

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA



قسم الإلكترونيك \_ كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
Département d'Électronique

## Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté par  
Chanane Abdel Krim  
Kefkef abdelamine

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Micro-électronique

---

Thème

---

# Etude et simulation d'une structure à base de GaAsP/GaAs/InGaAs pour le photovoltaïque

---

Proposé par : Mr. Aissat Abdelkader

Année Universitaire 2019-2020

## Remerciements

*Nous remerciant Allah le tout puissant de nos avoir donné la force, la volonté et courage afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous adressons notre sincère remerciement a notre encadreur professeur Aissat Abdelkader. Qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils, son aide, et son entière disponibilité du début jusqu'à la fin de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*Enfin, nous n'oublions pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.*

## *Je dédie ce modeste travail*

*Aucun mot ne vous porte. On Exprime à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte. Votre soutien et votre engagement m'ont toujours donné la force pour persévérer et pour prospérer dans la vie, chaque ligne de ce mémoire, chaque mot et chaque lettre vous exprimera la reconnaissance, le respect, l'estime et le merci d'être mes parents.*

*A mes chères sœurs et tout ma famille et mes amis et mes camarades.*

*Sans oublier tous les professeurs qui m'ont enseigné dans ma carrière.*

*Chanane Abdelkrim*

## *Je dédie ce modeste travail*

*Aucun mot ne vous porte. On Exprime à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte. Votre soutien et votre engagement m'ont toujours donné la force pour persévérer et pour prospérer dans la vie, chaque ligne de ce mémoire, chaque mot et chaque lettre vous exprimera la reconnaissance, le respect, l'estime et le merci d'être mes parents.*

*A mes chères sœurs et tout ma famille et mes amis et mes camarades.*

*Sans oublier tous les professeurs qui m'ont enseigné dans ma carrière.*

*Kefkef abdelamine*

# Table des matières

## INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE 1 : Les propriétés physiques du semi-conducteur III-V

1.1 Introduction .....	4
1.2 Définition des semi-conducteur III-V.....	4
1.3 Propriétés structurales.....	5
1.3.1 Structure cristalline.....	5
1.4 Propriétés électroniques.....	6
1.5 Propriétés optiques.....	7
1.6 Classification du matériau.....	8
1.7 Les cellules photovoltaïques.....	9
1.7.1 Découverte de l'effet photovoltaïque.....	9
1.7.2 L'Effet Photovoltaïque.....	9
1.8 Les technologies de cellules photovoltaïques et leurs rendements.....	10
1.8.1 Les cellules de première génération.....	11
1.8.2 Les cellules de deuxième génération.....	12
1.8.3 Les cellules de troisième génération.....	14
1.8.4 Les cellules nanocristallines.....	14
1.8.5 Les cellules à concentration .....	14
1.8.6 Les cellules organiques.....	15

### CHAPITRE 2 : étude du matériau GaAsP et InGaAs

2.1 Introduction.....	17
2.2 Les alliages des semi-conducteurs III-V.....	17
2.3 Effets des perturbations extérieures sur les matériaux III-V.....	18
2.3.1 Effet de la température sur les III-V.....	18
2.3.2 L'effet de la pression.....	18
2.4 Les avantages des semi-conducteurs III-V.....	19
2.5 Les paramètres des matériaux .....	19
2.6 Les matériaux.....	21

2.7 grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	21
2.7.1 courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	22
2.7.2 Tension en circuit ouvert $V_{co}$ .....	23
2.7.3 points du fonctionnement $P_{max}$ ( $V_{max}$ , $I_{max}$ ) .....	23
2.7.4 facteurs du forme FF.....	24
2.7.5 rendements $\eta$ .....	24
2.8 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	25
CHAPITRE 3 : Résultats de la simulation	
3.1 Introduction.....	27
3.1.1 La structure de la cellule.....	27
3.2 Simulation avec le logiciel Matlab.....	28
3.3 Energie de bande interdite (gap).....	28
3.4 Le paramètre de maille.....	30
3.5 Simulation avec le logiciel SILVACO-ATLAS.....	32
3.6 Caractéristique courant-tension $I(V)$ .....	32
3.7 Caractéristique puissance-tension $P(V)$ .....	33
3.8 l'effet de la concentration de phosphore.....	34
3.8.1 Courant de court-circuit et rendement.....	34
3.9 Influence de la température .....	35
3.9.1 La tension de circuit ouvert et facteur de forme.....	35
Conclusion.....	36

## CONCLUSION GENERALE

## ANNEXE

## REFERENSE

## LISTE DES ILLUSTRATION, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure I-1 : Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.

Figure I-2 : Structure de bande d'énergie du : A-gap indirect et B-gap direct.

Figure I-3 : Bandes d'énergies pour : a et b) Matériaux, c) Semi-conducteur d) Isolateur.

Figure I-4 : Tableau périodique partielle.

Figure I-5: (a) cellule mono cristalline, (b) poly cristalline.

Figure II-1 : Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque ; à l'obscurité et sous éclairement.

Figure II-2 : Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.

Figure III : Structure de la cellule à 3 jonctions InGaAs/GaAsP/GaAs.

Figure III-1 : Variation de l'énergie en fonction de la concentration de phosphore.

Figure III-2 : Variation de l'énergie du gap en fonction de la concentration d'indium.

Figure III-3 : Variation du paramètre de maille en fonction de la concentration de phosphore.

Figure III-4 : Variation du paramètre de maille en fonction de la concentration d'indium.

Figure III-5 : caractéristique courant-tension  $I(V)$  de la structure GaAsP/InGaAs/GaAs pour différentes cellules.

Figure III-6 : caractéristique puissance-tension  $P(V)$  de la structure GaAsP/InGaAs/GaAs pour différentes cellules.

Figure III-7 : Courant de court-circuit et rendement en fonction de concentration de phosphore.

Figure III-8 : l'influence de la température sur la variation courant de circuit ouvert et le facteur de forme de la structure InGaAs/GaAsP/GaAs pour différentes températures.

Tableau 1.1 Extrait de la classification périodique des éléments.

Tableau I-2 : Alliages de quelques matériaux III-V et II-VI.

Tableau I-3 : La structure et le rendement de chaque génération.

Tableau I-4 : Cellules solaires de 1<sup>ère</sup> génération (Green 2017).

Tableau I-5 : Des cellules solaires de 2<sup>ème</sup> génération.

Tableau I-6 : Exemples de cellules solaires de 3<sup>ème</sup> génération.

Tableau II-1 : propriété électronique de GaAs et GaP.

Tableau III : Conception de la cellule InGaAs/GaAsP/GaAs optimisée.

Tableau III-1 : Les caractéristiques de la cellule pour In = 10% et P = 10 %.

Tableau III-2 : Les caractéristiques de la cellule pour In = 10% et pour différente concentration du Phosphore.

Tableau III-3 : Les paramètres caractéristiques de la cellule (GaAsP/InGaAs/GaAs) selon de la température.



## ملخص

في هذه الأطروحة الخاصة بالماستر نحن مهتمون بمحاكاة ونمذجة خلية شمسية GaAsP/GaAs/InGaAs من اجل الخلايا الكهروضوئية هذه المواد عبارة عن سبيكة أشباه الموصلات من المستوى الثالث الي الخامس مع ثورة من هيكلها الالكتروني وغيرها من الخصائص وقد وجدت تطبيق واسع في الأجهزة البصرية والالكترونية أولا درسنا تأثير تركيز الفوسفور على العناصر المختلفة الخلية ثم درسنا تأثير درجة الحرارة على الخلية لعناصر مختلفة مميزة للخلية

## RESUME

Dans cette thèse de master, nous nous intéressons à la simulation et à la modélisation d'une cellule solaire GaAsP / GaAs / InGaAs pour le photovoltaïque. Ce matériau est un alliage semi-conducteur du troisième au cinquième niveau avec une révolution de sa structure électronique et d'autres propriétés et a trouvé une large application dans les dispositifs optiques et électroniques. Premièrement, nous avons étudié l'effet de Concentration en phosphore sur différents éléments de la cellule Puis nous avons étudié l'effet de la température sur la cellule pour différents éléments caractéristiques de la cellule

## ABSTRACT

In this master thesis, we are interested in the simulation and the modeling of a GaAsP / GaAs / InGaAs solar cell for photovoltaics. This material is a third to fifth level semiconductor alloy with revolution of its electronic structure and other properties and has found wide application in optical and electronic devices. First, we studied the effect of Phosphorus concentration on different elements of the cell Then we studied the effect of temperature on the cell for different characteristic elements of the cell

---

*INTRODUCTION GENERALE*

---

## INTRODUCTION GENERALE

Les cellules solaires photovoltaïques sont constituées d'un matériau semi-conducteur qui convertit l'énergie du rayonnement solaire en électricité de manière propre et renouvelable.

Cependant, il existe des obstacles majeurs à l'utilisation à grande échelle de l'énergie solaire en raison des difficultés pour équilibrer le coût et l'efficacité des dispositifs existants. Les modules de cellules solaires à base de silicium actuellement dominent la marche de l'énergie solaire en raison de leur fiabilité à faible coût et à long terme, mais ne convertissent environ 8-19% de l'énergie solaire disponible [A1, A2].

Dans ce champ, notre travail s'intéresse à l'étude et la simulation d'une structure à base GaAsP/GaAs/InGaAs pour photovoltaïque.

Ce mémoire se divise en trois chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré aux propriétés physiques du semi-conducteur III-V
- Le deuxième chapitre explique les différents matériaux ternaires et binaires ainsi que leurs propriétés.
- Le troisième chapitre sera consacré aux résultats de simulation de notre structure
- Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale.

---

## *CHAPITRE 1*

### *Les propriétés physiques du semi-conducteur III-V*

---

## I.1 Introduction :

La cellule solaire est l'élément nécessaire assurant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'interaction entre la lumière et le semi-conducteur constituant la cellule solaire se suit par différents phénomènes physiques tel que la génération et la recombinaison. Cette dernière dépend fortement du matériau semi-conducteur III-V [2].

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les matériaux semi-conducteurs III-V.

## I.2 Définition des semi-conducteurs III-V :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique intermédiaire entre celle des conducteurs et des isolants. Cette conductivité varie sous l'effet de la température, l'éclairement et la présence d'impuretés (Dopage, défauts du réseau). Les semi-conducteurs sont principalement les éléments de la Colonne IV du tableau de classification des éléments (Si, Ge) mais aussi des composés III-V (GaAs, GaN) [1].

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la III<sup>ème</sup> colonne et d'un élément de la V<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique.

De Mendeleïev. Le tableau I-1 regroupe un extrait de cette classification [1].

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

**Tableau I-1.** Extrait de la classification périodique des éléments [1].

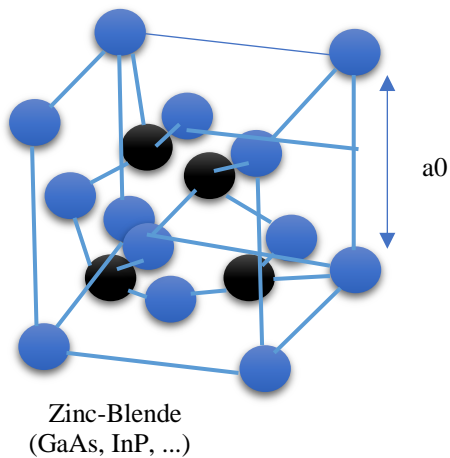
Dans cette thèse nous avons utilisés les alliages binaires des semi-conducteurs III-V : Arséniure de gallium (GaAs), Phosphure d'indium (InP) [1].

## I.3 Propriétés structurales :

### I.3.1. Structure cristalline :

La plupart des matériaux III-V se cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure 1. Cette structure, composée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées C. F.C, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément V [2].

Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube, d'une quantité ( $a_0/4$ ,  $a_0/4$ ,  $a_0/4$ ),  $a_0$  étant le paramètre cristallin, c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire.

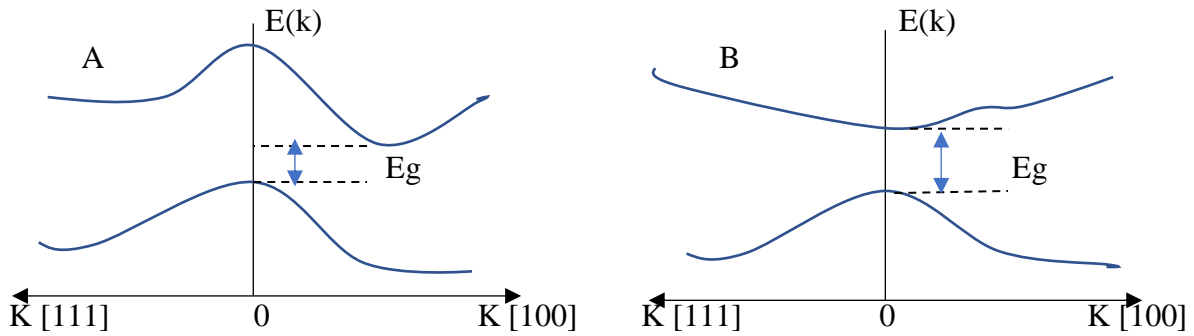


**Figure I-1** : Mailles cristallographiques des structures Zinc Blende [2].

#### I.4 Propriétés électroniques :

La structure de bande est la relation entre l'énergie de la particule  $E$  et son vecteur d'onde  $k^{\vec{}}$  parmi les directions de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin :  $E(k)$ . Elles se décomposent en bandes de valence (BV) et bande de conduction (BC). La bande de valence est la plus basse, la bande de conduction est la plus haute et la bande interdite ou le gap [2]. Ce gap correspond à l'énergie nécessaire au système pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Le gap est par définition la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence.

Dans les semi-conducteurs à gap direct, le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons de faible masse effective, donc très mobiles. Les semi-conducteurs à gap indirect, leur bande de conduction correspond à de grande masse électrons effective, donc ayant une faible mobilité [2] (Figure 2).



**Figure I-2** : Structure de bande d'énergie du : A-gap indirect et B-gap direct [2].

La plupart des matériaux III-V possèdent un gap direct. Dans ce cas le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont pour un même point  $k$  de la zone de Brillouin.

La largeur du gap varie en fonction de la température, généralement, cette variation est donnée par l'équation de Varshni [2].

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta} \quad (I.1)$$

- $E_g(0)$  : Est le gap de la bande d'énergie à 0 K.
- $\alpha$  : Est en électronvolts par degré Kelvin.
- $\beta$  : Est proportionnel à la température de Debye (en kelvins).

Où  $E_g(0)$  est l'énergie de bande interdite pour  $T=0$  K,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres servant à décrire la variation de la bande interdite en fonction de la température. En générale, les semi-conducteurs ont une bande énergétique entre zéro et 4 eV (Figure 3).

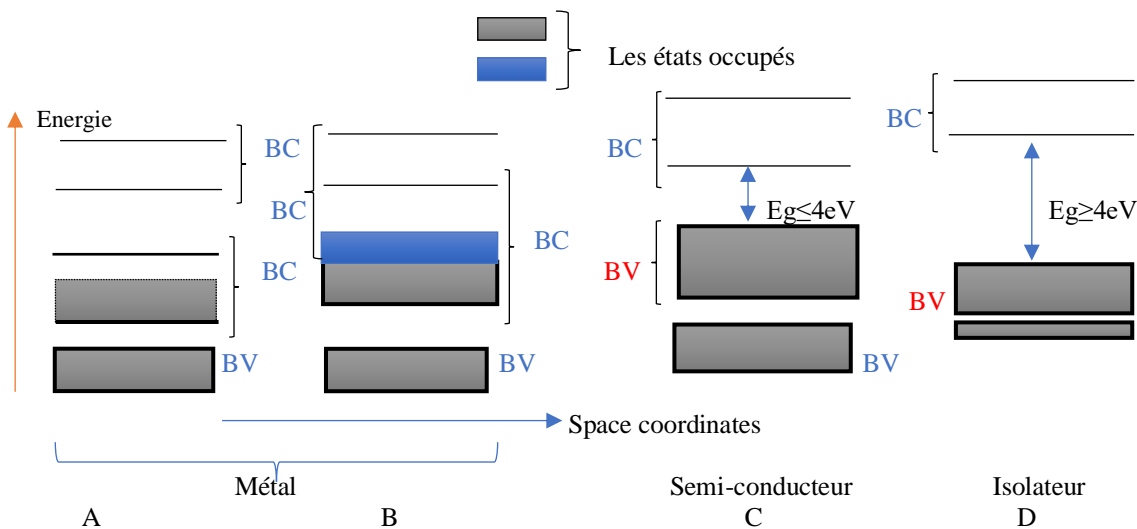


Figure I-3 : Bandes d'énergie pour : a et b) Matériaux, c) Semi-conducteur d) Isolateur [2].

### I.5. Propriétés optiques :

L'interaction d'un électron avec un photon se fait, comme toute interaction, avec conservation de l'énergie et du vecteur d'onde. Les transitions optiques directes entre les extrémités des bandes de valence et de conduction apparaissent verticales radiatives dans le diagramme de bande des électrons. Dans le cas d'un semi-conducteur à bande interdite indirecte, les transitions optiques à travers le gap ne peuvent avoir lieu que grâce à une interaction supplémentaire : transitions obliques (non radiatives).

Les caractéristiques optiques des matériaux sont :

- Le coefficient de réflexion R :

$$R = \frac{(n - 1)^2 + \chi^2}{(n + 1)^2 + \chi^2} \quad (1.2)$$

- Le coefficient de transmission T :

$$T = \frac{4n}{(n + 1)^2 + \chi^2} \quad (1.3)$$

Où :

$\chi$  : est le coefficient d'extinction.

$n$  est : l'indice de réfraction En générale, l'indice de réfraction est lié à la constante diélectrique par la relation :  $(n \approx \sqrt{\epsilon_r})$ [3].



## I.6 Classification du matériau :

Les matériaux peuvent être classés en trois types selon leurs propriétés électriques : conducteurs, isolants ou semi-conducteurs. Les cellules solaires sont construites à base des matériaux semi-conducteurs. Cependant, ces matériaux peuvent procéder en tant qu'isolants ou conducteurs [3]. La conductivité  $\sigma$  est un paramètre très important dans l'identification de type de matériau. La capacité d'un matériau à conduire l'électricité dépend de plusieurs facteurs ; parmi lesquels la structure atomique et l'énergie de bande interdite [4].

Les Semi-conducteurs peuvent se trouver en deux formes simple ou composé. Le silicium (Si) et le Germanium (Ge) sont deux exemples des semi-conducteurs simples. Ces deux semi-conducteurs appartiennent au groupe IV du tableau de Mendeleïev comme le montre la figure 4.

	<b>3A 13</b>	<b>4A 14</b>	<b>5A 15</b>	<b>6A 16</b>
	5 <b>B</b> 10.811 Boron	6 <b>C</b> 12.0107 Carbon	7 <b>N</b> 14.0067 Nitrogen	8 <b>O</b> 15.9994 Oxygen
	<b>13 Al</b> 26.9815 Aluminum	<b>14 Si</b> 28.0855 Silicon	<b>15 P</b> 30.9738 Phosphorus	<b>16 S</b> 32.065 Sulfur
<b>2B 12</b>	<b>30 Zn</b> 65.409 Zinc	<b>31 Ga</b> 69.723 Gallium	<b>32 Ge</b> 72.64 Germanium	<b>33 As</b> 74.9216 Arsenic
	<b>48 Cd</b> 112.411 Cadmium	<b>49 In</b> 114.818 Indium	<b>50 Sn</b> 118.710 Tin	<b>51 Sb</b> 121.760 Antimony
	<b>80 Hg</b> 200.59 Mercury	<b>81 Tl</b> 204.383 Thallium	<b>82 Pb</b> 207.2 Lead	<b>83 Bi</b> 208.9804 Bismuth
				<b>84 Po</b> [209] Polonium

Figure I- 4 : Tableau périodique partielle [6].

Les semi-conducteurs composés sont un alliage entre des éléments de groupe III et V respectivement comme le phosphure d'Aluminium (AlP), Nitride de Gallium (GaN), phosphure d'Indium (InP), arsénite de Gallium (GaAs) [4].

Il est possible de faire un alliage entre plusieurs éléments de groupe III ou V avec d'autres éléments d'un groupe différent, En formant un semi-conducteur composé, comme exemple le phosphure de Gallium d'Indium ( $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ ) et arsénite nitrogène d'Indium de Gallium

( $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}_{1-y}\text{As}_y$ ). Le  $x$  et  $y$  spécifie la fraction molaire des composés [7]. Les fabricants des composants semi-conducteurs font un alliage entre les éléments de groupe II-V, comme Oxyde de Zinc (ZnO), tellure de Cadmium (CdTe), Sulfite de Mercure (HgS) [4].

Colonne	Semi-conducteur
IV	Ge, Si
Binaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb.
III-V	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$
Ternaire	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
Quaternaire	
Binaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
II-VI	$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$
Ternaire	

Tableau I-2 : Alliage de quelques matériaux III-V et II-VI [4].

## I.7 Les cellules photovoltaïques :

### I.7.1 Découverte de l'effet photovoltaïque :

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons Solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la Fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a Besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un Rendement de 4%.

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication Élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à Grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels Investissent dans la technologie photovoltaïque [8].

### I.7.2 L'Effet Photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque c'est un processus qui permet de transformer la lumière (photons) en énergie électrique. L'énergie des photons dépend de la longueur d'onde. Quand un matériau comme le silicium absorbe la lumière ; Les photons transfèrent leurs énergies aux électrons qui leur permettent de sauter à un état d'énergie plus élevé. Les électrons excités reviennent à leurs états initiaux en émettant de la lumière.

La production de l'énergie électrique se fait par les processus suivants : absorption, conversion et la collecte [9] [11] [12] [13].

Les rayons lumineux frappent la surface de la cellule solaire.

Le matériau semi-conducteur absorbe les photons dont l'énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de matériaux.

L'énergie du photon est transférée aux électrons en créant des paires électrons-trous.

Les particules sont collectées aux électrodes de la cellule solaire et un courant électrique continu apparait.

Quand un rayon lumineux frappe la cellule solaire, une partie de ce rayon sera réfléchi et l'autre est absorbé par le réseau cristallin de semi-conducteur et converti directement en courant électrique. Cela est fait par la création des paires électrons- trous [9] [10].

### I.8 Les technologies de cellules photovoltaïques et leurs rendements :

On distingue différents types des cellules photovoltaïques. Les cellules les plus répandues sur le marché sont les cellules en silicium cristallin et les cellules en couches minces. Ces cellules sont regroupées dans trois grandes familles dites de génération. La comparaison entre ces générations se fait en fonction de [14] [16].

- ✚ Structure.
- ✚ Dimensions.
- ✚ Cout de production.
- ✚ Rendement électrique et quantique.

Le tableau ci-dessous illustre le rendement de chaque génération [14] [16].

La génération	Structure	Le cout	Rendement
1 <sup>ère</sup> génération	Cristaux simples de silice	Très chères	$\eta$ 12% à 20%
2 <sup>ème</sup> génération	La miniaturisation par les lois de Moore	Plus faible	$\eta$ 17%
3 <sup>ème</sup> génération	Miniaturisation optimale	Cout élevé	$\eta$ 46%

Tableau I-3 : La structure et le rendement de chaque génération [14] [16].

