

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**  
**N° : 2017/ME/13/97/482**



**DOMAINE : Sciences Et Technologie**  
**FILIERE : Electronique**  
**OPTION : Micro électronique**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par :**

BELOUADAH Omar Farouk

**Intitulé**

Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque à  
base des semi-conducteurs III-V

**Soutenu devant le jury composé de:**

BOUANAKA Fawzi	Université de M'sila	Président
BENNACER Hamza	Université de M'sila	Encadreur
HADJAB Moufdi	CRTI-UDCMA-Sétif	Co-encadreur
BENDIB Toufik	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

## **Remerciements**

---

*Je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*J'exprime toute ma profonde gratitude, ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à **Mr. BENNACER Hamza**, docteur à l'université de M'sila, pour m'avoir encadré tout le long de mon travail, qui par ses enseignements et ses conseils a été un guide précieux dans l'élaboration de ce mémoire. Je veux remercier aussi le président et les membres de jury pour leur acceptation d'examiner mon travail. Et je remercie **Mr. ABDELLI Bouttaieb** attachée de recherche au niveau du centre de recherche en technologie des semi-conducteurs pour l'énergétique – Alger (CRTSE) qui m'aidera dans mon travail. Et je remercie le membre de jury **BOUANAKA Fawzi** et **BENDIB Toufik**.*

*Enfin, je remercie tous:*

*Mes collègues des études en micro-électronique pour leur soutien*

# Sommaire

---

Remerciement.....	I
Sommaire .....	II
Liste des figures .....	III
Liste des tableaux .....	VI
Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les semi-conducteurs III-V</b>	
I.1.Introduction.....	3
I.2. Les semi-conducteurs III-V.....	3
I.3. Les composés binaires III-V.....	4
I.4. Structure cristalline.....	5
I.5. Structure des bandes d'énergie des semi-conducteurs III-V.....	6
I.6. Propriétés optique.....	8
I.6.1. Indices de réfraction.....	8
I.6.2. Le coefficient d'extinction.....	9
I.6.3. Le coefficient d'absorption.....	10
I.7. Nature de la bande de conduction du matériau Ga(1-y)Al <sub>y</sub> As.....	11
I.8. conclusion.....	12
Bibliographie Chapitre I.....	12
<b>Chapitre II : Généralités sur les cellules photovoltaïques</b>	
II.1.Introduction.....	14
II.2. Rayonnement solaire.....	14
Fig. II.1.Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	15
II.3. La conversion photovoltaïque.....	16
II.3.1. L'effet photovoltaïque.....	16
II.3.2 Le principe de conversion photovoltaïque.....	16
II.3.3. La cellule solaire.....	17
II.4. Module photovoltaïque.....	18
II.5. La caractéristique courant tension et puissance tension.....	19
II.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	22
II.6.1 Les avantages.....	22
II.6.2 les inconvénients.....	23
II.7. Avenir du photovoltaïque.....	23
II.8. Conclusion.....	23

# Sommaire

---

Bibliographique chapitre II.....	25
<b>Chapitre III : Résultats et discussion</b>	
III.1. Introduction.....	27
III.2. Le simulateur PC1D.....	27
III.3. Optimisation des cellules.....	29
III.3.1. Présentation des cellules proposées.....	29
III.4. Optimisation des paramètres des structures proposées sur le rendement photovoltaïque	32
III.4.1. Optimisation de la structure A.....	32
III.4.1.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement.....	32
III.4.1.2. Influence de l'épaisseur de la base sur le rendement.....	33
III.4.1.3. Influence de dopage de l'émetteur sur le rendement.....	34
III.4.1.4. Influence du dopage de la base sur le rendement.....	34
III.4.2. Optimisation de la structure B.....	36
III.4.2.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement.....	36
III.4.2.2. Influence de l'épaisseur de la base sur le rendement.....	37
III.4.2.3. Influence du dopage de l'émetteur sur le rendement.....	38
III.4.2.4. Influence du dopage de la base sur le rendement.....	38
III.4.2.5. Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur le rendement.....	39
III.4.2.6. Influence du dopage de la couche BSF sur le rendement.....	40
III.5. Effet de la texturation.....	41
III.6. Conclusion.....	43
III.7. Références.....	43
Conclusion générale.....	44
Résumé .....	45

