaire standard GaAs [32]

La jonction PN est utilisée pour mettre en place le champ électrique et la zone de charge d'espace, qui sont les clés pour aider les porteurs à photo-générer et produire l'électricité [30].

Les photons se propagent avec décroissance exponentielle dans les semi-conducteurs. En plus, la plupart des transporteurs photo-générés sont utilisés pour localiser le photo-courant dans la région de diffusion et la région de la dérive. Par conséquent, la jonction p-n doit être proche de la surface supérieure de la cellule solaire, c'est pourquoi la structure de la jonction PN est généralement conçue pour avoir une couche supérieure mince et une couche inférieure épaisse comme représenté sur la figure 1.14. En outre, puisque la mobilité des trous est nettement plus faible que la mobilité des électrons, la partie supérieure plus mince est généralement de type P et la partie inférieure plus épaisse conçue comme région de type n [32].

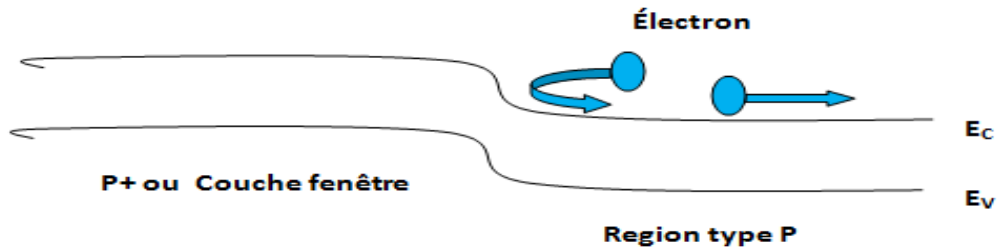
Donc les trous auront une plus courte distance de dérive, et les électrons auront une plus longue distance à la dérive.

La couche fenêtrée est principalement utilisée pour réduire la recombinaison de surface avant. Pour les matériaux qui peuvent être choisis en tant que couche fenêtrée, il y a plusieurs exigences [32]:

- devrait avoir une meilleure transmission.
- les matériaux semi-conducteurs à grand gap
- la couche doit être très mince pour réduire l'absorption de la lumière.

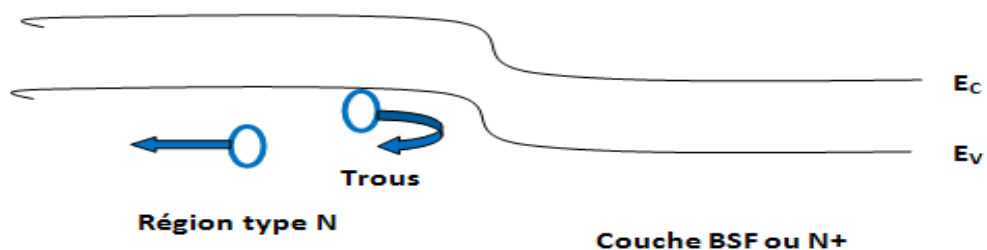
- la concentration de la couche fenêtre doit être supérieure à la concentration du région type P

La figure 1.15 représenté le diagramme des bandes d'énergie entre couche fenêtre et la couche de la région P pour nous aider à comprendre les effets positive de la couche fenêtre.



**Figure 1.15** Effet de la couche de fenêtre [34]

Dans la figure 1.15 en remarqué que la couche fenêtre à un gap d'énergie plus grand de celle de la couche de région P donc en peut le traité comme une couche P+, nous pouvons découvrir que la barrière de potentielle des électrons est construit dans la jonction entre la couche fenêtre et la couche de la région P, le champ électrique crier dans cette jonction va pousser l'électron vers la région N ce qui permet de crier le champs électrique dans la zone de charge espace. Donc on dit que la couche fenêtre aider les électrons de passer dans le bon chemin, qui peut également réduire la probabilité d'une recombinaison de surface supérieure [32].



**Figure1.16** Effet de la couche BSF [32]

L'effet de la couche BSF et similaire de celle de la couche fenêtre voire la figure 1.16 la jonction est construite en augmentant la concentration de la couche BSF. De même un champ électrique qui est la barrière de potentielle des trous est générer dans la jonction [32].

Lorsque les trous qui sont les porteurs minoritaires dans la région N la barrière de potentielle vont les pousser dans la région d'appauvrissement, après par l'aide de champ électrique dans la région d'appauvrissement ces trous seront dérivés dans la région de type P. En d'autres termes la couche BSF bloqué les porteurs minoritaire a ce diffusé dans la couche basse et les électrodes de la cellule solaire [32].

### c) Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

A l'obscurité, la cellule photovoltaïque est un dispositif redresseur. Sa caractéristique courant-tension est donnée par [22] :

$$I_{\text{obs}}(V) = I_s \left( e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad 1-18$$

avec :

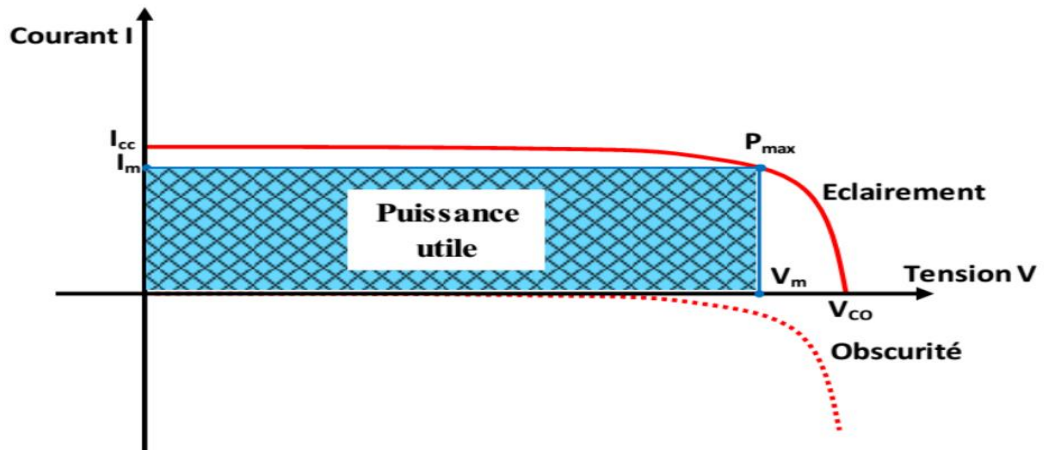
- $q$  : Charge élémentaire =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C.
- $V$  : Tension aux bornes de la jonction (V).
- $k$  : Constante de Boltzmann =  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>.
- $T$  : Température (K).
- $I_s$  : Courant de saturation inverse de la jonction p-n.
- $n$  : Coefficient d'idéalité de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

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

Sous illumination, il apparaît un courant  $I_{\text{ph}}$  qui est dû aux porteurs générés et séparés par le champ électrique interne. Si on admet la superposition des courants d'obscurité et sous illumination, alors [22]

$$I(V) = I_{\text{ph}} - I_{\text{obs}}(V) \quad 1-19$$

Il existe deux courants opposés au sein de la cellule : le courant  $I_{\text{ph}}$ , obtenu par éclairage, et le courant d'obscurité  $I_{\text{obs}}$  direct résultant de la polarisation du composant. Les caractéristiques sous obscurité et sous éclairage sont représentées sur la **Figure 1.17** [22].



**Figure 1-17:** Caractéristiques courant-tension [ $I=f(V)$ ] sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque [22].

Une cellule photovoltaïque est aussi caractérisée par un rendement de conversion  $\eta$ , une tension en circuit ouvert  $V_{OC}$ , un courant de court-circuit  $I_{CC}$  et un facteur de forme FF. Les caractéristiques courant-tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres [25].

### 1. Courant court-circuit $I_{CC}$

Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement et sans application de tension. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairé, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [25].

### 2. Tension circuit ouvert $V_{CO}$

La tension de circuit ouvert exprimée en millivolts, est mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et de la résistance Shunt. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse [26]

### 3. Facteur de forme FF

Le facteur de forme FF (fill factor), caractérise la forme de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule entre  $I_{CC}$  et  $V_{CO}$ . Il est égal au rapport de la surface du rectangle  $P_{max}$  sur celle du rectangle dont les côtés mesurent  $V_{CO}$  et  $I_{CC}$ . Il est défini par la relation suivante [24].

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{CO} * I_{CC}} = \frac{V_m * I_m}{V_{CO} * I_{CC}} \quad 1-20$$

Si on obtient une forme plutôt carrée, le facteur de forme sera élevé. Si au contraire, on a plutôt une forme triangulaire, le facteur de forme sera petit et le rendement sera donc faible [21].

#### 4. Le rendement $\eta$

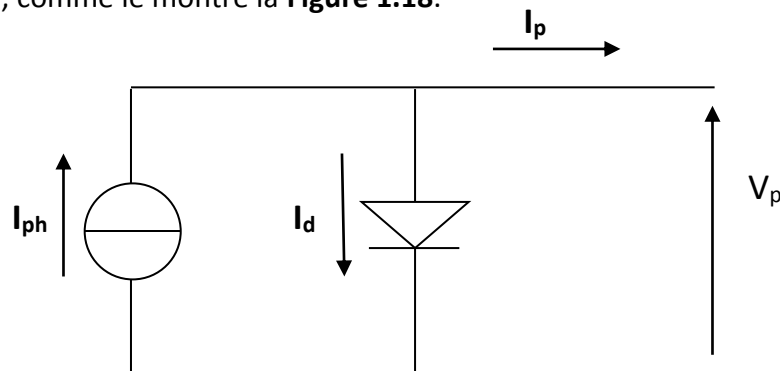
Le rendement de conversion (efficiency) exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{inc}$  [25].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = FF * \frac{V_{oc} * I_{CC}}{P_{inc}} \quad 1-21$$

Le rendement d'une cellule photovoltaïque serait d'environ 85% si chaque photon pouvait transférer toute son énergie à un électron. Ainsi, les photons avec une énergie inférieure à cette valeur ne pourront pas participer à l'effet photovoltaïque et leur énergie sera convertie en chaleur [26].

#### d) Modélisation de la cellule photovoltaïque

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire peut être représenté par une diode et un générateur de courant continu,  $I_{ph}$  (pour modéliser le courant photogénéré), comme le montre la **Figure 1.18**.