### I.8.1 Les cellules de première génération :

Il existe deux types de cellules solaires classiques à base de silicium monocristallin (c-Si) et multi cristallin (mc-Si) (figure. 5) [17] [18] [19]. Ce type de cellules sont fabriqués à partir des purifications et solidification (processus Czochralski (Cz) FZ, Bridgman, ... etc. et processus Siemens) des lingots de silicium pour obtenir un matériau contenant de 99.99% de Silicium [14] [20]. La différence entre les cellules monocristallines et cellules polycristallines est : les premières ont des coins cassés et l'aspect uniforme. Alors que les deuxièmes ont un aspect irisé. L'épaisseur de son substrat est supérieure à 100  $\mu$ m [14] [17].



Figure I-5: (a) cellule mono cristalline, (b) poly cristalline [14].

La technologie de la première génération permet d'obtenir un rendement variant de 14% à 25% pour les cellules monocristallines et de 12% à 20% pour les cellules poly cristallines [10].

Alors que les cellules amorphes sont caractérisées par un rendement variant de 8 à 10%. En 2012, Le rendement de cellule à base de silicium ainsi que la production mondiale de cette technologie est de 84 % du marché PV (37% monocristallin et 45% multi cristallin) est amélioré. Le tableau ci-après montre le rendement de cette filière [17].

Le cout et les procédures de fabrication des cellules photovoltaïques sont très importants. La méthode de fabrication des cellules cristallines est difficile et trop chère car elle nécessite un cristal pur donc très chère. Alors que le cout de fabrication des cellules polycristallines est moins cher par rapport aux cellules amorphes [10]. Mais les cellules à base de silicium amorphe sont les plus utilisées dans notre vie quotidienne.

Cellule solaire	Surface (cm <sup>2</sup> )	Rendement (%)	Centre de test
Silicium monocristallin	1.8043	26.3±0.5	FhG-ISE <sup>a</sup> (07/2016)
Silicium multicristallin	2.4274	21.3±0.4	FhG-ISE (11/2015)

**Tableau I-4** : Cellules solaires de 1<sup>ère</sup> génération (Green 2017) [17].

a :FhG-ISE: Fraunhofer-Institut fur Solare Energie system.

### I.8.2 Les cellules de deuxième génération :

Les cellules de 2<sup>ème</sup> génération « couches minces ». Il existe deux types de cellule : à base de tellure de cadmium (CdTe) et de silicium amorphe (a-Si). La couche de semi-conducteur est déposée sur un substrat (par exemple du verre).

La fabrication des cellules solaires de deuxième génération est basée sur la technologie de couches minces en utilisant des méthodes PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapeur Déposition). Ces cellules solaires sont des cellules dont l'épaisseur est inférieure à 50 m (couches minces) [17]. Cette technologie utilise le silicium amorphe ou des matériaux de composés II-VI et III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe), et le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) [17]. Leur cout de production est moins élevé. L'épaisseur de matériau semi-conducteur est mince [17] [18]. Le rendement des cellules de deuxième

génération est moins élevé. Il varie de 6 à 7%. La deuxième génération présente beaucoup d'avantages (faibles illuminations et flexibilité des modules), mais leur inconvénient réside dans la toxicité de certains éléments (Cadmium). L'installation des modules à base des cellules 2<sup>ème</sup> génération se fait en Allemagne et en Asie [18].

- ✚ Les cellules à base de CIS (Cuivre-Indium-Sélénium) et CIGS (Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium) sont composées essentiellement de di séléniure et de gallium respectivement [10].
- ✚ Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) : Ce type de cellule composé de tellure de cadmium permettant une absorption importante des rayons lumineux. La bande interdite de CdTe est de 1.45 eV. Le CdTe est caractérisé par un grand coefficient d'absorption qui le permet d'absorber le spectre dans sa quasi-totalité sur une profondeur de 2  $\mu\text{m}$  [11]. Mais le (CdTe) est un matériau non conseillé pour l'environnement car il est toxique et interdit d'être utilisé que pour la fabrication des cellules solaires. Leur rendement est de l'ordre de 17% [10].
- ✚ Silicium en couche mince : microcristallin (c-Si) et silicium amorphe (a-Si) dont le rendement est de 6%.
- ✚ Silicium amorphe/silicium microcristallin (a-Si/ c-Si) [19].

L'utilisation de ces cellules est plus variée grâce à sa flexibilité mais leur utilisation Exige une haute température et plus d'énergie. Le tableau ci-dessous illustre le Rendement de différents types de cellules de deuxième génération (Tableau 5) [17].

Cellule solaire	Surface (cm <sup>2</sup> )	Rendement (%)	Centre de test
GaAs	0.9927	28.8±0.9	NREL (05/2012) <sup>b</sup>
CIGS	0.9927	21.0±0.6	FhG-ISE (04/2014) <sup>a</sup>
CdTe	1.0623	21.0±0.4	Newport (08/2014)
Silicium amorphe	1.001	10.2± 0.3	AIST (07/2014) <sup>c</sup>

Tableau I-5 : Des cellules solaires de 2<sup>ème</sup> génération [17].

<sup>b</sup>NREL: National Renewable Energy Laboratory.

<sup>c</sup>AIST: Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

**I.8.3 Les cellules de troisième génération :**

Des cellules multi couches à base de semi-conducteurs inorganiques sont réalisées en tandem (sandwich). L'énergie de gap des semi-conducteurs est descendante. Ce type de cellule permet d'absorber le spectre solaire dans sa quasi-totalité. L'avantage de cette génération est le rendement qui peut dépasser 30%. Elle est basée sur l'utilisation de nouveaux matériaux, des concentrateurs, des nanotubes, des fils de silicium, des cellules nanocristallines, des colorants organiques et des polymères, des cellules à encre sensibilisé (Dye-sensitized solar cell, DSSC). Le cout de production des cellules de 3ème génération est élevé et sa réalisation reste au laboratoire (Tableau 6) [17].

**I.8.4 Les cellules nanocristallines :**

Les cellules nanocristallines sont l'un des dernières générations de cellules solaires. Son rendement au laboratoire est de 10,4 %. Leur coût de production est moins élevé.

**I.8.5 Les cellules à concentration :**

Les cellules à concentration sont placées sur un support mobile et doivent être toujours placés dans une position face au soleil. Leur rendement varie de 20 à 30 % [14].

**I.8.6 Les cellules organiques :**

Au début le rendement de cette filière a été amélioré suite aux travaux de Shaheen (2.5%) et celui de Peumans (3.6%) sous un éclairement d'AM1.5 ; et par la suite un rendement de 4,2% a été atteint pour des cellules organiques à base de C60. Enfin, Heeger et son équipe a atteint un rendement de 6.7% en mettant des cellules en tandem. Malgré, les avantages de cette technologie : la facilité de la mise en forme des matériaux, la faible quantité des matériaux utilisée ; leur rendement reste assez faible si on le compare avec d'autres technologies dont leur rendement dépasse les 30% [11].

Les cellules photovoltaïques organiques sont constituées de molécules organiques. Elles sont placées sur un substrat de verre ou de plastique.

On peut distinguer plusieurs types de cellules inorganiques [10] :

- ✚ Les cellules de type Schottky : cette cellule utilise un semi-conducteur de type p (ou n) Met en tandem entre deux électrodes de métal.
- ✚ Les cellules hétérojonction de type bicouche : elle est basée sur l'utilisation de deux semi-conducteurs l'un est de type p et l'autre est de type n [10].
- ✚ Les cellules hétérojonction de type réseaux interpénétrés [10].
- ✚ Les cellules hybrides sensibilisées par un colorant : ils sont appelés DSSC (Dye- Sensitized Solar Cell) ou cellules Graetze [19].
- ✚ Les cellules multi jonctions III-V : Actuellement ; les cellules à multi-jonction sont limitées aux applications spatiales. Elles sont basées sur l'utilisation des différents matériaux semi-conducteurs en épitaxie dont l'énergie de gap est décroissante. Ce processus est appelé aussi tandem. Le composant principal est l'arséniure de gallium dont le rendement des cellules à mono jonction varie de 18 à 25%. Des rendements élevés sont atteints en utilisant cette technologie « plus de 32% » avec des cellules de double jonction InGaP/GaAs ; par la suite l'apparition des concentrateurs augmente le rendement de ces cellules qui dépasse 40% [10].

Cellule solaire	Surface (cm <sup>2</sup> )	Rendement (%)	Centre de test
Colorante (Dye-sensitised)	1.005	11.9±0.4	AIST (09/2012)
Organique	0.992	11.2±0.30	AIST (10/2015)
InGaP/GaAs/InGaAs(tandem)	1.047	37.9±1.2	AIST (02/2013)
InGaP/GaAs : GaInAsP/GaInAs (à concentration)	0.0520	46.0±2.2	AIST (10/2014)

Tableau I-6 : Exemples de cellules solaires de 3<sup>ème</sup> génération [17].



---

## CHAPITRE 2

*Etude du matériau GaAsP et InGaAs III-V*

---

## II.1 Introduction :

Au cours de ce chapitre, nous allons analyser et interpréter les résultats obtenus par les Calculs des propriétés structurales, électroniques, optiques des binaires zinc blende GaAs, InAs et GaP. Cependant, l'étude de ces caractéristiques passent par une bonne.

Compréhension des propriétés fondamentales de ces matériaux et Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III (bore, gallium, aluminium, indium, ct..) et de la colonne V (arsenic, antimoine, phosphore, ct.) du tableau périodique de Mendeleïev , tels que l'arséniure de gallium, arséniure d'indium, nitrure de gallium, antimoniure de gallium, phosphure de bore ou des alliages ternaires tels que  $In_xGa_{1-x}As$  ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe, et sont utilisés dans des application opto-électronique (diodes lasers, cellules solaires, etc. ) ainsi qu'électronique (transistors...).après le silicium, ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilise dans l'industrie [21].

## II.2 Les alliages des semi-conducteurs III-V :

Les alliages semi-conducteurs, vu leur application dans le domaine de l'optoélectronique. L'élaboration de ces alliages se fait à partir du composé binaire dont en fait varié leur composition, ils peuvent être binaire, ternaire suivant qu'ils renferment deux, trois éléments respectivement. Comme : GaAs GaP, InAs, GaAsP, InGaAs [22].

Cet alliage ternaire de la forme  $A_{1-x}B_xC$  est composé des molécules AC avec une fraction molaire  $(1 - x)$  et des molécules BC avec une fonction molaire  $x$  [23].

La valeur moyenne  $F(x)$  de la propriété physique de l'alliage ternaire, peut être liée linéairement à la concentration stœchiométrique  $x$  par la relation suivante :

$$F(x)A_{1-x}B_xC = x.F_{BC} + (1 - x).F_{AC} \quad (II.1)$$

Certaines propriétés suivant une interpolation linéaire, comme le paramètre de réseau donné par la loi de Vegard [25] :

$$a(x)A B_xC_{1-x} = x.a_{BC} + (1 - x).a_{AC} \quad (II.2)$$

$a_{BC}$  Est la constante du réseau du composé BC.

$a_{AC}$  Est la constante du réseau du composé AC.

X Est la concentration molaire.

### II 3 Effets des perturbations extérieures sur les matériaux III-V :

En raison de l'importance des III-V pour la conception des dispositifs optoélectroniques, on s'est intéressé aux effets des perturbations extérieures (température, pression) sur leurs paramètres caractéristiques (constante de réseau, gap d'énergie...). Plusieurs modèles ont été proposés tels celui de VARSHNI, pour étudier l'effet de température et l'équation de Monaghan pour mettre en évidence l'effet de pression sur le gap de ces matériaux [26].

#### II 3.1 Effet de la température sur les III-V :

Le paramètre de réseau des III-V est influencé par l'effet de la température selon l'équation de Varshni [5].

D'après l'équation (I.1).