## Liste des figures

---

Fig .I.1 . Maille cristallin de la structure Zinc-blende.....	5
Fig. I.2. Structure de bande de GaAs.....	6
Fig. I.3. Bandes interdites des principaux composés III-V en fonction des paramètres cristallins...	7
Fig. I.4.Spectres $n(E)$ et $k(E)$ pour AlGaAs avec les neuf compositions, de gauche à droite lorsque $x$ augmente	9
Fig.I.5. coefficient d'absorption pour le GaAs.....	10
Fig. I.6. Spectre d'absorption optique du composé $Al_xGa_{1-x}As$ .....	11
Fig. II.1.Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	15
Fig.II.2. Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	17
Fig.II.3.Cellule en silicium monocristallin.....	18
Fig. II.4.Cellule au silicium polycristallin.....	18
Fig.II.5. Cellule en silicium amorphe (couche mince) .....	18
Fig .II.6. Evolution de constructions des systèmes de production PV.....	19
Fig.II.7. Processus d'absorption de la lumière dans un matériau.....	19
Fig.II.8. Structure d'une cellule photovoltaïque, ("Photo watt").....	20
Fig.II.9. Schéma de la densité de courant en fonction de tension pour une diode en obscurité et sous éclairement	21
Fig.II.10 Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.....	21
Fig.III.1. fiche des paramètres d'entrée pour chaque couches.....	26
Fig.III.2. L'interface du logiciel PC1D.....	27
Fig. III.3. Schéma de la structure 'A' proposée : une cellule photovoltaïque à base d'AlGaAs/GaAs/GaAs	27
Fig. III.5. Schéma de la cellule solaire à base d'AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF.....	29
Fig.III.11. Caractéristique (courant-puissance) en fonction de la tension pour la structure idéale AlGaAs/GaAs/GaAs	34
Fig.III.12. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement de la structure AlGaAs/GaAs/GaAs/BS	35
Fig III.13. Effet de l'Epaisseur de la base sur le rendement la structure AlGaAs/GaAs/GaAs.....	36
Fig.III.15.Influence du dopage de la base sur le rendement AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF.....	38
Fig.III.16.Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur le rendement AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF.....	39
Fig.III.19.Caractéristique courant-tension de la cellule solaire Avec texturation .et sans texturation....	42
Fig.III.20.Caractéristique courant-tension de la cellule solaire Avec texturation .et sans texturation....	43

## Liste des tableaux

---

Tableau I.1. Extrait de la classification périodique des éléments chimiques.....	3
Tableau I.2 : Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K.....	4
Tableau.I.3. Paramètres de la bande de conduction dans GaAs.....	7
Tableau. III.1. Epaisseur et dopage initiales des différentes couches formants la cellule PV (AlGaAs/GaAs/GaAs)	29
Tableau.III.2. Epaisseur et dopage des différentes couches de la cellule à hétérojonction (AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF).	31
Tableau.III.3. Les paramètres photovoltaïques obtenus de la structure.....	31
Tableau.III.4. Le paramètre idéal de l'épaisseur et le dopage de la structure A.....	35
Tableau.III.5. le paramètre idéal de l'épaisseur et le dopage de la structure B.....	40
Tab.III.6. Paramètres photovoltaïques de la structure A et B avec et sans texturation.....	43

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Les cellules solaires sont des dispositifs à semi-conducteur qui transfèrent la lumière en énergie électrique utilisable. Ces dispositifs ont été initialement étudiés dès 1839 par *Antoine-César Becquerel* qui a remarqué que si la lumière brillée sur des diodes cela induit un courant électrique. Cependant, une cellule solaire relativement efficace générant une quantité raisonnable de puissance n'a pas été créé jusqu'en 1954, *lorsque Chapin, Fuller et Pearson* ont développé une cellule solaire à base de silicium pour les laboratoires Bell (*Bell Labs*). Depuis la création de la première cellule solaire rentable, la recherche sur la technologie et l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires a augmenté rapidement. L'accent mis récemment sur l'utilisation des énergies renouvelables et le besoin de puissance dans les régions éloignées telles que l'espace a mis cette recherche dans le premier rang [1].