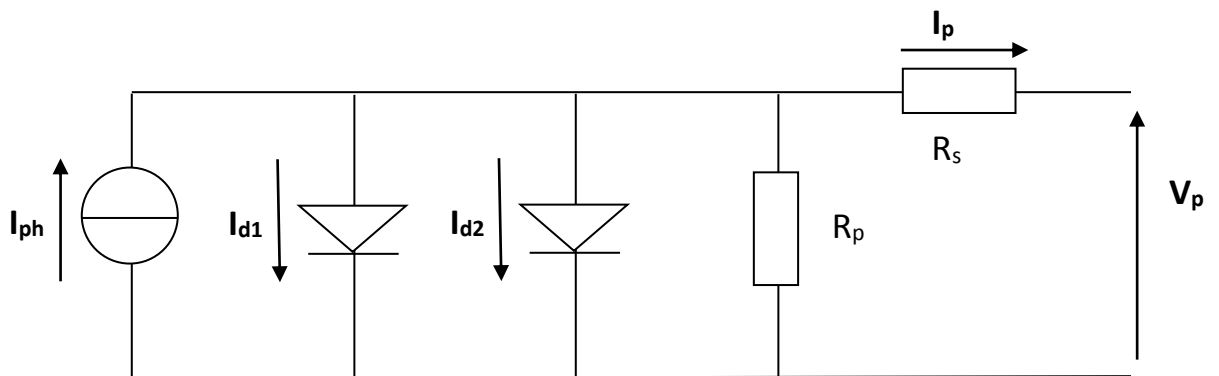


**Figure 1.18** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à jonction PN.

Avec :

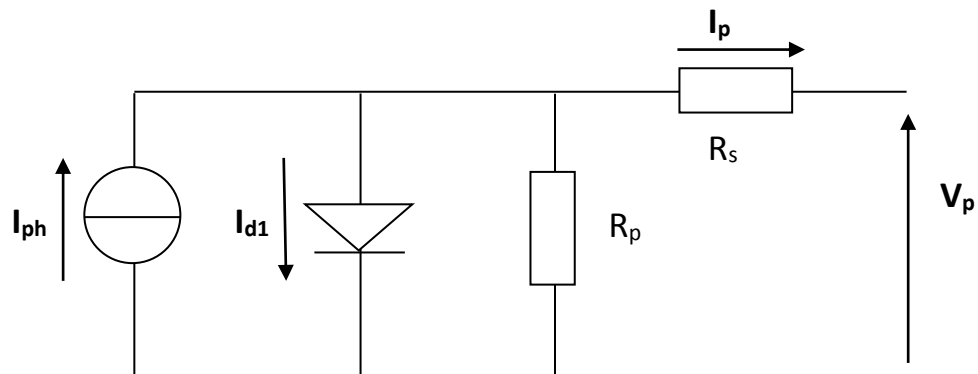
- $I_p$  : le courant total produit par la cellule [A]
- $I_d$  : le courant traversant la diode [A]
- $V_p$  : la tension délivrée par la cellule [V]

En réalité, plusieurs facteurs diminuent le rendement de conversion photovoltaïque. Premièrement, des recombinaisons électrons-trous peuvent exister dans la ZCE à cause d'états localisés dans le gap d'énergie des matériaux réduisant le courant. Ce phénomène peut se représenter par une deuxième diode en parallèle,  $I_{d2}$ . Ensuite, les contacts électriques sur chaque matériau collectant les charges ne sont pas parfaitement ohmiques. On peut modéliser ceci par une résistance, dite de série,  $R_s$ . Enfin, il existe des courants de fuite aux bords de la jonction qui peuvent être représentés par une résistance en parallèle de la diode,  $R_p$ . En intégrant tous ces paramètres, on obtient alors le circuit électrique suivant de la **Figure 1.19**[19].



**Figure 1.19** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque prenant en compte les différentes pertes, modèle à deux diodes.

Il est possible de simplifier ce schéma en supprimant la deuxième diode liée aux recombinaisons dans la ZCE et en introduisant un coefficient d'idéalité,  $\eta_{id}$  [19].



**Figure 1.20** Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode avec pertes et un coefficient d'idéalité.

On peut alors exprimer le courant  $I_p$  en fonction de la tension appliquée,  $V_p$ , de manière générale avec l'expression [19].

$$I_p(V_p) = I_s \left( e^{\frac{q(V_p + I_p R_s)}{\eta_{id} k T}} - 1 \right) + \left( \frac{V_p + R_s I_p}{R_p} \right) - I_{ph} \quad 1-22$$

avec :

- $I_s$  : Le courant de saturation [A]
- $R_s$  : La résistance série du circuit [ $\Omega$ ]
- $R_p$  : La résistance parallèle du circuit [ $\Omega$ ]
- $\eta_{id}$  : Le coefficient d'idéalité de la diode, typiquement  $\eta=1,1 - 1,5$
- $I_{ph}$  : Le courant photogénéré [A]

Pour les cellules de bonne qualité,  $R_p$  est supérieure à 10 k $\Omega$  et  $R_s$  est inférieure à 1 $\Omega$ . Si la résistance parallèle est très élevée, on peut négliger le deuxième terme de droite de l'équation précédente. A  $I_p=0$ , on peut alors exprimer simplement la tension, aussi appelée tension de circuit ouvert,  $V_{co}$

$$V_{co} = \frac{\eta_{id} k T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad 1-23$$

De ma même manière, à  $V_p=0$ , on peut déterminer le courant de court-circuit,  $I_{cc}$  [20] :

$$I_{cc} \approx -I_{ph} \quad 1-24$$

### 1-4-5 /Avantages et inconvénients

#### a) Avantages

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.



- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

#### **b) Inconvénients**

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de 10 à 15%.
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif [27].

#### **1-5 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.

Après nous avons rappelé quelques notions de base relatives au rayonnement solaire, tels que le spectre solaire, mass 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 Résultats et discussions

---

### 2-1/ Introduction

Le développement de la technologie des semi-conducteurs à base des matériaux III-V au cours de ces dernières années a révolutionné l'électronique et l'optoélectronique. Ce qui a abouti à l'apparition des structures à couches semi-conductrices très fines et de très bonne qualité (pureté) et à l'avènement de nouveaux produits (diode, transistor, circuit intégrés, diode laser à semi-conducteurs) ainsi que les nanostructures (puits, et boîtes quantiques).

La recherche sur les matériaux semi-conducteurs a commencé au début du 19<sup>ème</sup> siècle.

Au fil des années de nombreux semi-conducteurs ont été étudiés. Parmi les plus célèbres, nous trouvons le silicium (Si) et le germanium (Ge) de la colonne IV du tableau périodique. Ces deux semi-conducteurs sont composés d'atomes identiques, mais d'autres, comme l'arséniure d'indium InAs (III-V) sont composés d'atomes d'éléments différents : In (III) et As (V). La composition de semi-conducteurs permet d'accéder à des propriétés électriques et optiques que n'ont pas les semi-conducteurs purs.

Dans ce chapitre nous allons étudier les paramètres électroniques et optiques d'InAsSb/GaAs, par la suite nous allons voir la simulation numérique qui doit comporter les différents paramètres concernant les cellules photovoltaïques à base d'InAsSb/GaAs. L'efficacité quantique externe, caractéristique courant-tension, puissance...) et l'effet des boîtes quantiques sur cette structure.

## 2-2/ Description de InAsSb :

Ce deuxième chapitre présente le matériau d'antimoine d'arséniure d'indium qui est le centre de ce travail. Ce matériau est un semi-conducteur III-V, qui est composé de deux matériaux binaires l'arséniure d'indium(InAs) et l'antimoine d'indium(InSb). C'est pourquoi, nous allons principalement décrire dans ce chapitre les propriétés structurelles, électronique et optique d'InAsSb.

Dans notre cas l'alliage est anionique parce que l'indium est du colon III de la table périodique, l'arséniure et l'antimoine du colon V voir la table suivante :

II	III	IV	V	VI
	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	
	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>
<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>

**Tableau 2.1** Un extrait du tableau périodique qui présente le Placement des différents matériaux semi-conducteurs.

## 2-3/Propriété électronique d'alliage InAsSb :

### 2-3-1/ Etude de la contrainte :

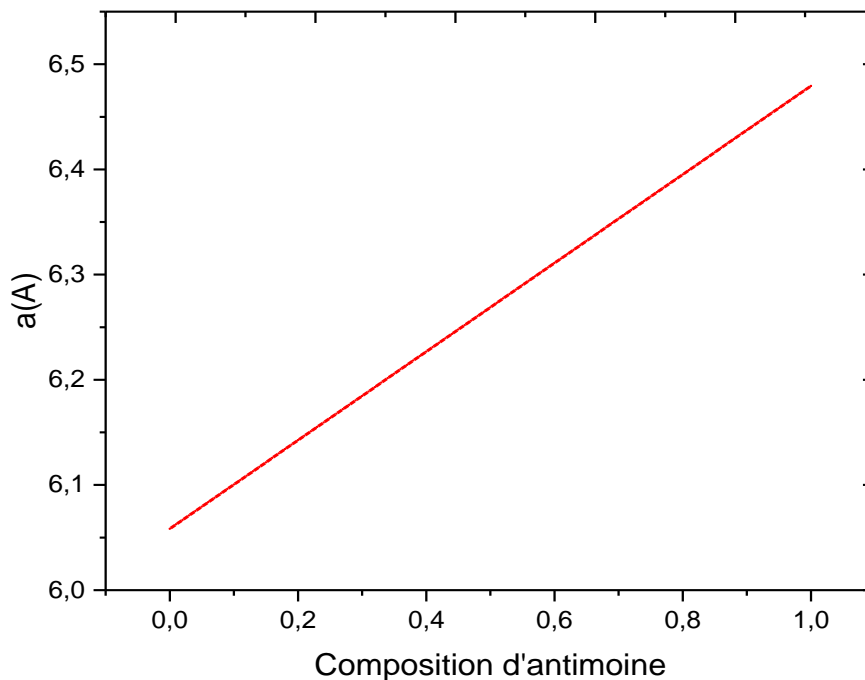
L'étude de la contrainte est essentielle et complémentaire à celle de la structure de bande. En effet, l'alliage utilisé doit être accordé en maille avec le substrat.

#### a- variation de paramètre de maille (InAsSb)

Par l'utilisation de la loi **de Vegard** et le paramètre de maille  $a_{\text{InAs}}=6,0583 \text{ \AA}$  et le paramètre de maille  $a_{\text{InSb}}=6,4794 \text{ \AA}$  on a la relation suivante :

$$a(\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x) = 6.0583 + 0.4211x \text{ [\AA]} \quad 2-1$$

Cette variation est illustrée sur la figure 2.1:



**Figure 2.1:** Variation du paramètre de maille d'InAsSb en fonction de la composition Sb

La figure 2.1 montre l'évolution du paramètre de maille  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  en fonction de la composition d'antimoine. On remarque que lorsque la composition d'antimoine augmente provoque l'augmentation de paramètre de maille, par exemple lorsque on prend les compositions 10% et 40% le paramètre de maille augmente de  $6.1(\text{Å})$  à  $6.226(\text{Å})$ .

#### **b- Déformation bi-axiale et uni-axiale :**

Comme nous avons dit précédemment l'épitaxie d'InAsSb sur GaAs se traduit par une déformation de la maille du couche mince InAsSb, dans notre cas le paramètre de maille de la couche mince inférieure de celle de substrat ( $a_{\text{InAsSb}} > a_{\text{GaAs}}$ ), donc on a une compression de la couche mince, cette déformation elle sur deux forme une déformation Bi-axiale et une déformation uni-axiale.

Les déformations sont données par:

- Bi-axiale dans le plan de croissance :

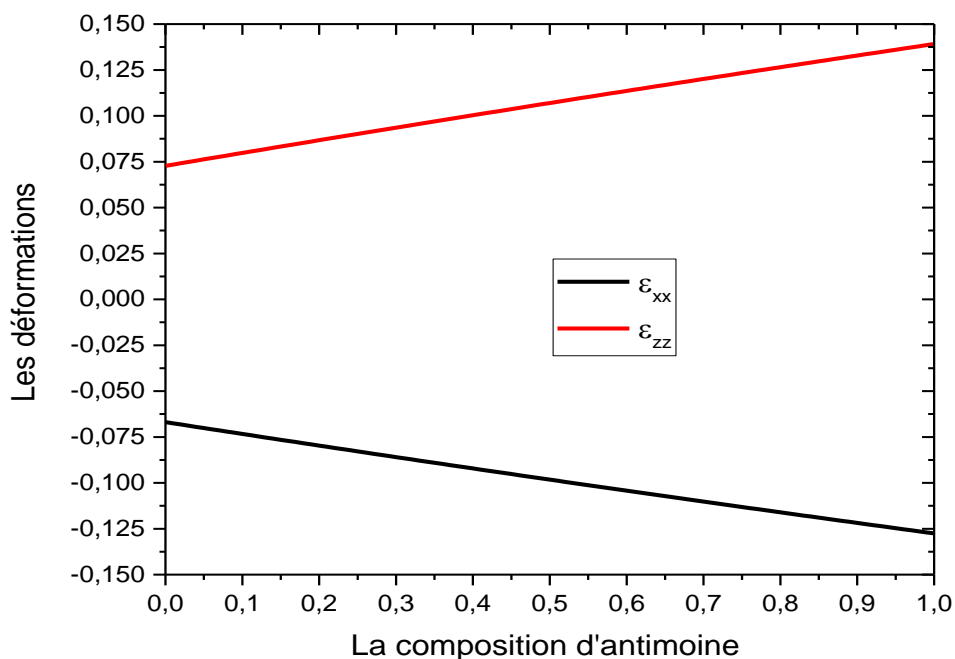
$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{(a_{\text{GaAs}} - a_{\text{InAsSb}})}{a_{\text{InAsSb}}} \quad \mathbf{2-2}$$

- Uni-axiale dans la direction de croissance :

$$\varepsilon_{zz} = -2 \frac{c_{12}}{c_{11}} \varepsilon_{xx} \quad \mathbf{2-3}$$

avec :

- $\varepsilon$  : la déformation ou désaccord de maille.
- $a_{\text{GaAs}}$  : paramètre de maille de substrat.
- $a_{\text{InAsSb}}$  : paramètre de maille de couche mince.
- $C_{11}$  et  $C_{12}$  : coefficient d'élasticité.