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta}$$

#### II 3.2 L'effet de la pression :

Sous l'effet de pression, les écarts d'énergie entre les bandes de valence et de conduction sont considérables, et les gaps d'énergie présentent, en fonction de la pression, une variation quadratique de la forme [26].

$$E(p) = E_g(0) + \frac{dE_g}{dP} \cdot P + \frac{d^2E_g}{dP^2} \cdot P^2 \quad (II.3)$$

Où :

- $E_g(P)$  et  $E_g(0)$  sont les gaps d'énergie sous pression normale et sous pression nulle.
- $\frac{dE_g}{dP}$  le coefficient de pression linéaire.
- $\frac{d^2E_g}{dP^2}$  le coefficient de pression quadratique.

## II 4 Les avantages des semi-conducteurs III-V :

Les principaux avantages des semi-conducteurs III-V sont les suivants :

1. Propriété semi-isolant permet la fabrication des circuits intégrés hyperfréquences.
2. Ils résistent aux radiations.
3. Ils ont une capacité de travailler à des températures plus importantes que celle du silicium, ce qui est important pour les applications militaires.
4. Performances vitesse et consommation nettement supérieure à celles des calculateurs utilisant des circuits en silicium (applications numériques).
5. Très grand domaine de fréquences couvert puisqu'il s'étend de 1Ghz à plus de 100Ghz.

La filière des composés III-V est la seule filière hyperfréquence dont la technologie soit actuellement mature pour des réalisations au niveau industriel. Cette maturité et son développement ont donc permis d'aboutir à des coûts de production abordables, qui restent cependant largement supérieurs à ceux de la filière silicium (les composants à base de silicium sont actuellement limités à une fréquence inférieure à quelque Giga Hertz).

Les composés III-V sont donc parfaitement appropriés à la réalisation de circuits hyperfréquences [27].

## II 5 les paramètre des matériaux :

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

Les liaisons entre les atomes III et les atomes V sont essentiellement de nature covalente (donc faiblement ionique) et les orbitales sont hybridées de type  $sp^3$ [34]. L'alliage ternaire  $In_{1-x}Ga_xAs$  est réalisé par substitution aléatoire des atomes III (In et Ga) à l'intérieur du sous réseau d'éléments III. Ainsi la formation d'un tel alliage conserve la structure cristalline initiale Zinc-Blende.

InGaAs et GaAsP est un SC à gap direct. Dans ce matériau, les transitions entre bandes de valence et de conduction sont le plus souvent radiatives et donc bien adaptées pour l'émission de lumière.

On peut remarquer La bande interdite de l' $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  et GaAsP non contraint suit une dépendance parabolique avec  $x$  suivant la relation :

$$E_g(x) = A + B \cdot x - C \cdot x \cdot (1 - x) \quad (\text{II.4})$$

Nous trouvons dans la littérature plusieurs valeurs très proches de A, B et C calculées à l'aide des gaps de l'InAs, du GaAs et d'un ternaire connu. Je donne à titre d'exemple [35, 36] :

$$E_g 4K(x) = 0.418 + 1,0997x - 0,5212x \cdot (1 - x) \quad (\text{II.4.1})$$

$$E_g 300K(x) = 0.354 + 1,0665x - 0,5017x \cdot (1 - x) \quad (\text{II.4.2})$$

Par exemple l'arséniure de gallium et phosphure de gallium sont des matériaux indispensables pour les applications optoélectroniques et microélectronique, sont des matériaux semi-conducteurs III-V à gap direct et indirect successivement, cristallisant généralement selon la structure zinc blende, le tableau II-1 résume quelques paramètres pour le GaAs et GaP.

Nom	Symbole	Unités	GaAs	GaP
<b>Structure cristalline</b>	–	–	Zinc blende	Zinc blende
<b>Structure de bande (gap)</b>	–	–	Direct	Indirect
<b>Energie de bande interdite</b>	$E_g$	eV	1.424	2.27
<b>Densité effective d'état dans la bande de conduction</b>	$N_c$	$cm^{-3}$	4.25E +17	1.76E +18
<b>Densité effective d'état dans la bande de valence</b>	$N_v$	$cm^{-3}$	8.16E+18	8.87E+18
<b>Mobilité des électronique</b>	$\mu_n$	$C_m^2.V^{-1}.S^{-1}$	8000	300
<b>Mobilité des trous</b>	$\mu_p$	$C_m^2.V^{-1}.S^{-1}$	400	100
<b>Affinité électronique</b>	$\chi$	eV	4.07	4
<b>Permittivité</b>	$\epsilon$	-	12.91	11.1

Tableau II-1 : les paramètres des matériaux de GaAs et GaP [37].

## II 6 Les matériaux :

Un semiconducteur utilise notamment pour réaliser des composants micro-ondes et des composants opto-électronique, des diodes électroluminescentes dans l'infrarouge ou des cellules photovoltaïques, il possède une structure cristalline de type Zinc-blende.

Le GaP et GaAs et InAs est un matériau semiconducteur compose du phosphore et de gallium, et de l'arséniure de gallium, et de l'arséniure d'indium cardinalement.

L'arséniure d'indium et de gallium InGaAs a connu un intérêt croissant dans ces dernières décennies. Vu que son gap et son paramètre cristallin peuvent être varies systématiquement par le choix de composition de l'alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , il presente des multiples applications par exemple l'alliage ternaire  $\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$  prépare par epitaxie.ete employé comme couche active dans les lasers et des détecteurs photoélectrique. Ainsi, il est utilisé comme détecteur de rayonnement dans le système de télécommunication optique en outre. C'est un très bon candidat pour les transistors à grande vitesse [38]. Il est couramment préparé sur des substrat d'InP (phosphore d'indium).

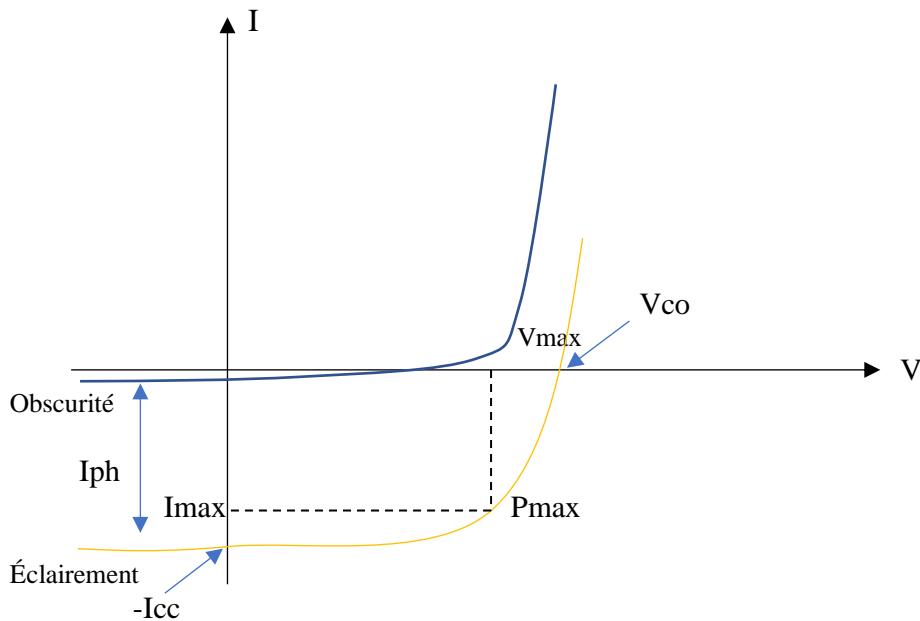
Pour la cellule solaire triple jonction, L'InGaAs est implanté comme sous cellule du milieu puer couvrir la partie du spectre entre 450-900nm.

## II 7 grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

À partir de la caractéristique  $I(V)$  sous éclairément illustrée au-dessous dans la figure II-1, on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs [39] ;  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_{max}$  et  $V_{max}$  :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{n \cdot V_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

- $I_{ph}$  : densité de photo-courant( A m-2)
- $I_s$  : courant de saturation (A)
- $R_{sh}$  : résistance parallèle ( $\Omega$ )
- $R_s$  : résistance série( $\Omega$ )
- $V_{th}$  : le potentiel thermique en Volt (V)
- $n$  : le facteur de qualité



**Figure II-1 :** Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque ; à l'obscurité et sous éclairage [2].

### II 7.1 courants de court-circuit $I_{cc}$ :

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ( $V=0$ ). D'où, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (II.5), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{I_{cc} \cdot R_s}{n \cdot V_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_{sh}}. \quad (II.6)$$

Pour la plupart des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme  $I_s \left( \exp \left( \frac{I_{cc} \cdot R_s}{n \cdot V_{th}} \right) - 1 \right)$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx I_{ph} \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right). \quad (II.7)$$

Dans le cas idéal [2] ( $R_s \rightarrow 0$  et  $R_{sh} \rightarrow \infty$ ) ou dans le cas approximatif suivant :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \Rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1. \quad (II.8)$$

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  se confond avec le photo courant  $I_{ph}$  :

$$I_{cc} \approx I_{ph}. \quad (II.9)$$

### II 7.2 Tension en circuit ouvert $V_{co}$ :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

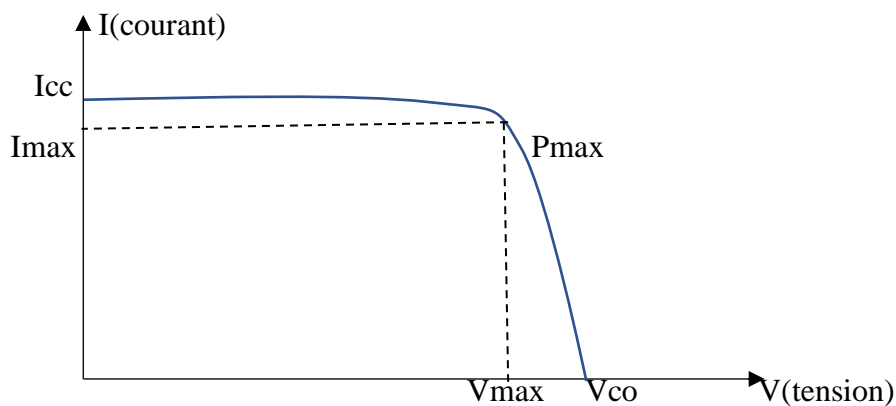
$$V_{co} = n \cdot V \log \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right). \quad (II.10)$$

### II 7.3 points du fonctionnement Pmax (Vmax, Imax) :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (II.11)$$

Elle traduit sur la caractéristique I(V) le point du fonctionnement Pmax (Vmax, Imax) qui est situé au coude de la caractéristique I(V) et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension Vmax et du courant Imax appelées également tension et courant maximums respectivement. (Figure II-2).



**Figure II-2** : Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.

### II 7.4 facteurs du forme FF :

Le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini [39] comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ) ; d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (II.12)$$



Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance  $P_{max}$  sera égale à  $(I_{cc} \times V_{co})$ . Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre, s'appelle le rendement  $\eta$ .

### II 7.5 rendements $\eta$ :

Il est défini [30] comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si : « S » est la surface de la cellule (en  $m^2$ ) et « E » est l'éclairement -irradiante (en  $W/m^2$ ) le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \times E} \quad (II.13)$$

Ou d'après (II.12) :  $P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (II.14)$$

Ce rendement est souvent mesuré dans les conceptions de référence, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1kW.m^{-2}$ , à une température de  $25^\circ C$  et sous un spectre AM1.5, Ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Condition [2].

### II 8 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en électricité. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [2] :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires (électron/trou) dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires (électron/trou) créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. D'autres structures, comme hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photos porteuses auront un comportement différent suivant la région :

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

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

---

## CHAPITRE 3

### *Résultat de la simulation*

---

### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation d'une cellule solaire triple jonction à base de semi-conducteur III-V, GaAsP/GaAs/InGaAs. Nous avons étudié les différents paramètres de la cellule solaire afin d'obtenir un meilleur rendement. La figure III montre la structure de la cellule à 3 jonctions GaAsP/GaAs/InGaAs dans cette simulation est effectuée à l'aide de deux logiciels de simulation SILVACO\_TCAD et MATLAB [39].