Plusieurs matériaux semi-conducteurs dans un environnement électronique approprié sont capables d'exposer des propriétés qui peuvent correctement être appelées « photovoltaïques », c'est-à-dire la production d'un courant électrique et une différence de potentielle sous l'illumination absorbé. Mais, peu de matériaux sont connus qui sont capables de former des cellules photovoltaïques avec un rendement suffisant et important pour les rendre d'un intérêt potentiel pour les applications pratiques [2]. Il est encore à noter que seuls le silicium, l'arséniure de gallium, le phosphore d'indium, le tellure de cadmium et le diséléniure de cuivre et d'indium ont montrés une efficacité de conversion photovoltaïque supérieure à dix pour cent [3]. Les cellules solaires photovoltaïques à base de l'arséniure de gallium (GaAs) sont au centre des efforts de développement considérable en raison de leur rendement de conversion élevé et le potentiel d'amélioration dans la performance. Les cellules solaires à base de (GaAs) ont la plus grande efficacité mesurée (~ 25.7 % au spectre AM1.5) de n'importe quel dispositif photovoltaïque à seule jonction [4]. Les cellules solaires à base de GaAs ont atteint des rendements élevés, en partie parce que le gap d'énergie de GaAs est proche de la valeur idéale de 1.5 eV qui en résulte dans une efficacité maximale de conversion photovoltaïque en utilisant une cellule solaire à seule jonction. D'autres augmentations d'efficacité sont possibles en utilisant des jonctions superposées (multijonctions et des concentrateurs [4]).

Dans ce travail, nous allons étudier les caractéristiques électriques, le rendement et le facteur de forme d'une cellule solaire monojonction (PN) à base de GaAs avec et

sans texturation. Dans un première pas, la structure (cellule) proposée est constituée principalement d'une couche fenêtre AlGaAs dopée de type p, couche émettrice dopée de type p, la base dopée de type n et le substrat de type n. Deuxièmement, on a ajouté dans la même structure précédente une couche BSF (Back Surface Field) pour examiner l'effet de cette couche sur le rendement de conversion. Les résultats de l'étude sont générés par le logiciel de simulation PC1D (personnel computer one-dimensional).

Le mémoire est structuré en trois chapitres plus une introduction et une conclusion générale. Dans le premier chapitre, on va présenter une généralité sur les matériaux semi-conducteurs III-V. Dans le deuxième chapitre, on va présenter une généralité sur les cellules photovoltaïques. Enfin nous présentons au dernier chapitre les résultats obtenus par le simulateur PC1D.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur les semi- conducteurs III-V**

## I.1. Introduction

Le succès industriel des dispositifs à semi-conducteurs est en grande partie dû aux technologies de pointe qui ont été développées pour leur préparation. Les semi-conducteurs ont pris une importance considérable dans notre vie. Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques utilisés dans les systèmes informatiques, la télécommunication, la télévision, les voitures et les appareils électroménagers... [1].

Dans le monde des semi-conducteurs, les composés III-V sont d'une classe bien définie avec des propriétés qui sont des sources d'intérêt en termes de connaissances et d'applications fondamentale. A titre d'exemple, le GaAs a un gap direct proche de la valeur idéale de 1.5 eV qui résulte une efficacité maximale de conversion photovoltaïque assurée par une cellule photovoltaïque même en monojonction. Des rendements de conversion autour de 25.7 % ont été atteints par de telle cellule au spectre AM1.5 [1].

## I.2. Les semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des composés formés à partir d'un élément de la troisième (III) colonne et d'un élément de la cinquième (V) colonne de la classification périodique de *Mendeleïev*. Le tableau (I.1) regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). [2].

**Tableau I.1.** Extrait de la classification périodique des éléments chimiques [2].

III	IV	V
$10.81^{5}B$	$12.01^{6}C$	$14.01^{7}N$
$26.98^{13}Al$	$28.09^{14}Si$	$30.97^{15}P$
$69.74^{31}Ga$	$72.59^{32}Ge$	$74.92^{33}As$
$114.69^{49}In$	$118.69^{50}Sn$	$121.75^{51}Sb$

## I.3. Les composés binaires III-V

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont laquelle la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée. Les composés contenant du bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie; ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide [1], qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou

pour l'optoélectronique ou une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces [2]. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes. Le tableau (I.2) résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.

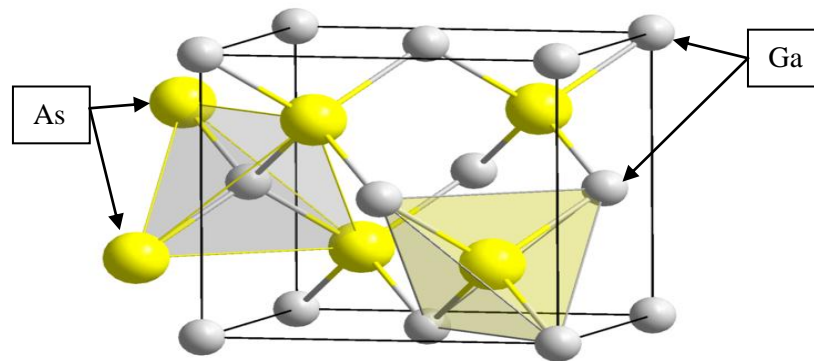
**Tableau I.2.** Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K [2,3].