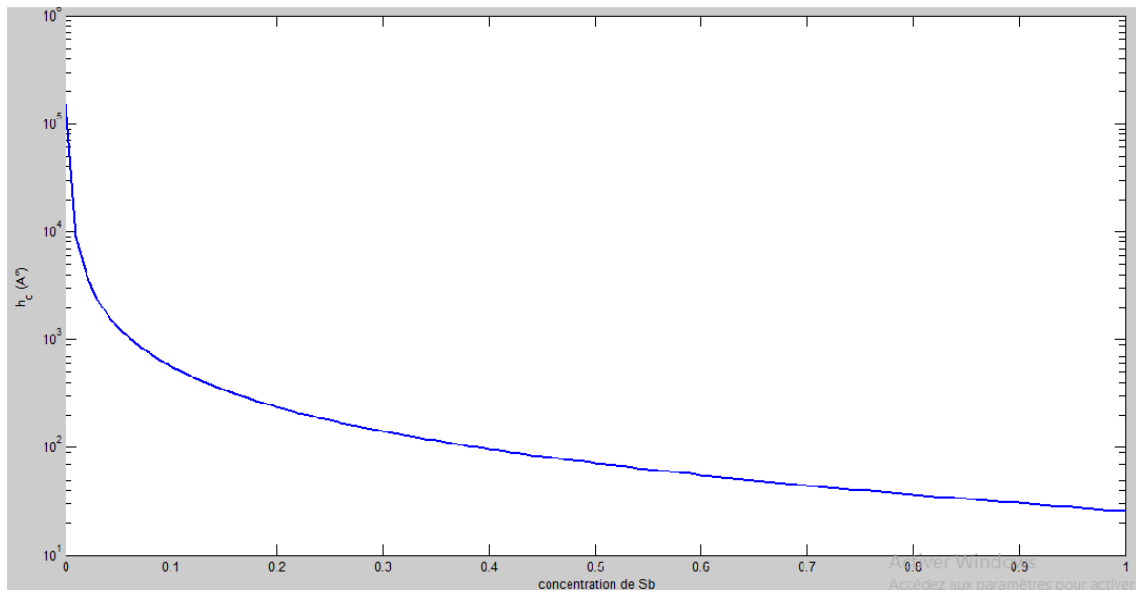


**Figure 2.2:** Variation de la déformation Bi-axiale et Uni-axiale d'InAsSb en fonction de la composition d'antimoine

La figure 2.2 montre la variation des déformations en fonction de la concentration d'antimoine. On remarque que la déformation bi-axiale diminue avec l'augmentation de la concentration d'antimoine, par exemple si on prend les valeurs  $x=0.1$  et  $x=0.3$  la valeur de la contrainte bi-axiale diminue de -7% à -8.5%. Par contre la déformation uni-axiale augmente avec l'augmentation de la concentration d'antimoine, par exemple si on prend les valeurs  $x=0.1$  et  $x=0.3$  la valeur de la contrainte uni-axiale augmente de 7% à 8.5%.

On constate que l'augmentation de composition d'antimoine est un facteur important pour déterminer la valeur de déformation, et nous savons que si la contrainte est petite on aurait une bonne adaptation de la couche mince sur le substrat, donc dans notre cas la meilleure concentration d'antimoine est autour de 10%.

**c- épaisseur critique :**



**Figure 2.3:** la variation de l'épaisseur critique en fonction de la composition d'antimoine

La figure 2.3 montre la variation de l'épaisseur critique en fonction de la composition d'antimoine. On remarque que la valeur d'épaisseur critique diminue exponentiellement avec l'augmentation de la composition d'antimoine, par exemple si on prend les valeurs  $x=0.1$  et  $x=0.3$  la valeur de l'épaisseur critique diminue de 55 nm à 20 nm.

Nous avons déterminé l'épaisseur critique de l'InAsSb avec 20% d'antimoine sur GaAs, dans nos conditions de croissance, à environ 23nm.

**2-3-2/Les masses effectives :**

Puisque nous sommes intéressés à la fondamentale et spin orbite des lacunes de la bandes de séparations au centre de Zone Brillouin. Les masses effectives de bande de conduction et de valence sont calculé selon les équations 2-6:

alors :

$$m_e^* = 0.022(1 - x) + 0.010x - 0.035(1 - x)x \quad [m_0]$$

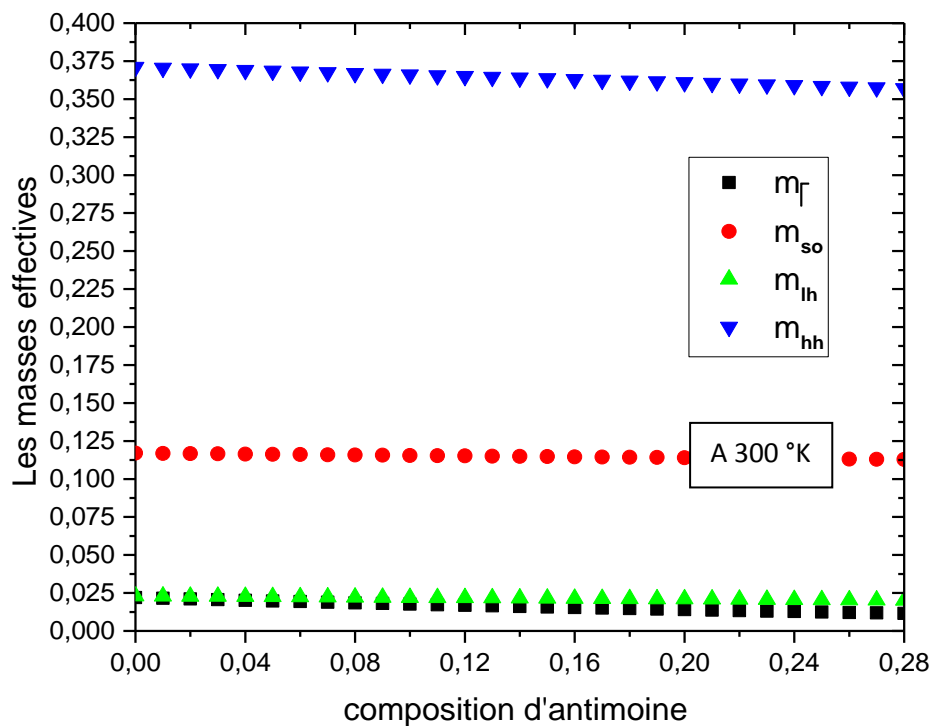
$$m_{so}^* = 0.117(1 - x) + 0.102x \quad [m_0]$$

$$m_{lh}^* = 0.023(1 - x) + 0.013x \quad [m_0]$$

$$m_{hh}^* = 0.371(1 - x) + 0.321x \quad [m_0]$$

2-6

La figure 2-4 représente la variation des masses effective en fonction de la composition d'antimoine. On a remarqué que lorsque la concentration d'antimoine augmente les paramètres des masses effective dans la bande de conduction et la bande de valence diminue, par exemple si la masse effective d'électron lorsque  $x=0.1$  est  $m_e^*=0.02m_0^*$  et lorsque  $x=0.2$ ,  $m_e^*=0.012m_0^*$ .



**Figure 2.4:** Variation des masses effectives en fonction de la composition d'antimoine

### 2-3-3/ Le gap d'énergie :

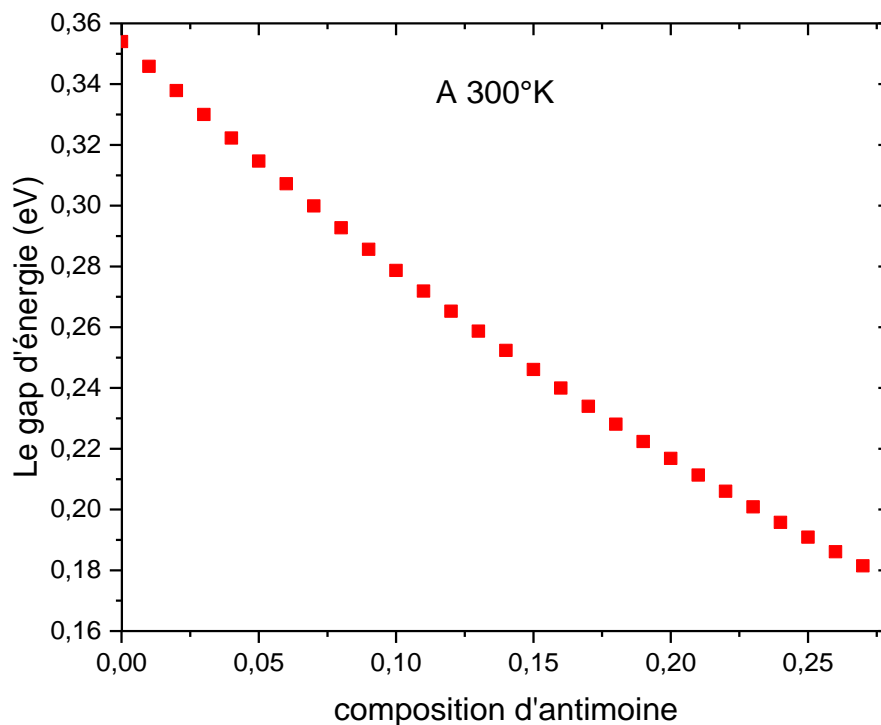
#### A - le gap d'énergie non contraint

Pour calculer le gap d'énergie non contraint d'InAsSb on utilise la loi de Vegard cité dans le chapitre 1 est les gaps d'énergie d'InAs et d'InSb à 300K on obtient la relation suivante :

$$Eg(\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x) = 0.354 - 0.82x - 0.67(1 - x)x \quad 2-12.$$

La figure 2.3 montre Evolution de l'énergie du gap non contraint avec éclatement en fonction de la variation d'antimoine. On remarque que l'augmentation de la concentration d'antimoine provoque la diminution de la bande interdite d'InAsSb. Par exemple si on prend les valeurs  $x=0.05$  et  $x=0.15$  la valeur de la bande interdite d'InAsSb diminue de 0.31 eV à 0.25 eV.

Donc on peut dire que l'incorporation de l'antimoine joue un rôle très important sur la réduction de la bande interdite gap.