Dans une première étape nous avons simulé l'énergie de la bande interdite et le paramètre de maille en utilisant logiciel MATLAB. Ensuite nous avons utilisé le logiciel SILVACO\_TCAD pour obtenir l'influence de concentration de phosphore et d'indium sur divers paramètres de la cellule solaire.

#### 3.1.1 La structure de la cellule :

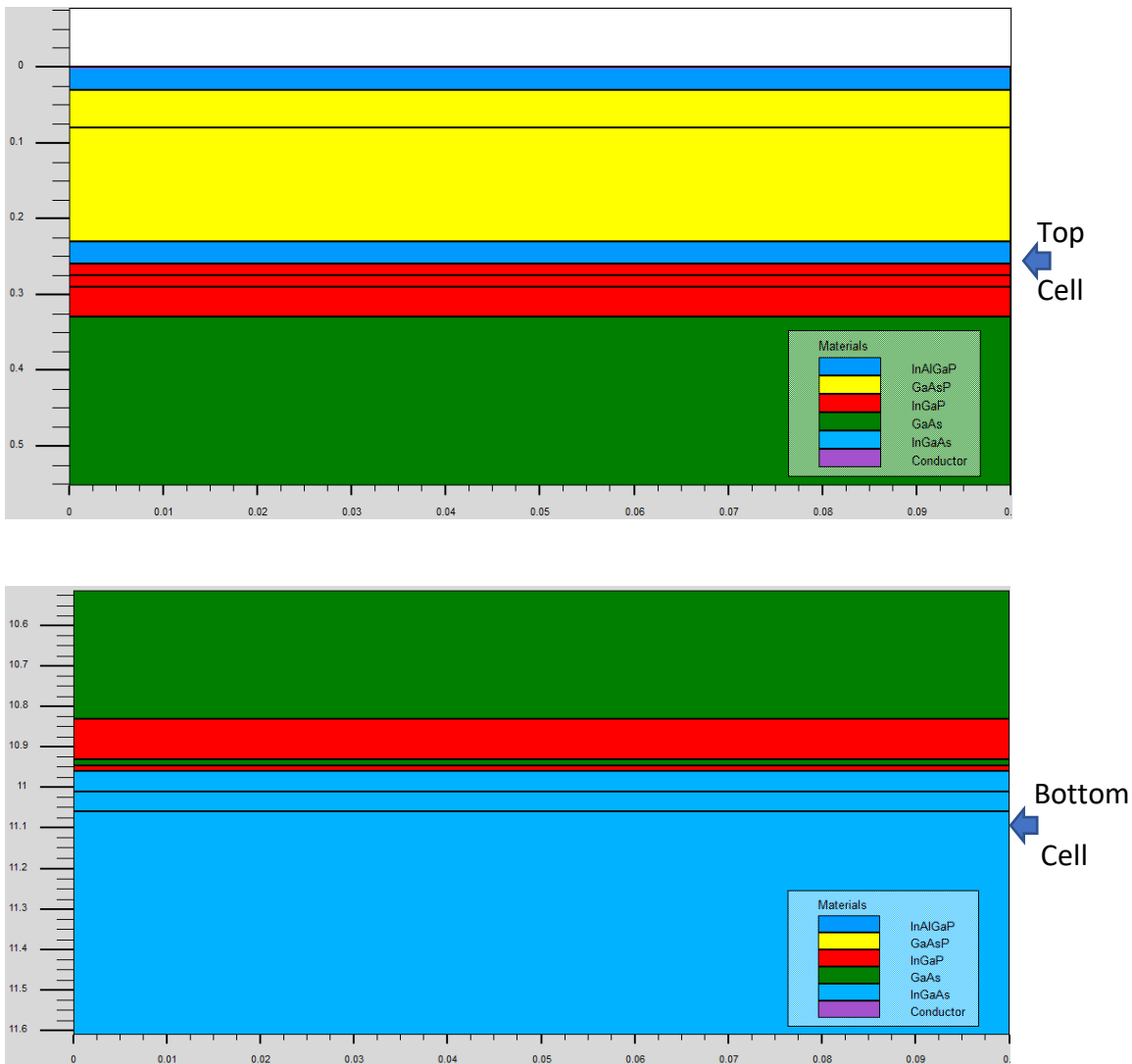


Figure III : Structure de la cellule à 3 jonctions GaAsP/GaAs/InGaAs.

Les paramètres de la cellule de référence sont donnés dans le tableau suivant :

Cellule	Couche	Composition	Epaisseur (nm)	Carrier concentration(cm <sup>-3</sup> )
Top cell	Emitteur	p <sup>+</sup> -GaAsP	50	2×10 <sup>18</sup>
	Base	n-GaAsP	150	1×10 <sup>18</sup>
Tunnel cell	Emitteur	n <sup>+</sup> -InGaP	15	5×10 <sup>19</sup>
	Base	p <sup>+</sup> -InGaP	15	3×10 <sup>19</sup>
Middle cell	Emitteur	p <sup>+</sup> -GaAs	500	2×10 <sup>18</sup>
	Base	n-GaAs	10000	2×10 <sup>17</sup>
Tunnel cell	Emitteur	n <sup>+</sup> -GaAs	15	5×10 <sup>19</sup>
	Base	p <sup>+</sup> -InGaP	15	3×10 <sup>19</sup>
Bottom cell	Emitteur	p <sup>+</sup> -InGaAs	100	2×10 <sup>18</sup>
	Base	n-InGaAs	10000	1×10 <sup>17</sup>

Tableau III : Conception de la cellule GaAsP/GaAs/InGaAs.

### 3.2 Simulation avec le logiciel MATLAB :

Pour la détermination de paramètre de maille nous avons utilisé loi de Végard. Le paramètre de maille des matériaux ternaires GaAsP et InGaAs sont calculés par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 P(x) &= x.P(GaP) + (1 - x).P(GaAs) \\
 \text{Et} \quad P(x) &= x.P(InAs) + (1 - x).P(GaAs)
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

### 3.3 Energie de bande interdite (gap) :

A partir des énergies interdites des composés binaires GaAs et GaP et InAs, il est possible de déterminer l'énergie de la bande interdite des matériaux ternaires GaAsP et InGaAs en utilisant la loi de Vegard avec le paramètre de courbure (Bowling).

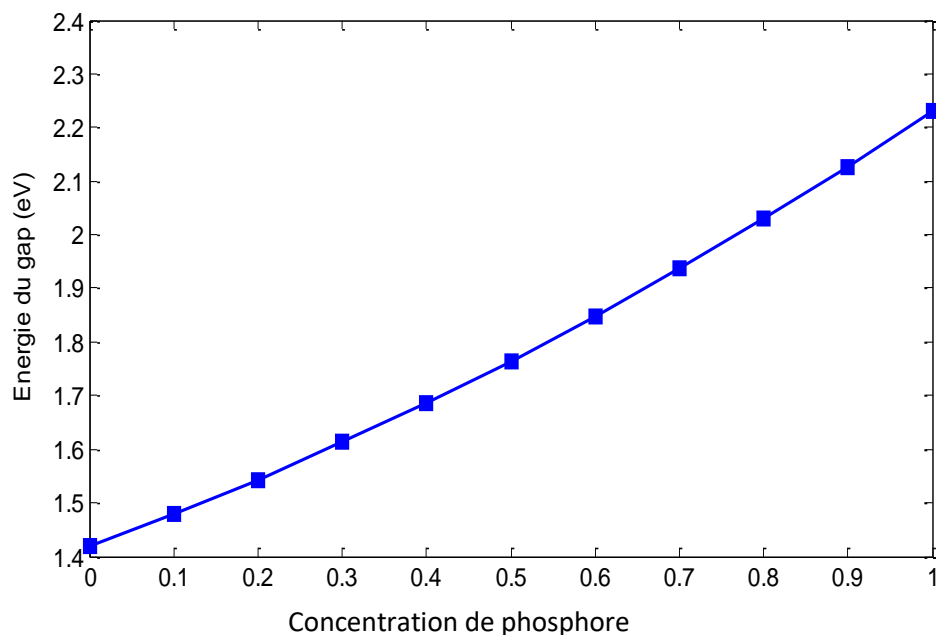
$$Eg(GaAsP) = x.Eg(GaP) + (1 - x).Eg(GaAs) - b.x.(1 - x) \tag{III.2}$$

$$Eg(InGaAs) = x.Eg(InAs) + (1 - x).Eg(GaAs) - b.x.(1 - x) \tag{III.3}$$

Avec:

- X : la concentration de phosphore dans le GaAsP et InGaAs [s.d].
- B : paramètre de courbure (bowing) [eV].
- $E_g$  (GaAsP) : le gap d'énergie du GaAsP [eV].
- $E_g$  (InGaAs) : le gap d'énergie du InGaAs [eV].
- $E_g$  (GaAs) : le gap d'énergie du GaAs [eV].
- $E_g$  (GaP) : le gap d'énergie du GaP [eV].
- $E_g$  (InAs) : le gap d'énergie du InAs [eV].

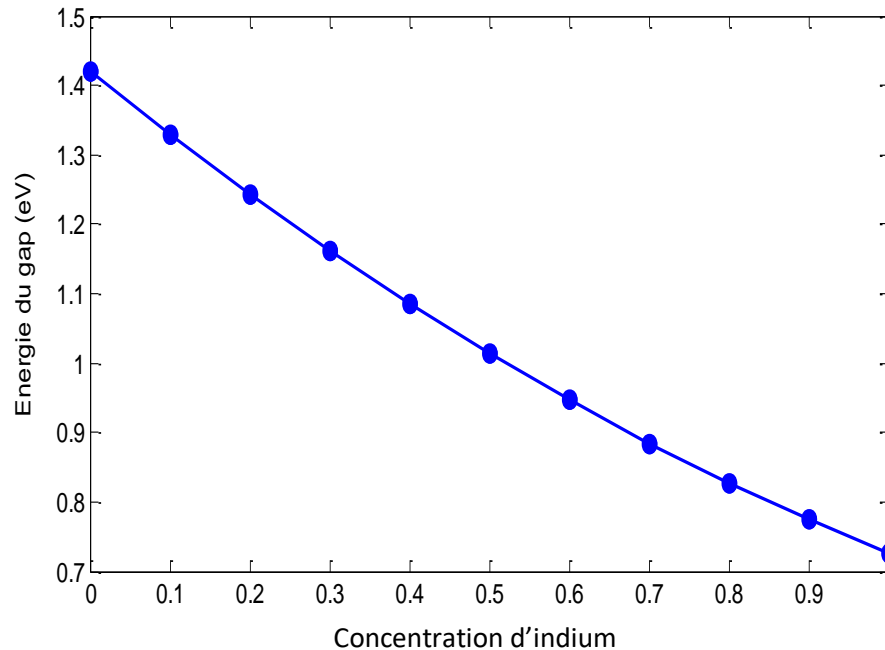
Les courbes de les figure III-1 et III-2 illustre la variation de l'énergie de gap en fonction de la concentration de phosphore et d'indium en utilisant l'expression 1 et 2 avec paramètre de courbure (bowing)  $b=0.24$ .



**Figure III-1** : Variation de l'énergie du gap en fonction de la concentration de phosphore.

- Cette La figure III.1 montre la variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la concentration de phosphore P. Nous constatons que l'augmentation de la concentration P cause une augmentation de l'énergie de la bande interdite. Lorsque la concentration P varie de 10% à 100% l'énergie de la bande interdite 1.48 à 2.22 eV.