*Figure 2.5: Evolution de l'énergie du gap non contraint avec éclatement en fonction de la variation d'antimoine.*



## B - Les décalages énergétiques des bandes

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 [28] :

$$\Delta E_{v, moy}^{hy} = a_v(2\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) \quad 2-7$$

$$\Delta E_c^{hy} = a_c(2\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) \quad 2-8$$

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

Les décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement pour chacune des bandes constituant la bande de valence sont les suivants [28]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta E_{hh}^{Sh} = -\frac{1}{2}\delta E^{Sh} \\ \Delta E_{ih}^{Sh} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{Sh} + \frac{1}{2}\left[\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{Sh} + \frac{9}{4}(\delta E^{Sh})^2\right]^{1/2} \\ \Delta E_{so}^{Sh} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{Sh} - \frac{1}{2}\left[\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{Sh} + \frac{9}{4}(\delta E^{Sh})^2\right]^{1/2} \end{array} \right. \quad 2-9$$

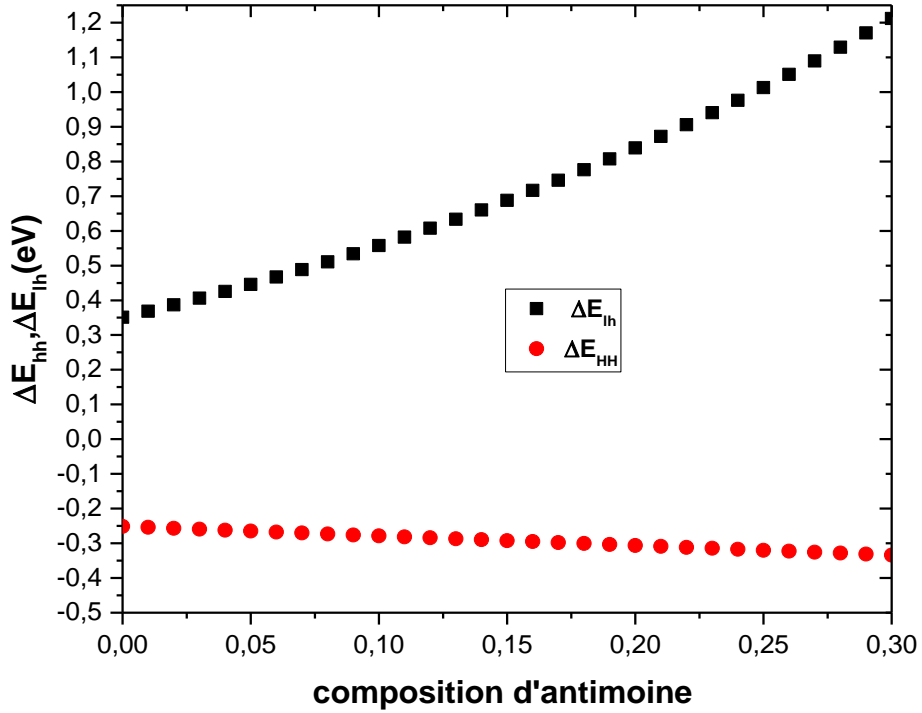
Avec :

$$\delta E^{Sh} = 2 * B * (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz}) \quad 2.10$$

Où B est le potentiel de déformation tétragonale

Les résultats de simulation que nous avons obtenus sont représentés dans la **figure 2.6** qui décrit l'évolution des décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement en fonction de fraction et d'antimoine. On constate que :

Le décalage de la bande des trous lourds diminue avec l'incorporation d'antimoine, par exemple si on prend les valeurs  $x=0.1$  et  $x=0.2$  Le décalage de la bande des trous lourds diminue de 0.34eV à 0.336eV. Par contre celle la de la bande des trous légers augmente, c'est en prendre les mêmes compositions précédente la bande des trous légers croitre de 0.55eV à 0.8eV.



**Figure 2.6** : décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement pour chacune des bandes constituant la bande de valence en fonction des concentrations d'antimoine.

### C - Le gap contraint avec éclatement :

En utilisant les lois précédentes (2-7, 2-8 et 2-9) et comme référence le centre de gravité la bande de valence  $E_{v,moy} = [E_{hh} + E_{lh} + \Delta_0]/3$  se trouve par conséquent à au-dessous du haut de la bande de valence en  $k=0$ .

- L'énergie  $E_v$  du haut de la bande de valence :

$$E_v = E_{V,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_{V,moy}^{hy} + \max(\Delta E_{hh}^{sh}, \Delta E_{lh}^{sh}) \quad 2-11$$

- L'énergie  $E_c$  du bas de la bande de conduction :

$$E_c = E_{V,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_g^{ncont} + \Delta E_c^{hy} \quad 2-12$$

Dans ces expressions l'énergie de gap, l'éclatement de spin-orbite et  $E_{v,moy}$  sont relatifs au matériau non contraint. Les expressions 2.10 et 2.11 conduisent naturellement à l'expression du gap contraint.

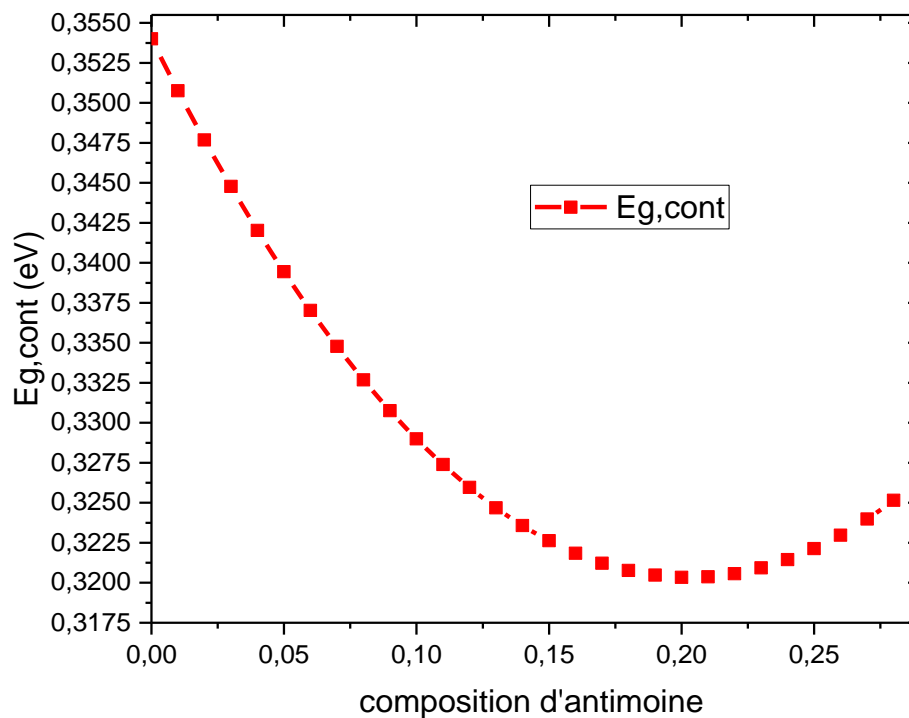
$$E_g^{cont} = E_c - E_v = E_g^{ncont} + \Delta E_c^{hy} - \Delta E_{V,moy}^{hy} - \max(\Delta E_{hh}^{sh}, \Delta E_{lh}^{sh}) \quad 2-13$$

Pour notre cas en a l'état de compression :

$$E_g^{cont} = E_g^{ncont} + \Delta E_c^{hy} - \Delta E_{V,moy}^{hy} - \Delta E_{hh}^{sh} \quad 2-14$$

On voit que la détermination du gap contraint nécessite la connaissance du gap  $E_g$  et de l'éclatement spin-orbite, des constantes élastiques  $C_{ij}$  de la couche, des potentiels de déformation hydrostatique  $a_c$  et  $a_v$ , ainsi que du potentiel de déformation tétragonale  $B$ . Ces paramètres sont répertoriés en annexe pour les composés III-V binaires.

La figure 2-7 représente la variation de gap contraint en fonction de la composition d'antimoine, d'après les résultats on remarque que le Gap d'énergie diminue avec l'augmentation de la composition d'antimoine  $x = [0, 0.20]$  hors de ce intervalle en remarque que le gap augmente



**Figure 2.7** : le gap d'énergie contraint en fonction de la composition d'antimoine.

## 2-4/Propriétés optiques

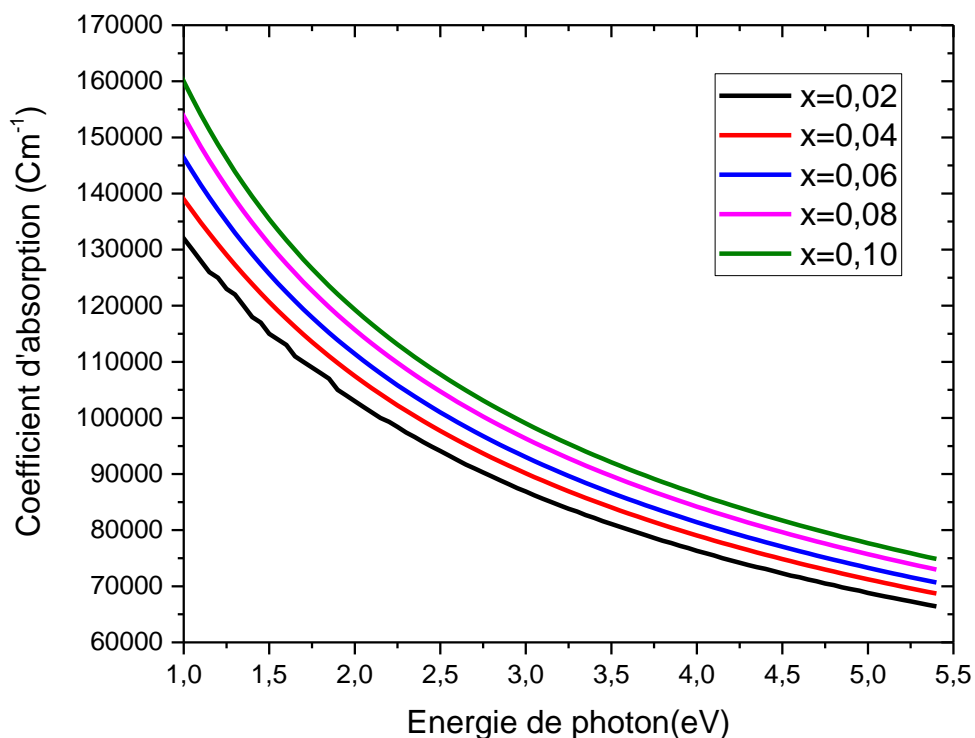
### A/ Coefficient d'absorption :

Sur la figure 2-8, nous avons représenté la variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de l'énergie des photons incidents pour différents valeurs de la concentration d'antimoine.

D'après la figure 2-8 on remarque que :

- Le coefficient d'absorption diminue avec l'énergie de photon, par exemple lorsque la composition d'antimoine égale à 10% on a une diminution de  $1.6 \cdot 10^5$  à  $7.5 \cdot 10^4$  pour des énergies de photon varie entre 1eV à 5.4eV.
- Le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation de la composition d'antimoine, par exemple pour une énergie de photon égale à 1 on a une augmentation de coefficient d'absorption de  $1.32 \cdot 10^5$  à  $1.6 \cdot 10^5$  pour des différentes concentrations d'antimoine.

Donc d'après ces remarques on constate que la diminution du gap provoque l'augmentation du coefficient d'absorption.

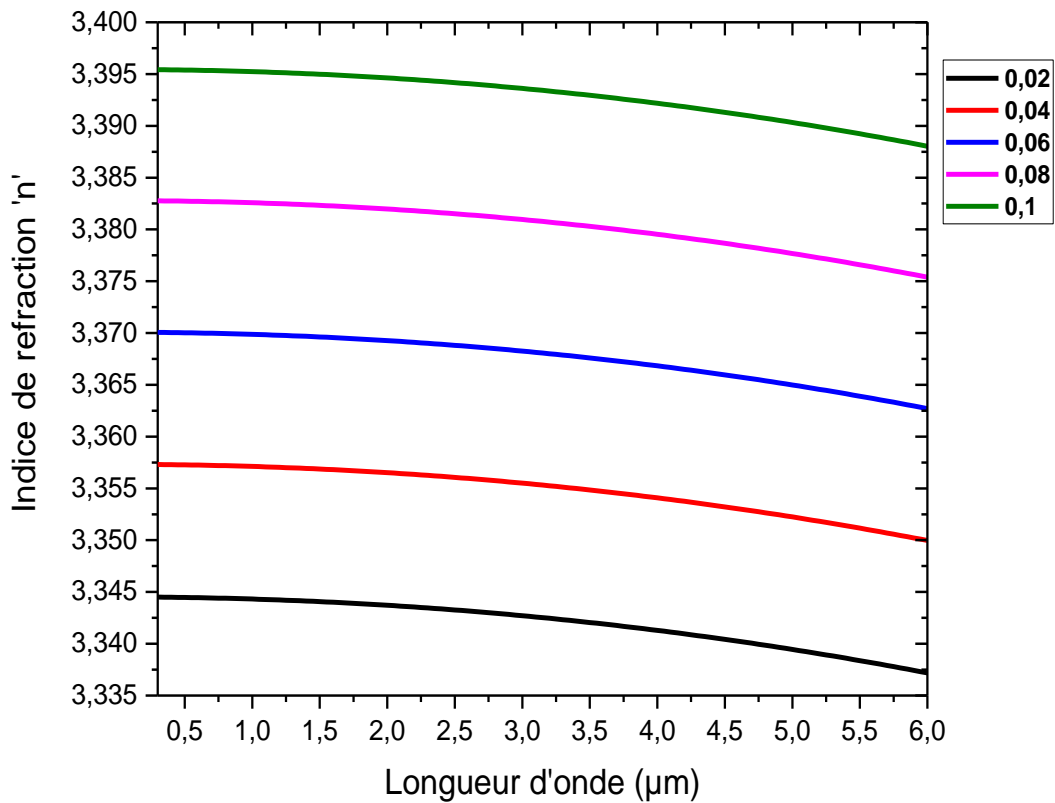


**Figure 2.8** Variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de l'énergie de photon

## B/Indice de réfraction :

La figure 2.9 représente la variation de l'indice de réfraction  $n$  en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de la concentration d'antimoine d'après la figure en constate que :

- l'indice de réfraction diminue avec la longueur d'onde par exemple lorsque la concentration d'antimoine égale a 8 % l'indice de réfraction diminue de 3.383 à 3.378 lorsque  $\lambda$  varie entre 0.2 $\mu\text{m}$  et 6  $\mu\text{m}$ .
- l'indice de réfraction augmente avec la composition d'antimoine pour une longueur d'onde donnée, par exemple lorsque  $\lambda=0.3 \mu\text{m}$   $n$  augmente de 3.344 à 3.396 lorsque  $x$  varie entre 0.02 et 0.1.



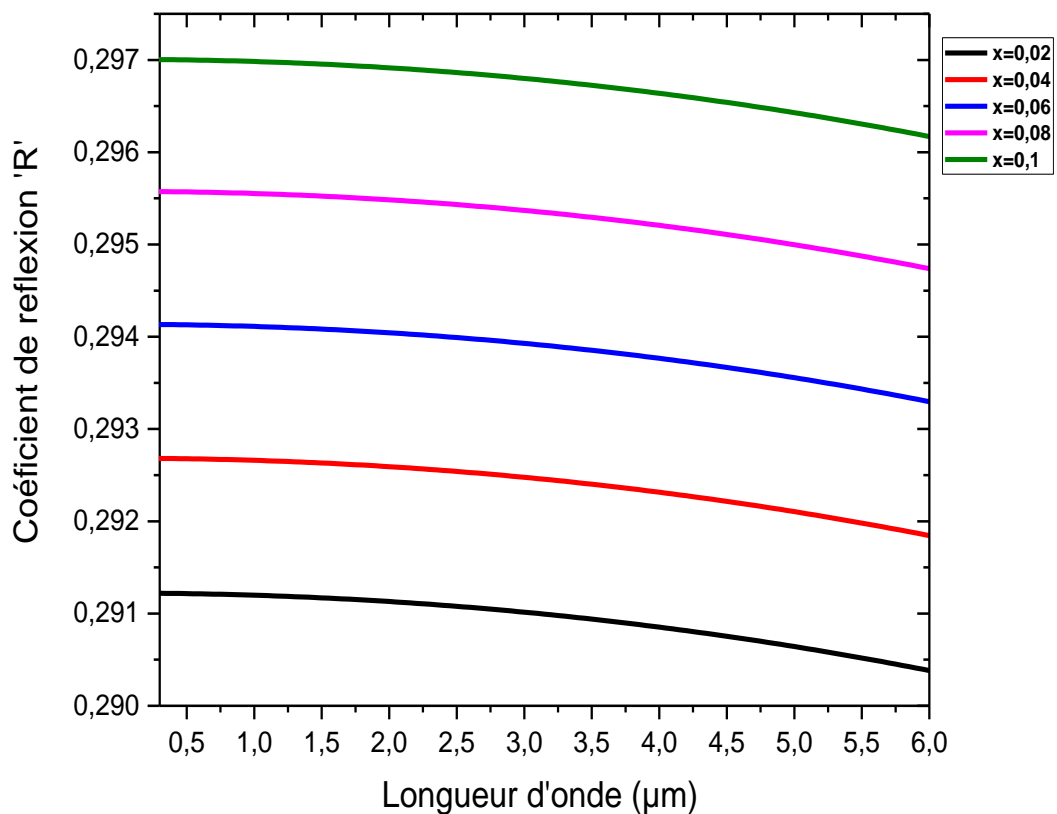
**Figure 2.9** Variation indice de réfractons  $n$  en fonction de la longueur d'onde

### C/ Coefficient de réflexion :

La figure 2.10 présente la variation du coefficient de réflexion R en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de la concentration d'antimoine.

D'après cette figure on a remarqué que l'accroissement de la longueur d'onde provoque la diminution du coefficient de réflexion. Par exemple lorsqu'en prend le cas ou la composition d'antimoine égale à 10% la valeur de coefficient de réflexion diminue de 0.297 à 0.2962 lorsque la longueur d'onde varie entre 0.2 $\mu\text{m}$  à 6  $\mu\text{m}$ .

Ce coefficient augmente avec la composition d'antimoine pour une longueur d'onde donnée, par exemple lorsque  $\lambda=0.3 \mu\text{m}$  R augmente de 0.2912 à 0.297 lorsque x varie entre 0.02 et 0.1.  $\Delta R = 0.0058$



**Figure 2-10** Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde

## **Conclusion :**

D'après les résultats de 2.3 et 2.4 en conclure que l'InAsSb a un bon fonctionnement lorsque la composition d'antimoine égale à 10% car

- la couche d'InAsSb elle adapté ou substrat de GaAs lorsque la composition d'antimoine serai inferieure à 12 %.
- Le gap d'énergie de ce martiaux et très petit a celle de GaAs qui donne un bon confinement pour piégé l'électron dans la boite quantique.
- Le coefficient d'absorption et très grand dans a cette composition

Donc dans la partie suivante nous allons étudier les différents paramètres de la cellule solaire lorsque la composition d'antimoine égale à 10%.

## **2.5 Différents paramètres de la cellule photovoltaïque pour l'InAsSb :**

Les boîtes quantiques semi-conductrices sont des inclusions nanométriques tri-dimensionnelles d'un matériau de faible gap dans un autre matériau (la matrice) de gap plus élevé. (Voire l'annexe A).

Nous avons fixé le nombre de boites quantique (4 boites dans une couche) utilisant le modèle de Dr. Bailey (voire l'annexe A) et on a varié le nombre de couches (10, 20 et 30 couches).

La figure 2.11 montre la forme de cellule solaire à base d'InAsSb/GaAs pour 10 couches a BQs elle est comme la cellule solaire GaAs PIN mais dans la région intrinsèque on a insérer des périodes des couches (BQs d'InAsSb et des barrières de GaAs)

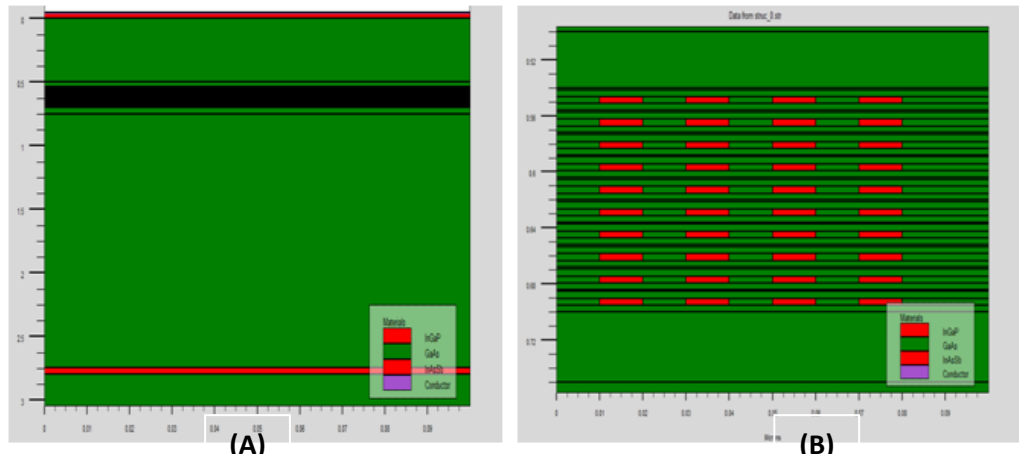


Figure 2-11 : la structure de la cellule solaire a base d'InAsSb/GaAs (10 couches BQs )

## 2-5-1 Caractéristiques courant-tension

### A. Caractéristiques I(V) de la cellule solaire sans boîtes quantiques

La figure 2.12 représente les caractéristique courant-tension de notre simulation. Le modèle marche par les standards conditions de calibration d'une cellule photovoltaïque (T=300 K, AM1.5g). La cellule solaire GaAs PIN délivré un courant de court circuit égale à 19.00 (mA/Cm<sup>2</sup>) et un rendement de 12.61%.

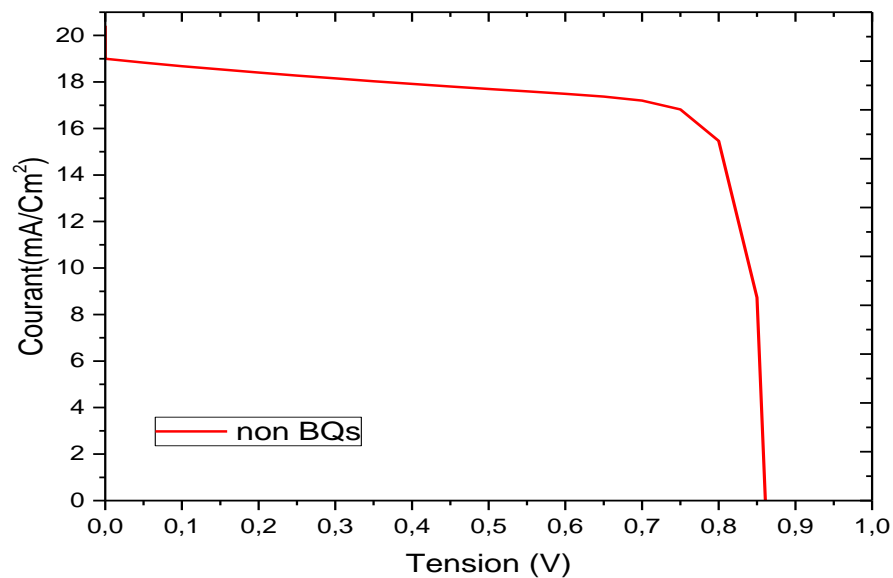


Figure 2.12 Caractéristiques courant-tension de la structure GaAS PIN.