Cette structure nous permet d'absorber les photons qu'ont une énergie supérieure à l'énergie de matériau GaAs.



**Figure III-2 :** Variation de l'énergie du gap en fonction de la concentration d'indium.

- La figure III.2 montre l'effet de la concentration d'indium In sur l'énergie de la bande interdite  $E_g$  de semiconducteur InGaAs. Nous constatons que l'augmentation de la concentration de d'indium induit une réduction importante de l'énergie de la bande interdite. Lorsque la concentration In varie de 10 à 100% 1.42 à 0.73 eV, l'énergie de la bande interdite diminue de 1.33 à 0.70eV. Cette nous permet d'absorber les photons qu'ont une énergie inférieure l'énergie de la bande interdite de GaAs c'est-à-dire on peut récupérer les photons qui ne sont pas absorber par les deux cellules supérieures.

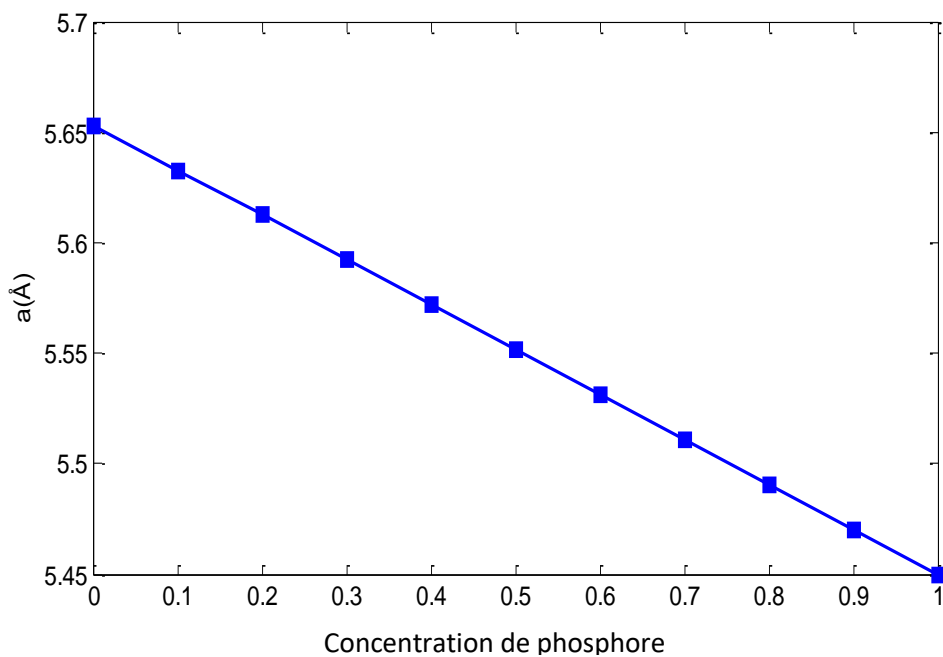
### 3.4 Le paramètre de maille :

D'après la définition du paramètre de maille vu en premier chapitre, sa variation obéit à la loi linéaire de Vegard donc, le paramètre de maille d'un alliage GaAsP non contraint est déterminé par la loi linéaire de Vegard en fonction de la concentration de phosphore et des paramètres de maille de composés binaires non contraints GaAs et GaP InAs :

	GaAs	GaP	InAs
a (Å)	5.653	5.45	6.0583

Nous avons utilisé la loi de Vegard l'équation (III.1) pour le calcul du paramètre de maille :

Les figure III-3 montre la variation du paramètre de maille de matériau GaAsP en fonction de la concentration de phosphore. On constate que l'augmentation de la concentration de phosphore provoque une diminution importante de paramètre de maille. On peut déterminer la concentration de phosphore afin de minimiser l'effet de la déformation de la structure sur la stabilité de composant.

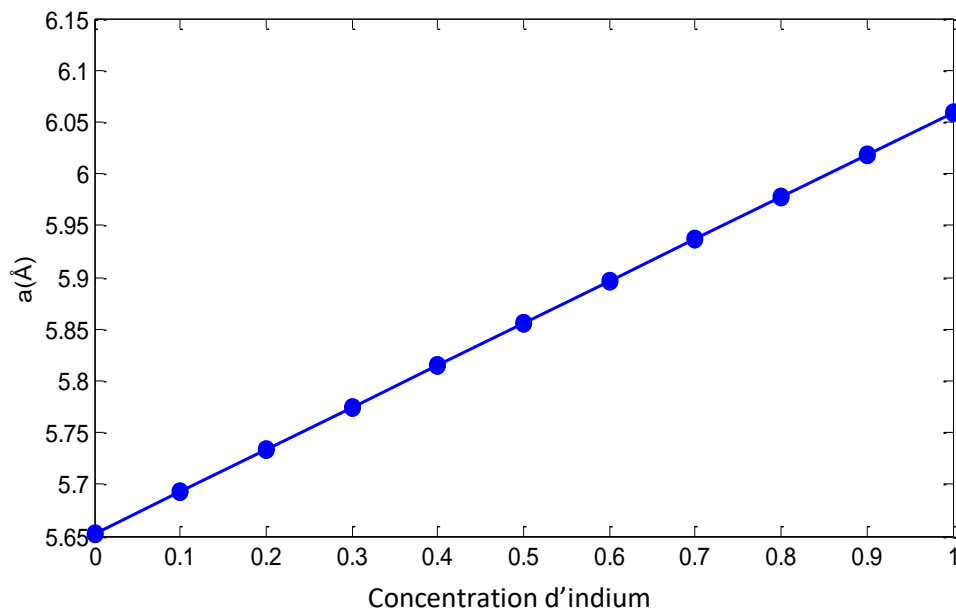


**Figure III-3 :** Variation du paramètre de maille en fonction de la concentration de phosphore.

- La figure III.4 présente l'évolution de paramètre de maille de la structure InGaAs en fonction de la concentration d'indium In. L'accroissement de la concentration de In impose une augmentation de paramètre de maille. Par exemple si on varie la concentration de In de 10% à 90% on a une diminution de 2.86%. Cette simulation



nous permet de fixer la concentration de In afin d'éviter l'instabilité et la dislocation de la structure. Pour assurer la fiabilité et la stabilité de la structure de la cellule à triple jonction on doit trouver un compromis entre les deux concentrations In et P.

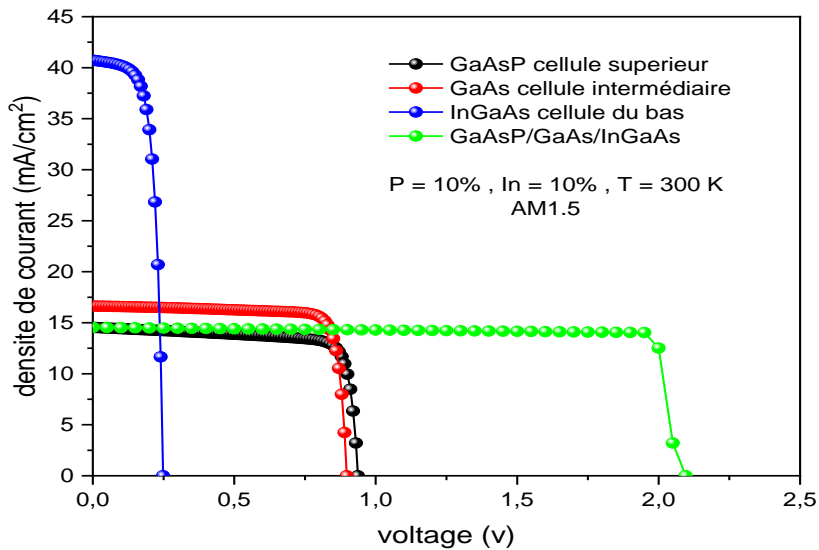


**Figure III-4** : Variation du paramètre de maille en fonction de la concentration d'indium.

### 3.5 Simulation avec le logiciel SILVACO-ATLAS :

#### 3.6 Caractéristique courant-tension I(V) :

La figure III-5 représente l'évolution de caractéristique densité du courant-tension J(V) de trois cellules et de la cellule globale. On remarque la densité de court-circuit est proche du courant on a fixé l'indium et le phosphore à 10% et sous éclairement.

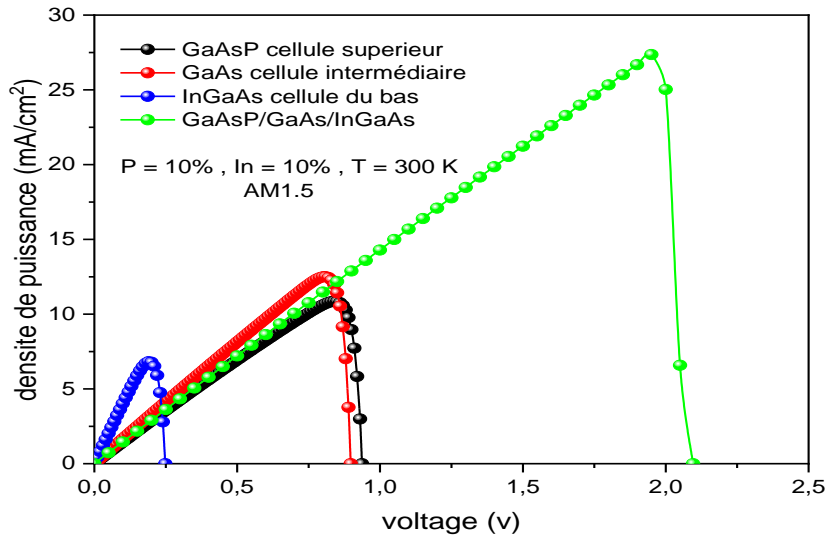


**Figure III-5** : caractéristique courant-tension I(V) de la structure GaAsP/GaAs/InGaAs.pour différentes cellules.

On constate que Le Energie de gap augmente le  $V_{co}$  augmente et le courant de court-circuit diminue comme les matériaux ternaire (GaAsP, InGaAs) et la tension de circuit ouvert augmente pour la somme des cellules à 3 jonctions jusque-là valeur maximal  $V_{co}=2,09v$ .

#### 3.7 Caractéristique puissance-tension P(v) :

La figure III-6 représente l'évolution de caractéristique puissance-tension P(V) pour différentes cellules. La puissance P fournie par une cellule solaire est le produit du courant et de la tension.



**Figure III-6 :** caractéristique puissance-tension P(V) de la structure GaAsP/GaAs/InGaAs. Pour différentes cellules.

Ces courbes présentent des maximums correspondants aux puissance maximales Pmax. On constate qu'il y a une augmentation de la puissance délivrée, la même chose pour la tension avec l'augmentation de puissance à 3 jonctions d'une valeur maximale à ( $P=21,13\text{mW}/\text{cm}^2$ ).

Le tableau suivant on va résumer les caractéristiques de la cellule :

	InGaAs	GaAs	GaAsP	GaAsP/GaAs/InGaAs
Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	40,7357	16,63	14,5459	14,5459
Voc (V)	0,248776	0,897704	0,93702	2,0835
FF (%)	67,2881	83,7789	79,674	69,75283142
$\eta$ (%)	6,81902	12,5072	10,8594	21,13956

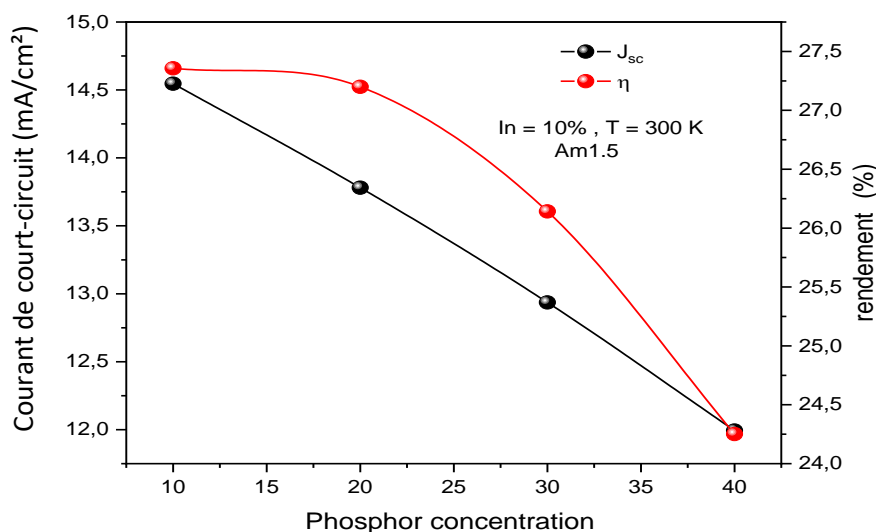
Tableau III-1 : Les caractéristiques de la cellule pour In = 10% et P = 10 %.

### 3.8 L'effet de la concentration de phosphore :

#### 3.8.1 Courant de court-circuit et rendement :

La figure III-7 représente le courant de court-circuit et le rendement en fonction de concentration de phosphore, on constate que le courant de court-circuit diminué avec le

nombre de concentration insère, en outre, il y a diminution de rendement avec une valeur maximal pour 10% de concentrations de phosphore le rendement est 27,35%.



**Figure III-7 :** Courant de court-circuit et rendement en fonction de concentration de phosphore.

Le tableau suivant récapitule tous les paramètres caractéristiques de la cellule (GaAsP/InGaAs/GaAs) selon la variation de la concentration de phosphore :

	Tr_junction P=10%	Tr_junction P=20%	Tr_junction P=30%	Tr_junction P=40%
Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	14,5459	13,7811	12,9364	11,9935
Vco (I)	2,0835	2,146362	2,21442	2,27452
FF (%)	81,6613	91,95716248	91,25630655	88,89920803
η (%)	27,35616	27,20022	26,14185	24,25122

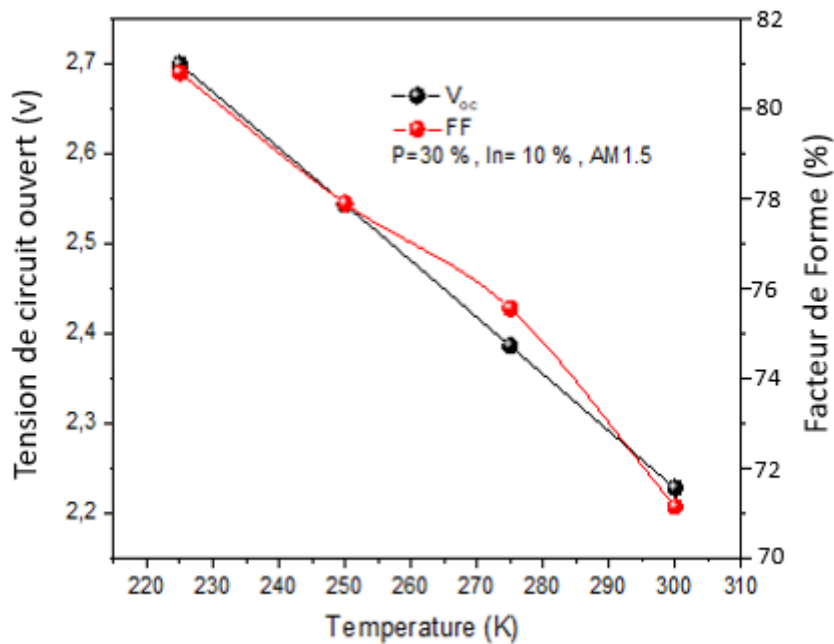
Tableau III-2 : Les caractéristiques de la cellule pour In = 10% et pour différente concentration du Phosphore.

### 3.9 Influence de la température :

#### 3.9.1 La tension de circuit ouvert et facteur de forme :

Dans cette partie du travail, nous montrons l'effet ou l'influence de la température sur les paramètres caractéristique de la cellule solaire étudiée pour In = 10% P= 30% et pour différents

température, les effets de la température sur les paramètres de la cellule solaire tels que la densité du courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme et le rendement de la structure GaAsP/InGaAs/GaAs sont calculés et illustrés dans le tableau III-3 et figure III-8 après la simulation nous trouvons que la simulation et donne la meilleure performance. La figure III-8 représente l'influence de la température, la variation tension de circuit ouvert et le facteur de forme pour différentes températures.



**Figure III-8** : l'influence de la température sur la variation tension de circuit ouvert et le facteur de forme de la structure InGaAs/GaAsP/GaAs pour différentes températures.

La température est un facteur ou paramètre qui peut affecter les propriétés électriques des cellules solaires [40]. On observe que La figure III-8 représente la tension de circuit ouvert et le facteur de forme en fonction de température on constate que le circuit ouvert diminue avec l'augmentation le nombre de température, pour 225K de la température le maximum de valeur 2,698v. On même temps le facteur de forme diminue légèrement avec l'augmentation de température, avec une meilleure valeur d'une (225K, 80.36%).

Dans un tableau suivant en va résumer Les paramètres caractéristiques de la cellule pour  $I_n = 10\%$ ,  $P = 30\%$  et pour différente température :

GaAsP/GaAs/InGaAs	225K	250K	275K	300K
Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	14,1934	14,1661	14,1373	14,202
Vco (I)	2,69871	2,542959	2,385741	2,227478
FF (%)	80,3659515	77,4004161	75,7318794	71,0125081
$\eta$ (%)	30,78327	27,88258	25,5428	21,13956

Tableau III-3 : Les paramètres caractéristiques de la cellule (GaAsP/GaAs/InGaAs) selon de la température.

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présente des résultats de simulation d'une cellule solaire à 3 jonctions GaAsP/GaAs/InGaAs, principalement consacrée à la détermination des niveaux de concentration de phosphore et pour les différents paramètres de la cellule. On a approuvé dans la première partie à la cellule solaire à 3 jonctions et la concentration  $x=0,3$  qui donne un meilleur rendement, nous avons aboutis aux résultats cités ci-dessous :

- ✓ La cellule à 3 jonctions qui donne meilleure performance.
- ✓ L'effet de l'augmentation de la température sur les différents paramètres de la cellule, de telle sorte que les performances de la cellule solaire dépendent fortement de la température, la diminution de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert avec l'augmentation de la température.

---

## *Conclusion générale*

---

## Conclusion générale

Les travaux présentes dans ce projet sont basés sur les photovoltaïques pour les matériaux GaAsP/GaAs/InGaAs.

L'utilisation de l'outil de simulation SILVACO-TCAD et MATLAB nous a permis à travers la mesure de la caractéristique (I-V) de la cellule d'obtenir les différentes caractéristiques à savoir : le courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion  $\eta$ .

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par une étude générale des semi-conducteurs et les propriétés matériaux semi-conducteurs III-V.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié des matériaux binaire et ternaire et les différents paramètres caractérisant les cellules solaires.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons effectué notre simulation, premièrement, nous avons étudié l'influence de la concentration de phosphore sur les différents paramètres de la cellule et nous avons étudié l'influence de la température pour différents paramètres de la cellule, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La cellule GaAsP/GaAs/InGaAs à 3 jonctions donne le meilleur rendement.
- ✓ L'effet de l'augmentation de la température sur les différents paramètres de la cellule, de telle sorte que les performances de la cellule solaire dépendent fortement de la température, la diminution de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert avec l'augmentation de la température.



---

# *Annexe*

---

**Annexe**

# A. Efficacité des cellules photovoltaïques :

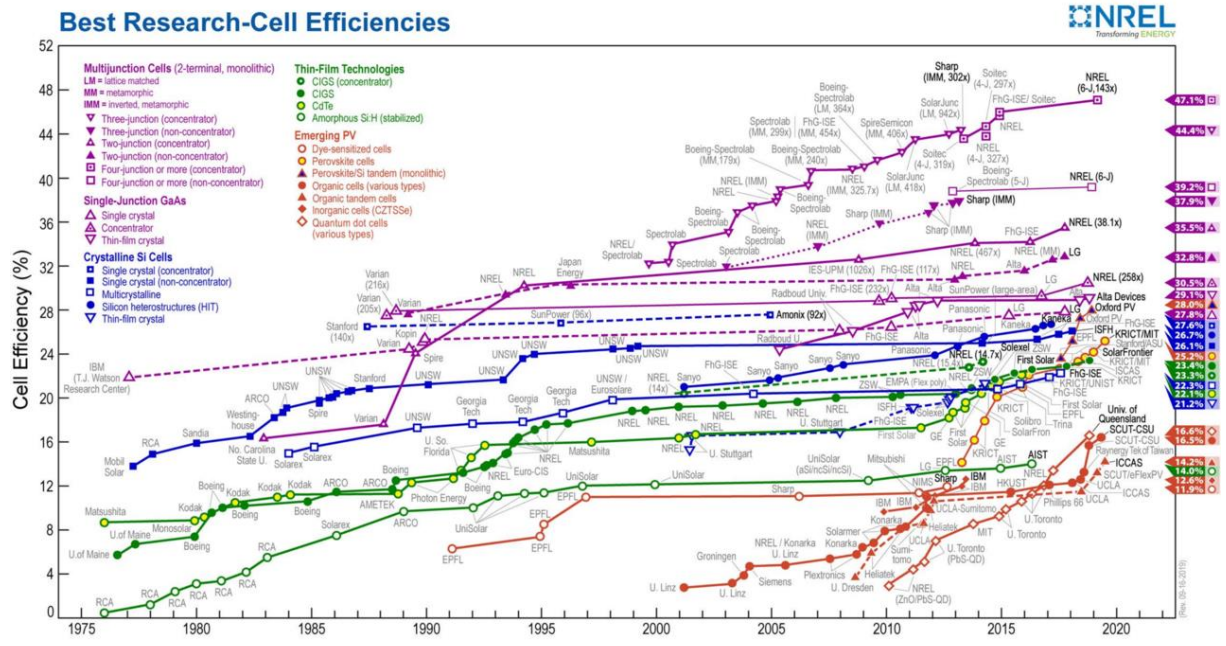


Figure A : efficacité des cellules photovoltaïques.