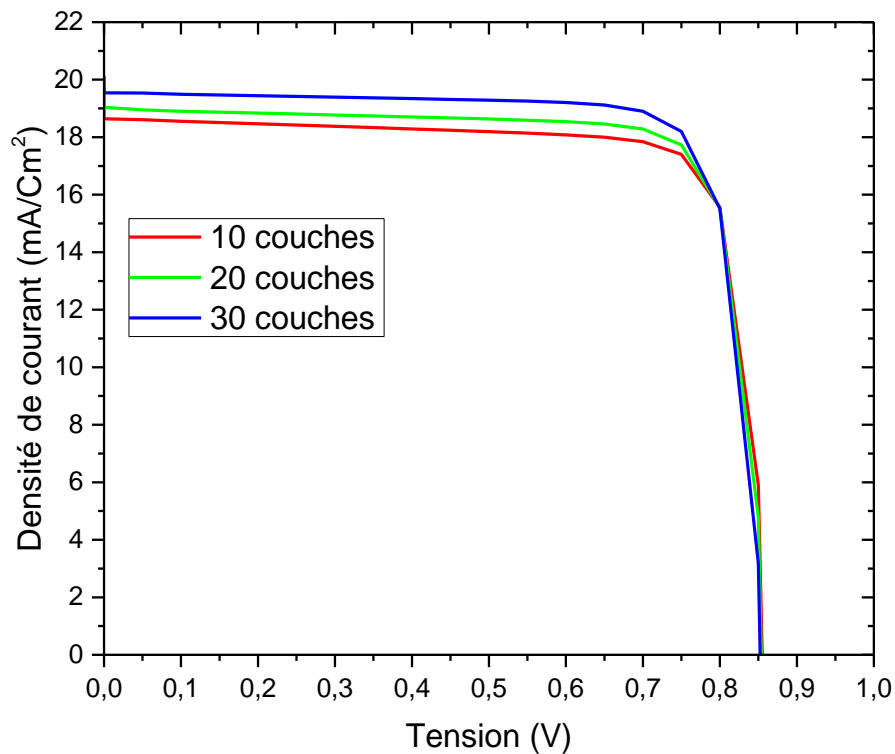
Le tableau 2.2 présente les différents paramètres de la cellule solaire sans boîtes quantiques.

<b>Jcc (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>19</b>
<b>Voc (Volt)</b>	<b>0.861</b>
<b>FF (%)</b>	<b>71.77</b>
<b>eff (%)</b>	<b>12.61</b>

**Tableau 2.2** différents paramètres de la cellule solaire sans BQs

### B. Caractéristiques I(V) de la cellule solaire avec boîtes quantiques

La figure 2.13 montre les caractéristiques I(V) de semi conducteur à base des boites quantiques pour des différentes couches : 10 ,20 et 30 couches. A partie de ce graph en remarque que le courant de court circuit augmente avec la croissance de nombre de couche, par exemple si on prend pour 10 couches  $J_{cc}=18.75$ , et pour des 20 couches  $J_{cc}=19.03$ . par contre la tension de circuit ouvert diminue avec la croissance de nombre des couches, par exemple si en prend 10 couches on  $V_{co}=8.55$  V et pour 30 coches  $V_{co}=0.8523$ V.



**Figure 2.13** Caractéristiques courant-tension de la structure  $\text{InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$  pour différentes couches BQs.

Les figures 2.12 et 2.13 résume les caractéristiques courant-tension des cellules solaires.

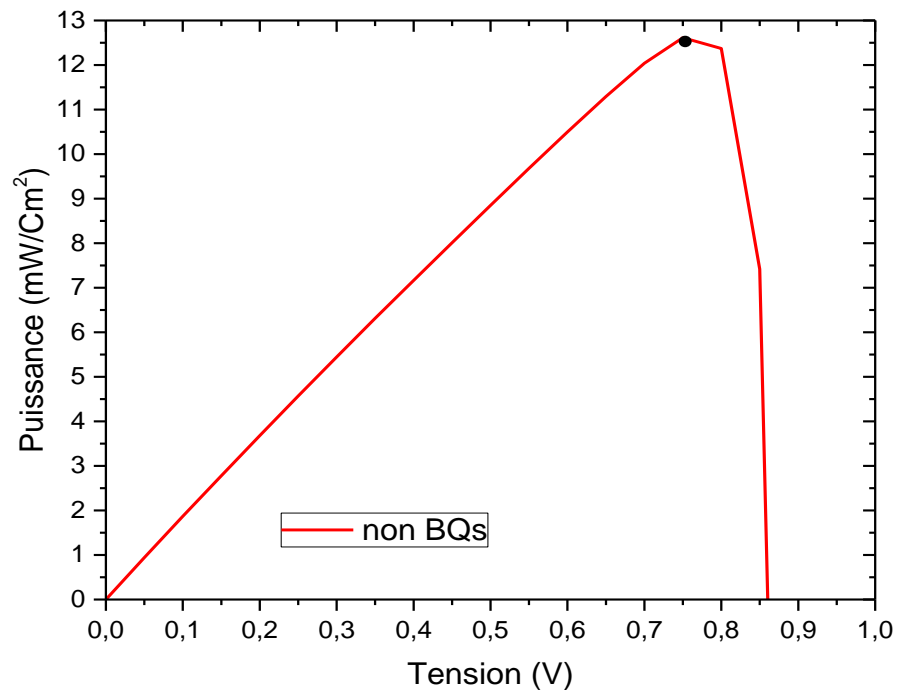
A partir de ces deux résultats, nous pouvons extraire quelques remarques :

- La densité de courant ce diminue lorsque en insérer 10 couche de BQs, mais lorsque on ajoute 20 couche et 30 couches cette densité sera augmenté de 19.03 a 19.55 (mA/Cm<sup>2</sup>).
- La tension de court circuit diminue de 0.861 à 0.8523 (V) avec la variation des couches de boites quantiques.

## 2.5.2 Puissance et puissance maximal délivrée

### A. Puissance et puissance maximal sans boîtes quantiques

La figure 2.14 représente la variation de la puissance délivrée en fonction de la tension pour une concentration d'antimoine  $x=0.1$ . Cette courbe montre la puissance maximale  $P_{max}=12.61$  (mW /cm<sup>2</sup>).



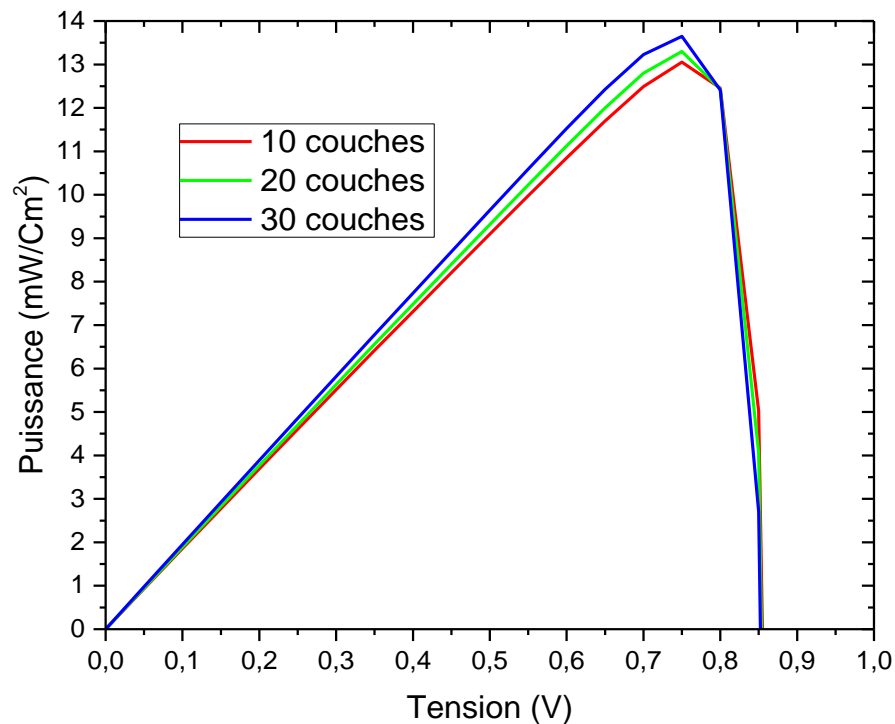
**Figure 2.14** Puissance délivrée par la cellule solaire en fonction de la tension.

## b. Puissance et puissance maximal avec boîtes quantiques

La figure 2.15 montre la puissance délivrée pour chaque cellule solaire de la structure  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Nous pouvons voir que la puissance maximale augmente avec l'augmentation du nombre des couches à BQs (de 10 à 30) pour une concentration d'antimoine égal à 10%.

Par exemple pour :

- 10 couches BQs on a une puissance maximum  $P_{\max}=13,05(\text{mW}/\text{cm}^2)$
- 20 couches BQs on a une puissance maximum  $P_{\max}=13,30\text{mW}/\text{cm}^2)$
- 30 couches BQs on a une puissance maximum  $P_{\max}=13,65(\text{mW}/\text{cm}^2)$



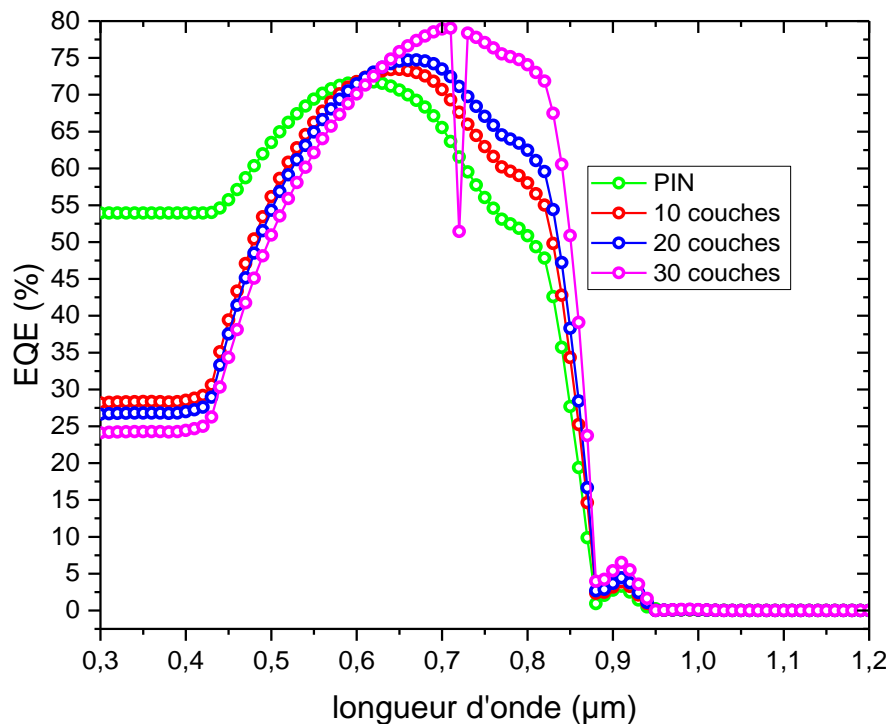
**Figure 2.15** Puissance délivrée par la cellule solaire en fonction de la tension pour différentes couches QDs.

### 2.5.3 L'efficacité quantique externe

La figure 2.16 illustre la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de fractions d'antimoine sans et avec boîtes quantiques.

On remarque que l'EQE augmente lorsque la longueur d'onde atteint  $0.4 \mu\text{m}$  pour tous les cas. Autour de  $0.7 \mu\text{m}$  cette efficacité atteint sa valeur maximale donc on a une bonne efficacité dans l'intervalle  $[0.4, 0.8] \mu\text{m}$  après on observe une diminution rapide de cette efficacité autour de la valeur  $0.85 \mu\text{m}$ .

On remarque aussi que l'insertion des BQs de 10 couches à 30 couches provoque l'extension de la plage d'absorption de cellules solaires GaAs de  $0.4-0.87 \mu\text{m}$  à  $0.4 \mu\text{m} - 0.96 \mu\text{m}$  et le pourcentage de l'efficacité quantique externe augmente de 2% à 6.5% dans cette plage.



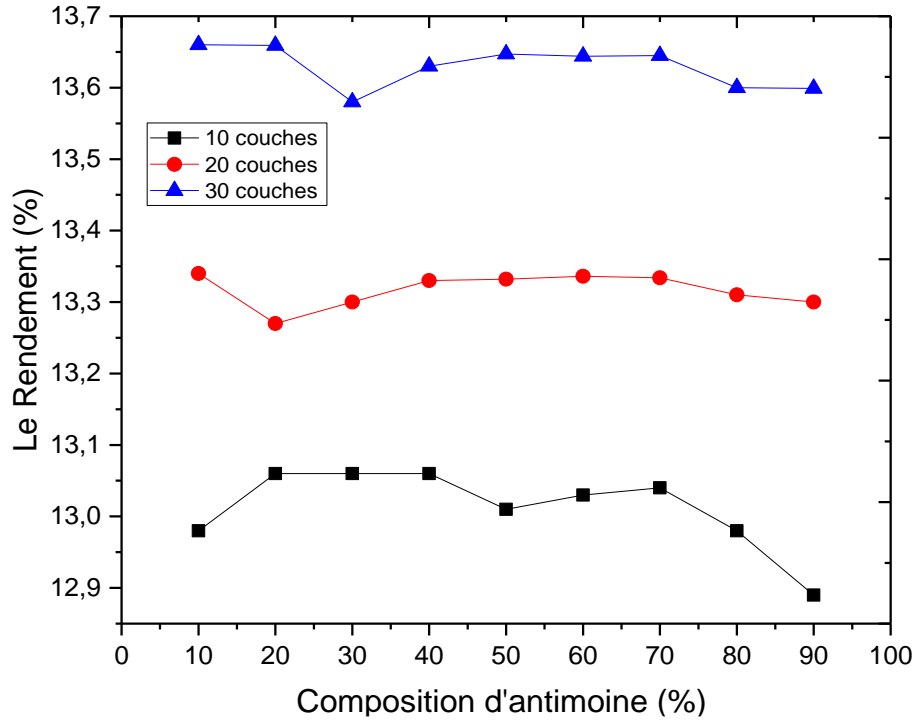
**Figure 2.16** variation de l'efficacité quantique externe en fonction de fractions d'antimoine sans et avec boîtes quantiques.

### 2.5.4 Le rendement :

C'est le paramètre le plus important qui caractérise une cellule photovoltaïque, il est illustré dans la figure 2.17 qui montre la variation du rendement avec la variation des couches à BQs de la structure étudiée en fonction de la concentration d'antimoine.

On remarque que la variation de des couche à BQs provoque l'augmentation de rendement, par exemple si on prendre les cas de 10 couches et 20 couche le rendement augmente de 12.98% et 13.34%. Le rendement atteint sa valeur

maximale de 13.65%, lorsque le nombre des couches égale à 30 couches pour une concentration d'antimoine égale à 10%.



**Figure 2.17** Représentation du rendement de la structure InAsSb/GaAs en fonction de la concentration d'indium pour différentes couches a BQs.

### 2.5.5 Résultats final :

	Jcc(mA/Cm <sup>2</sup> )	Vco(V)	FF(%)	η(%)
<b>Pin</b>	<b>19</b>	<b>0.861</b>	<b>71.77</b>	<b>12.61</b>
<b>10 couches</b>	<b>18.70</b>	<b>0.855</b>	<b>77.88</b>	<b>12.98</b>
<b>20 couches</b>	<b>19.03</b>	<b>0.854</b>	<b>78.93</b>	<b>13.34</b>
<b>30 couches</b>	<b>19.55</b>	<b>0.8523</b>	<b>79.59</b>	<b>13.65</b>

**Tab 2.3** résultats finals de l'effet du nombre de BQs.

Le tableau **2.2** représente la variation des différents paramètres d'une cellule solaire sans et avec implémentation des boîtes quantiques.

On constate que si on augmente le nombre de boîtes quantiques :

- Le courant de court-circuit **J<sub>cc</sub>** augmente.
- La tension en circuit ouvert **V<sub>oc</sub>** diminue.
- Le rendement (**η**) augmente.
- Le facteur forme **FF** augmente.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons étudié les propriétés très particulières de matériau InAsSb. Nous avons aussi étudié l'effet de l'antimoine sur les différents paramètres physique, électroniques et optiques.

D'après ces résultats on a constaté que la meilleure valeur pour obtenir un bon fonctionnement de la cellule solaire à base InAsSb/GaAs, c'est lorsque la composition d'antimoine égale à 10% parce que on a un très faible gap d'énergie et l'absorption de photon est très grande.

Ensuite nous avons établis la simulation des différents paramètres caractérisant la cellule solaire à base des matériaux InAs<sub>0.9</sub>Sb<sub>0.1</sub>/GaAs et nous avons aboutis ces résultats :

- l'augmentation des couches BQs améliore le courant court-circuit et la puissance mais elle diminue la valeur de la tension de circuit ouvert.
- Le facteur de forme augmente avec l'augmentation des couches BQs.
- l'augmentation des couches BQs améliore le rendement de la cellule solaire

## Conclusion générale

---

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études porte sur l'amélioration des structures à boîtes quantiques à base d'InAsSb/GaAs pour les cellules solaires, à partir des différentes relations théoriques et des simulations faites sous logiciel SILVACO.

Pour celle-ci nous avons commencé par présenter dans le premier chapitre quelques généralités sur les semi-conducteurs en générale et sur les semi-conducteurs III-V en particulier ; par la suite, nous avons entamé les notions de base du photovoltaïque et les différents paramètres caractérisant les cellules solaires.

Dans le deuxième chapitre nous avons abordé l'étude du matériau ternaire InAsSb/GaAs et l'influence des concentrations d'antimoine sur les différents paramètres physiques, électronique et optique de ce dernier. Et nous avons vu l'influence de l'incorporation d'antimoine qui a pour effet de diminuer le gap, et d'augmenter le coefficient d'absorption.

Enfin, nous avons effectué la simulation des différents paramètres qui concernent la cellule photovoltaïque à base d'InAsSb /GaAs lorsque la composition d'antimoine égale à 10 %. Et nous avons vu que l'augmentation des couches à boîtes quantiques a augmenté la densité de courant de court-circuit, diminue le rendement et élargit la plage d'absorption de GaAs de 0.4 - 0.87 $\mu\text{m}$  à 0.4 – 0.96 $\mu\text{m}$ .

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, La recherche d'autres semi-conducteurs ternaires et quaternaires agissant comme puits quantiques ou boîtes quantiques pour améliorer les caractéristiques des cellules solaires à base GaAs. Prendre en compte les autres modèles physiques capables de décrire le mécanisme interne d'un puits quantique ou point quantique afin de préciser les résultats.

## Annexe A

### A.1 Les boîtes quantiques

Les boîtes quantiques semi-conductrices sont des inclusions nanométriques tridimensionnelles d'un matériau de faible gap dans un autre matériau (la matrice) 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) [29].

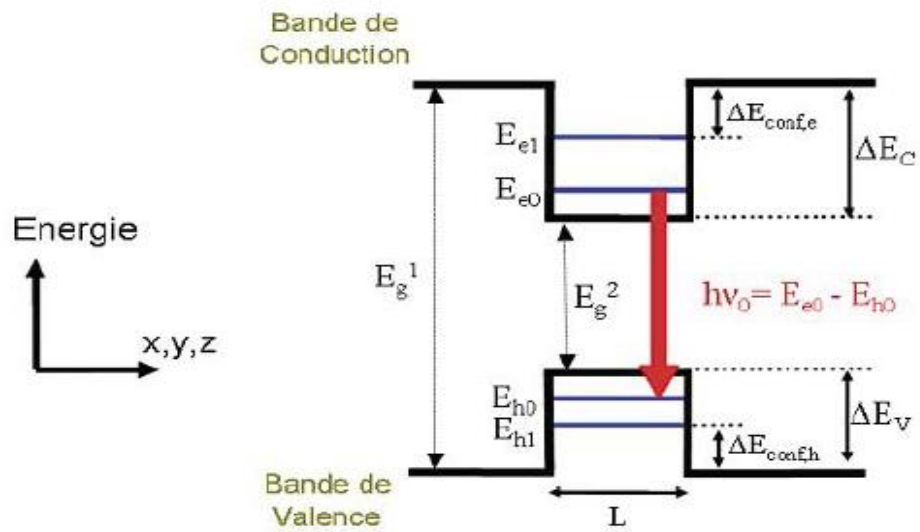
### A.2 le but de boîte quantique

Le but de boîte quantique (BQs), est d'aider les photons moins énergétiques d'être absorbés. L'implémentation des boîtes quantiques créent de Bande intermédiaire et donc augmenter le nombre de transition des électrons dans la cellule.

### A.3 l'effet de confinement dans les boîtes quantiques :

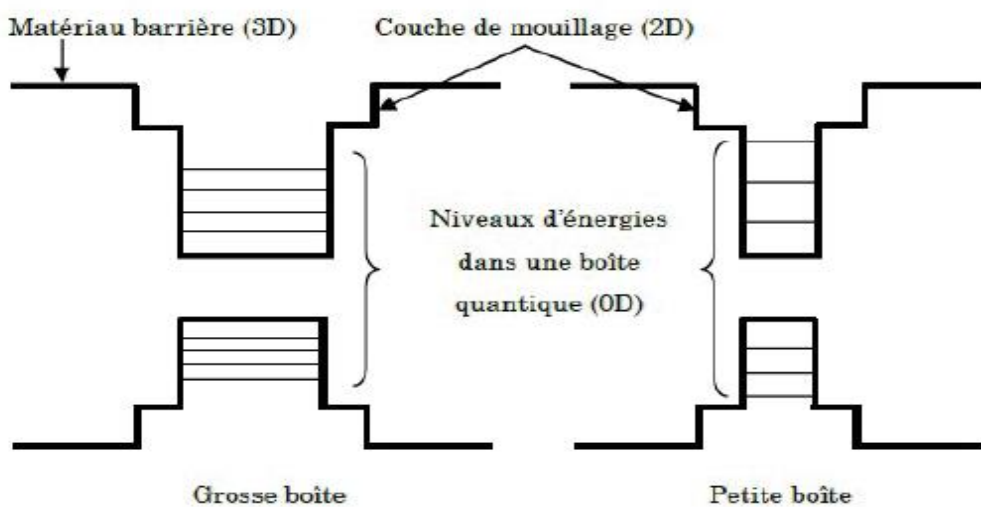
On peut utiliser des hétéro-structures semi-conductrices afin d'obtenir du confinement tridimensionnel. Le principe consiste à piéger de petites inclusions d'un matériau à faible gap dans une matrice formée par un matériau à plus grand gap .Les porteurs injectés dans une telle structure peuvent alors diffuser et rester piéger dans la région à faible gap. Comme illustré dans la figure A.1, la boîte quantique permet de créer des états disponibles dans une bande intermédiaire du matériau à grand gap. Dans cette figure, deux niveaux discrets d'énergie, notés  $E_e(h)0$  (niveau fondamental) et  $E_e(h)1$  (niveaux excités) pour les électrons (respectivement pour les trous), sont représentés[30].





**Figure A-1** Diagramme de bande schématique d'une boîte quantique semi-conductrice de bande interdite

Le nombre et la position des niveaux d'énergie confinés dans une boîte quantique dépendent du choix du matériau semi-conducteur et du matériau hôte (qui définit la hauteur de barrière de potentiel) ainsi que de la géométrie et la taille de la boîte tel qu'illustré à la figure A.2. Cette figure montre l'effet de la taille des BQs sur le confinement en énergie des porteurs et sur les niveaux d'énergie dans la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV). Plus la boîte est petite, plus le confinement est fort et donc plus les niveaux d'énergie discrets sont séparés [30].



**Figure A-2** Niveaux d'énergie dans les boîtes quantiques

#### A-4 Structure des boites quantiques dans une cellule solaire (la recherche du Dr Bailey)

Dans la recherche du Dr Bailey les points quantiques sont insérés dans la région intrinsèque de GaAs cellule p-i-n solaire. Toutes les autres couches sont les mêmes que la structure décrite dans le chapitre 1.[32] voire la figure A-3.