# B. Tableau périodique :

## TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

1 <b>H</b> HYDROGÈNE 1.0079																	2 <b>He</b> HELIUM 4.0026
3 <b>Li</b> LITHIUM 6.941	4 <b>Be</b> BERYLLIUM 9.0122	Non-métaux Métaux alcalins Métaux alcalin-terreux Métaux de transitions										5 <b>B</b> BORE 10.811	6 <b>C</b> CARBONE 12.011	7 <b>N</b> AZOTE 14.007	8 <b>O</b> OXYGÈNE 15.999	9 <b>F</b> FLUORINE 18.998	10 <b>Ne</b> NEON 20.1797
11 <b>Na</b> SODIUM 22.9897	12 <b>Mg</b> MAGNÉSIIUM 24.305	Métaux pauvres Métalloïdes Halogènes Actinide										13 <b>Al</b> ALUMINIUM 26.981	14 <b>Si</b> SILICIIUM 28.085	15 <b>P</b> PHOSPHORE 30.974	16 <b>S</b> SULFURE 32.066	17 <b>Cl</b> CHLORINE 35.453	18 <b>Ar</b> ARGON 39.948
19 <b>K</b> POTASSIUM 39.098	20 <b>Ca</b> CALCAIUM 40.078	21 <b>Sc</b> SCANDIUM 44.955	22 <b>Ti</b> TITANE 47.867	23 <b>V</b> VANADIUM 50.9415	24 <b>Cr</b> CHROME 51.9961	25 <b>Mn</b> MANGANÈSE 54.938	26 <b>Fe</b> FER 55.845	27 <b>Co</b> COBALT 58.933	28 <b>Ni</b> NICKEL 58.6934	29 <b>Cu</b> CUIVRE 63.546	30 <b>Zn</b> ZINC 65.38	31 <b>Ga</b> GALLIUM 69.723	32 <b>Ge</b> GERMANIUM 72.63	33 <b>As</b> ARSENIC 74.921	34 <b>Se</b> SÉLIUM 78.971	35 <b>Br</b> BROMURE 79.904	36 <b>Kr</b> KRYPTON 83.796
37 <b>Rb</b> RUBIDIUM 85.467	38 <b>Sr</b> STRONTIUM 87.62	39 <b>Y</b> YTRIUM 88.9058	40 <b>Zr</b> ZIRCONIUM 91.224	41 <b>Nb</b> NIOBIUM 92.9063	42 <b>Mo</b> MOLYBDÈNE 95.95	43 <b>Tc</b> TECHNETIUM 98	44 <b>Ru</b> RUTHÈNIUM 101.07	45 <b>Rh</b> RHODIUM 102.905	46 <b>Pd</b> PALLADIUM 106.42	47 <b>Ag</b> ARGENT 107.8682	48 <b>Cd</b> CADMIUM 112.414	49 <b>In</b> INDIUM 114.818	50 <b>Sn</b> ÉTAIN 118.710	51 <b>Sb</b> ANTIMOINE 121.760	52 <b>Te</b> TELLOURE 127.60	53 <b>I</b> IODINE 126.905	54 <b>Xe</b> XÉNON 131.29
55 <b>Cs</b> CÉSIIUM 132.905	56 <b>Ba</b> BARYUM 137.327	57-71* LANTHANE	72 <b>Hf</b> HAFNIUM 178.49	73 <b>Ta</b> TANTALE 180.94	74 <b>W</b> TUNGSTÈNE 183.84	75 <b>Re</b> RHÉNIUM 186.207	76 <b>Os</b> OSMIUM 190.23	77 <b>Ir</b> IRIDIUM 192.217	78 <b>Pt</b> PLATINE 195.084	79 <b>Au</b> OR 196.967	80 <b>Hg</b> MERCURE 200.59	81 <b>Tl</b> THALLIUM 204.38	82 <b>Pb</b> PLOMB 207.2	83 <b>Bi</b> BISMUTH 208.98	84 <b>Po</b> POLONIUM 209	85 <b>At</b> ASTATINE 210	86 <b>Rn</b> RADON 222
87 <b>Fr</b> FRANCIUM 223	88 <b>Ra</b> RADIUM 226	89-103** ACTINOÏDES	104 <b>Rf</b> RUFORMIUM 261	105 <b>Db</b> DUBNIUM 262	106 <b>Sg</b> SEABORGIUM 263	107 <b>Bh</b> BOHRIIUM 264	108 <b>Hs</b> HASSIUM 265	109 <b>Mt</b> MEITNERIUM 266	110 <b>Ds</b> DARMSTADTIUM 267	111 <b>Rg</b> ROENTGENIUM 268	112 <b>Cn</b> COPECERNIUM 269	113 <b>Uut</b> UNUNTRIUM 270	114 <b>Fl</b> FLÉROVMIUM 271	115 <b>Uup</b> UNUNPENTIUM 272	116 <b>Lv</b> LIVERMORIUM 273	117 <b>Uus</b> UNUNSEPTIUM 274	118 <b>Uuo</b> UNUNOCTIUM 274
* 57 <b>La</b> LANTHANE 138.9055, 58 <b>Ce</b> CÉLIUM 140.116, 59 <b>Pr</b> PRASÉODIUM 140.9077, 60 <b>Nd</b> NÉODYME 144.242, 61 <b>Pm</b> PROMÉTHIUM 145, 62 <b>Sm</b> SAMARIUM 150.36, 63 <b>Eu</b> EUROPIUM 151.964, 64 <b>Gd</b> GADOLINIUM 157.25, 65 <b>Tb</b> TERBIUM 158.925, 66 <b>Dy</b> DYSPROSIUM 162.500, 67 <b>Ho</b> HOLLMIUM 164.93, 68 <b>Er</b> ERBIUM 167.259, 69 <b>Tm</b> THULIUM 168.934, 70 <b>Yb</b> YTBRIUM 173.054, 71 <b>Lu</b> LUTÉCIUM 174.967																	
** 89 <b>Ac</b> ACTINIUM 227, 90 <b>Th</b> THORIUM 232.0377, 91 <b>Pa</b> PROTACTINIUM 231.0368, 92 <b>U</b> URANIUM 238.0289, 93 <b>Np</b> NEPTUNIUM 237, 94 <b>Pu</b> PLUTONIUM 244, 95 <b>Am</b> AMÉRICIUM 243, 96 <b>Cm</b> CURIUM 247, 97 <b>Bk</b> BERKÉLIUM 247, 98 <b>Cf</b> CALIFORNIUM 251, 99 <b>Es</b> ÉNSTENIUM 252, 100 <b>Fm</b> FERMIUM 257, 101 <b>Md</b> MENDELÉVIUM 258, 102 <b>No</b> NOBELIUM 259, 103 <b>Lr</b> LAWRENCIUM 262																	

Tableau B : tableau périodique des éléments.

## REFERENCES

- [A1] Almansouri, I; Ho-Baillie, A; Bremner, S.P; Green, M.A. Supercharging silicon solar cell performance by means of multijunction concept. IEEE.J. Photovolt. 2015,5,968
- [A2] Essig, S; Allebé, C; Remo, T ; Geisz, J.F; Steiner, M.A.; Horowitz, K; Barraud, L;Ward,J.S; Schnabel, M;Descoedres, A; et al Raising The one-sun conversion efficiency of III-V/Si solar cells to 32.8% for two junctions and 35.9% for three junctions Nat. Energy 2017,2,17144.
- [1] louazani Ahmed « Études des propriétés structurales élastiques et électroniques des semi-conducteur III-V GaAs, InP/PHYSIQUE DES MATÉRIAUX. », jeudi 29 Octobre 2015 Université Dr. Tahar Moulay de Saida -Algérie-
- [2] M. Boudehedj, « Étude des propriétés structurales et électriques des cellules Tandem III-V (multicouches : InGaP/GaAs) par simulation TCAD\_SILVACO/Modélisation et Caractérisation des Matériaux. », thèse de master, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem, Juin 2015.
- [3] Jamie E. VanDyke, «Modeling Laser Effects on Multi-Junction Solar Cells Using Silvaco Atlas Software for Spacecraft Power Beaming Applications», mémoire de master, Juin 2010.
- [4] B. Garcia Jr., « Indium Gallium Nitride Multi Junction Solar Cell Simulation Using Silvaco Atlas », mémoire de master, Juin 2007.
- [5] M. Belarbi, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités. », thèse de doctorat, université de Abdel Hamid Ibn badis, Mostaganem, 2016.
- [6] Periodic table of elements, 21 March 2007,<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/student-science-tech/>
- [7] B. Sullivan, «The Effect of Temperature on the Optimization of Photovoltaic Cells Using Silvaco Atlas Modeling», thèse de master, Septembre 2010
- [8]. Professeur accompagnateur : M. Dietschy/ / Les cellules photovoltaïques/ MORNAY Thomas Sup D VERNAY Alexis Sup D VOLLE Marion Sup D /Classes préparatoires CPE Institution des Chartreux Année 2004-2005
- [9] Y. Marouf, « Modélisation des cellules solaires en InGaN En utilisant Atlas Silvaco », mémoire de magister, Juin 2013.
- [10] F. Boudjerad, « Amélioration du rendement énergétique de cellules photovoltaïques en couches minces à base de CZTS », Mémoire de master, 2013.
- [11] F. Nemmar, « Etude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques », thèse de doctorat, 2013
- [12] S. Mostefa Kara, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de CIS et CIGS », mémoire de magister, Juin.
- [13] B. Lakehal, « Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky », mémoire de magister, 2009.
- [14] M. Belarbi, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités. », thèse de doctorat, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem, 2016.
- [15] M. MERAD BOUDIA, « Modélisation électro-optique et optimisation des cellules solaires organiques », thèse de doctorat, 2016
- [16] S. Selberher, «Analysis and simulation of semi-conductor devices», Wien, New York: Springer-Verlag, 1984. (S.d.)

- [17] A. Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes, thèse de doctorat, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem, 2017.
- [18] M. MERAD BOUDIA, « Modélisation électro-optique et optimisation des cellules solaires organiques », thèse de doctorat, 2016
- [19] Sylvain De Vecchi, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière », thèse de doctorat, Ecole Doctorale E.E.A de Lyon, 2013.
- [20] J. M. Olson, D.J. Friedman and S. Kurtz, «High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells», Handbook of photovoltaics Science and Engineering. John Wiley and Sons, 2003.
- [21] Thèse de Damien Bordel : Développement de nouveaux substrats compatibles pour l'hétéroépitaxie de semi-conducteurs [archive]
- [22] C. Kittel, « Physique de l'état solide », Ed. Dunod université (1983).
- [23] N. Bouarissa, Matter. Chem. Phys. 72 (2001) 387.
- [24] J.E. Bernard, A. Zunger, Phys. Rev. B36, 3199 (1987).
- [25] L. Vegard, Z. Phys. 5 (1921) 17.
- [26] H. Abid, thèse de doctorat 1997, Contribution à l'étude des propriétés électroniques et optiques, des alliages semiconducteurs de type III-V.
- [27] J. W. Matthews ET A. E. Blakeslee. Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations, J. Cryst. Growth, vol. 27, p. 118-125, déc. 1974.
- [28] Joonas hilska. Effect of growth parameters on the properties of GaAsBi Tampere. University of technology Master of Science Thesis, 68 pages, 0 Appendix pages May (2016).
- [29] Ghione, G. Semiconductor Devices for High-Speed optoelectronics, Politecnico Ditorino, Italy, Cambridge University Press, (2009).
- [30] Luc BÉAUR., Propriétés excitoniques de puits quantiques ZnO/ (Zn, Mg) O. thèse de doctorat, 2011, Information, Systèmes et Structures, Université de Montpellier 2, France.
- [31] J.M Bethoux, "Relaxation des Contraintes dans les Hétérostructures Epais (Al, Ga) n : une Piste Originale pour la Réalisation de Diodes Electroluminescentes à Cavité Résonante", Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, (2004).
- [32] Mickaël D. TESSIER. Thèse de Doctorat, Synthèse et spectroscopie optique de puits quantiques colloïdaux. ÉCOLE DOCTORALE : Physique et Chimie des Matériaux (ED397), (2013).
- [33] Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys, I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan (2001)
- [34] N.W. Ashcroft and N.D. Mermin, Physique des solides : EDP SCIENCES.
- [35] Ioffe institute database, Physical Properties of Semiconductors.
- [36] G. J. Davies, T. Kerr, C. G. Tuppen, B. Wakefield, and D. A. Andrews, The growth and characterization of nominally undoped Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As grown by molecular beam epitaxy. J. Vac. Sci. Technol. B, 1984. 2(2): 219.
- [37] atlas user manual: "DEVICE SIMULATION SOFTWARE". Santa Clara septembre 11.2014
- [38] S. Bacha, A. Bechiri, F. Benmakhlouf, N. Bouarissa, "Effects of substrate and compositional disorder upon optical and lattice vibration properties of quaternary semiconductor Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>", infrared physics & technology, Vol 63,2014, p,22
- [39] ATLAS User's Manuel, "device simulation software ". SILVACO International, California 2011

[40] Q. Deng, X. Wang, H. Xiao, C. Wang, H. Yin, H. Chen Q. Hou, D. Lin, J. Li Z. Wang, and X. Hou, " An investigation on InGaN/GaN multiple quantum well solar cell ", J. Phys. D. Appl. Pyhs, Vol. 44, no.26, p,265103,2011.