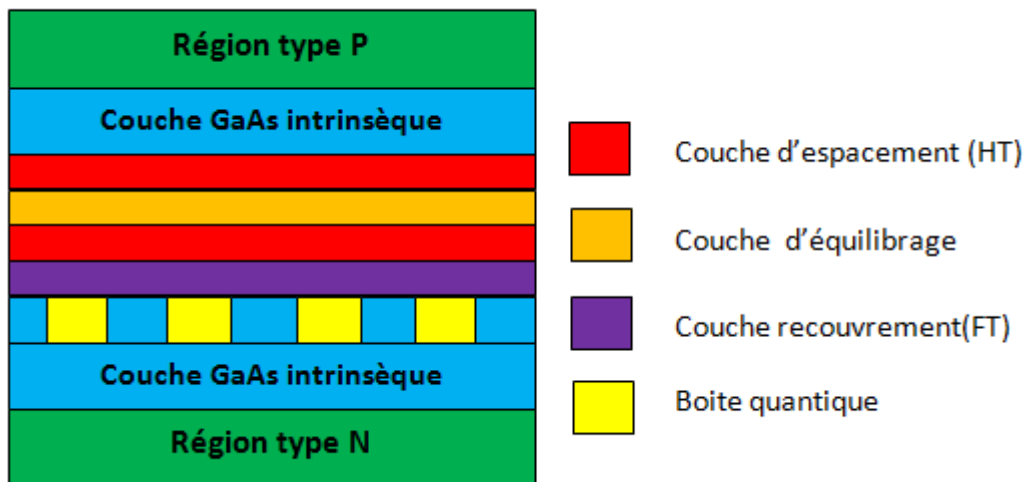


Figure A-3 : Un motif répétitif des Boites quantiques intégrés dans la zone intrinsèque de la cellule GaAs p-i-n solaire

La figure A-3 montre la disposition de la couche structurale des boîtes quantiques qui sont insérés dans la couche intrinsèque. De la figure, nous pouvons découvrir qu'il ya cinq couches incluses: la couche des boîtes quantiques, couche de recouvrement GaAs à faible température, couche d'espacement GaAs à haute température, couche contrainte d'équilibrage Gap et une autre couche d'espacement GaAs à haute température [32].

Et pour améliorer le fonctionnement de la cellule solaire on peu changer les matériaux, les longueurs et les largeurs de ces couches.

La méthode utilisé pour fait croitre les boîtes quantique dans la couches c'est la méthode SK (Stranski-Krastinow) qui a une température typique de croissance de 100 à 200 ° C [32].

D'après les recherches de Dr. Bailey les boîtes quantiques ont la forme hémisphérique Le diamètre de ces points quantiques se situait entre 25 nm et 45 nm et la hauteur d'entre eux se situait entre 5 nm et 10 nm [32].

## Annexe B

### B.1 Tableau périodique des éléments

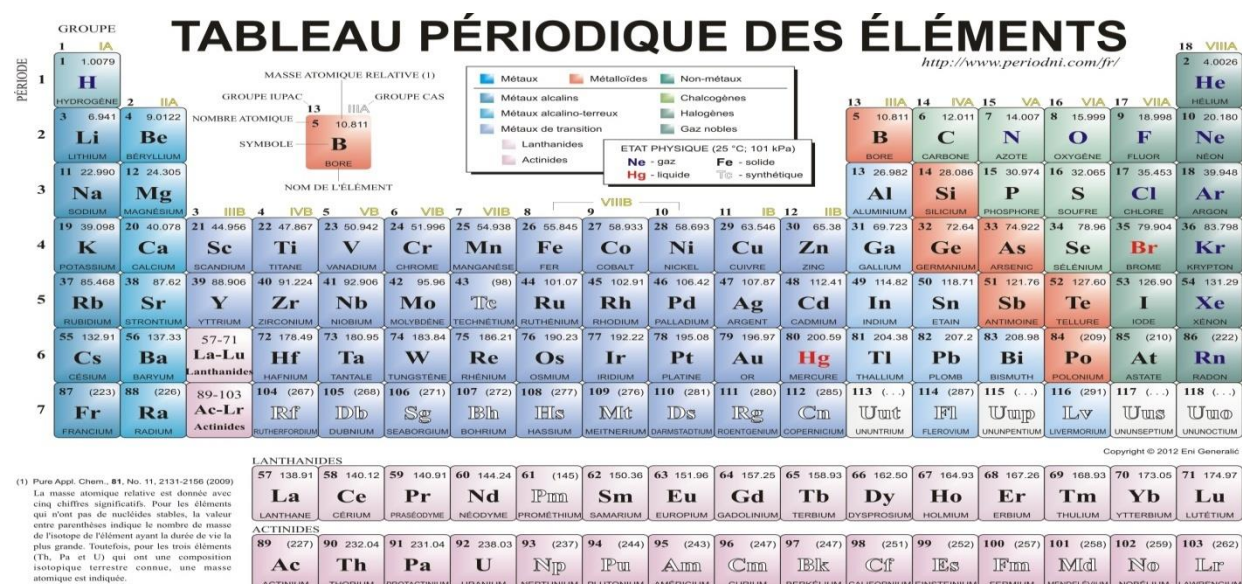


Figure B.1 tableau de Mendeleïev

### B.2 Caractéristique des matériaux massifs :

Parameter	InAs	InSb
Lattice parameter (Å)	6,0583	6,4794
Eg (eV)	0,354	0,174
ac (eV)	-5,08	-6,94
av (eV)	-1	-0,36
Delta0 (eV)	0,39	0,81
Shear deformation b (eV)	-1,8	-2
C11 (Gpa)	832,9	684,7
C12 (Gpa )	452,9	373,5
me (m0)	0.026	0.0135
γ1	20.0	34.8
γ2	8.5	15.5

Tableau B.1 Paramètres physiques fondamentaux des principaux binaires III-V [31].

### B.3 Coefficient d'absorption dans le matériau massif :

<b>matériau</b>	<b>Coefficient d'absorption</b>
<b>InAs</b>	1,55E+05
<b>InSb</b>	3,80E+05

**Tableau B.2** Coefficients d'absorption pour les principaux binaires III-V

### B.4 Les coefficients de Sellmeier dans le matériau massif :

Les coefficients de Sellmeier A, B, C, D et E pour les principaux binaires sont données dans le tableau ci-dessous :

<b>Matériau</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>InAs</b>	<b>11,1</b>	<b>0,71</b>	<b>6,51E+04</b>	<b>2,75</b>	<b>2085</b>
<b>InSb</b>	<b>15,39</b>	<b>2,316</b>	<b>5,12E+05</b>	<b>3,474754</b>	<b>2000</b>

**Tableau B.3** Coefficients de Sellmeier pour les principaux binaires III-V

## Bibliographie

---

- [1] M. MOUNIC: 'Semiconducteurs', FOUCHER, 1972.
- [2] A. Chovet & P. Masson: «physique des semi-conducteurs», ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE, 2004/2005.
- [3] R. Castagné et al: "Circuits intégrés en arséniure de Gallium. Physique, technologie et règles de conception", Masson et CINET ENST Paris, 1989.
- [4] DEPARTEMENT E.E.A: «Physique et technologie des composants de puissance» université de Bordeaux 1, 2003
- [5] Anne Labouret & Michel Villos: « Energie solaire photovoltaïque », DUNOD, 2<sup>e</sup> édition.
- [6] MORNAY Thomas & VERNAY Alexis & VOLLE Marion: «les cellules photovoltaïques», Institution de chartreux, Année 2004-2005.
- [7] Henry Mathieu & Hervé Fanet: «physiques des semiconducteurs et des composants électroniques », DUNOD, 6<sup>e</sup> édition.
- [8] Malika LABIDI : « Etude des propriétés structurales, électroniques des quaternaires », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, 2011.
- [9] Vanessa Gorge : « Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires a base des nitrures des éléments III-V », UNIVERSITE PARIS-SUD 11, 2012.
- [10] Benaïcha Mouna: «Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque», UNIVERSITE COLONEL HADJ LAKHDAR, BATNA, 2007
- [11] DJELLAL Abdellah: «ETUDE DE NANOSTRUCTURES LASER A BASE DEPUITS QUANTIQUES DE ZnO/CdO/Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O», thèse de MAGISTER, UNIVERSITE D'ORAN, 2009.

- [12] Boukli-Hacène Nassima : « ÉTUDE DES LASERS À CASCADE QUANTIQUE À BASE D'ANTIMONIURES III-Sb ET APPLICATIONS », thèse de MAGISTER, UNIVERSITE D'ORAN, 2010.
- [13] BOUAID Hadda: «Modélisation et étude d'un puits quantique contraint à base de  $GaxIn_{1-x}As/GaAs$  et calcul du courant de seuil», mémoire de MAGISTER, UNIVERSITE DE BLIDA, juin 2011.
- [14] KERKAR Fouzia : «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  $1.3 \mu m$ », UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA, 2006
- [15] Olayinka S. Ohunakin, Muyiwa S. Adaramola, Olanrewaju. M. Oyewola, Richard O. Fagbenle: «Solar energy applications and development in Nigeria: Drivers and barriers», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014) 294–301.
- [16] [Http://www.fondation-lamap.org/fr/page/11176/le-rayonnement-solaire-et-son-utilisation-par-l-homme](http://www.fondation-lamap.org/fr/page/11176/le-rayonnement-solaire-et-son-utilisation-par-l-homme), consulté le 28/05/2016
- [17] Salima ALEM-BOUDJEMLINE: «REALISATION ET CARACTERISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES PLASTIQUES», thèse de DOCTORAT, UNIVERSITE D'ANGERS, Janvier 2004.
- [18] PETIBON Stéphane: «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques», thèse de DOCTORAT, UNIVERSITE DE TOULOUSE, Janvier 2009.
- [19] LEKHAL Brahim: «Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky», thèse de MAGISTERE, UNIVERSITE DE BATNA, 2009.
- [20] RAHMOUNI Mawahib: «Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d'améliorer leur rendement», thèse de DOCTORAT, UNIVERSITE D'ORAN, Janvier 2010.
- [21] DJILI Ameer & ZELAZEL Sidali : «Etude et simulation d'une structure à base de  $GaAsN_{Bi}$  pour le photovoltaïque», thèse de MASTER, UNIVERSITE DE BLIDA, 2013.
- [22] Yacine MAAROUF: «Modélisation des cellules solaires en  $InGaN$  en utilisant Atlas Silvaco.», Mémoire de MAGISTERE, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.

- [23] Louardi REMACHE: «Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements antiréfléchissants.», Thèse de DOCTORAT, UNIVERSITÉ MENTOURI – CONSTANTINE, 2011.
- [24] J.C. Rimada, L. Hernández, J.P. Connolly, K.W.J. Barnham: «Conversion efficiency enhancement of AlGaAs quantum well solar cells», *Microelectronics Journal* 38 (2007) 513–518.
- [25] DIB Wassila: «MODELISATION DES STRUCTURES PHOTOVOLTAIQUES ASPECTS FONDAMENTAUX ET APPLIQUES», Thèse de DOCTORAT, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD DE TLEMCCEN, 2010.
- [26] MOSTEFA KARA Selma : «ETUDE ET SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A COUCHES MINCES A BASE DE CIS et CIGS», mémoire de MAGISTERE, université Abou Bekr Blekaïd Tlemcen, 2012.
- [27] BOUKHERS Djamil : «OPTIMISATION D’UN SYSTEME D’ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU POMPAGE», mémoire de MAGISTERE, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [28] Yvan CUMINAL: «Réalisation et étude de diodes lasers à base de GaSb émettant vers 2,3  $\mu\text{m}$  pour application à l’analyse des gaz», thèse de DOCTORAT, UNIVERSITE MONTPELLIER II, Octobre 1997.
- [29] [http://www.liberation.fr/futurs/2016/01/07/mendeleiev-avance-de-quatre-cases\\_1424962](http://www.liberation.fr/futurs/2016/01/07/mendeleiev-avance-de-quatre-cases_1424962), consulté le 07/06/2016.
- [30] Jihene Zribi: « Croissance et caractérisation des boîtes quantiques InAs/GaAs pour des applications photovoltaïques », UNIVERSITÉ de SHERBROOKE, 2014.
- [31] I. Vurgaftman, J. R. Meyer et L. R. Ram-Mohan: “Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys”, VOLUME 89, numbers 11, 2001.
- [32] M. Djamel, G.Samir: “Etude et simulation d’une structure à base de InGaN pour le photovoltaïque”, UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB, 2013.