Composé III-V	Eg (eV)	$m^* / m^0$	$\mu$ (cm <sup>2</sup> /VS)	a (Å°)
<b>BN</b>	7.5	-	-	3.6150
<b>AlP</b>	2.45	-	-	5.4510
<b>AlAs</b>	2.16	-	-	5.6605
<b>AlSb</b>	1.58	0.12	200	6.1355
<b>BP</b>	2.0	-	-	4.5380
<b>GaN</b>	3.36	0.19	380	a=3.189 b=5.185
<b>GaP</b>	2.26	0.82	110	5.4512
<b>GaAs</b>	1.42	0.067	8500	5.6533
<b>GaSb</b>	0.72	0.042	5000	6.0959
<b>InP</b>	1.35	0.077	4600	5.8686
<b>InAs</b>	0.36	0.023	33000	6.0584
<b>InSb</b>	0.17	0.0145	80000	6.4794

#### I.4. Structure cristalline

La plupart des composés III-V se cristallisent dans la structure *Zincblende* illustrée sous la figure (I.1). Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant, est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, l'un étant constitué des atomes de la colonne III et l'autre des atomes de la colonne V [3, 4,5].

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 (paramètre du réseau), [6].



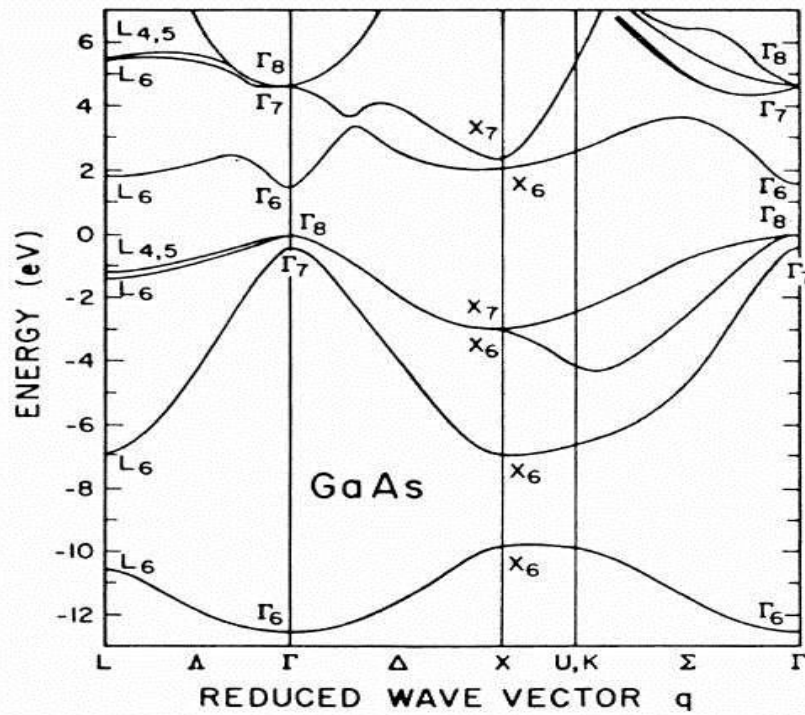
**Fig .I.1 .** Maille cristallin de la structure Zinc-blende [6].

De ce fait, dans les matériaux III-V, les liaisons ne sont pas simplement covalentes comme dans le *Silicium*. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III [6].

### **I.5. Structure des bandes d'énergie des semi-conducteurs III-V**

Les bandes d'énergie donnent les états d'énergie possibles pour les électrons en fonction de leurs vecteurs d'onde [4]. On les représente donc dans l'espace réciproque, et pour simplifier, dans les directions de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin [5]. Elles se décomposent en bandes de conduction la plus haute, la bande de valence la plus basse, et la bande interdite qui les sépare, qui détermine principalement les propriétés de transport du semi-conducteur [7].

L'arséniure de gallium étant un composé à gap direct, les transitions électriques les moins énergétiques entre la bande de valence et la bande de conduction peuvent se faire avec conservation du vecteur d'onde K. L'énergie correspondante à la largeur de la bande interdite  $\Delta E_g$  au centre de la zone de Brillouin varie avec la température  $E_g = 1.43$  eV à 300K et 1.51 eV à 77K [7].



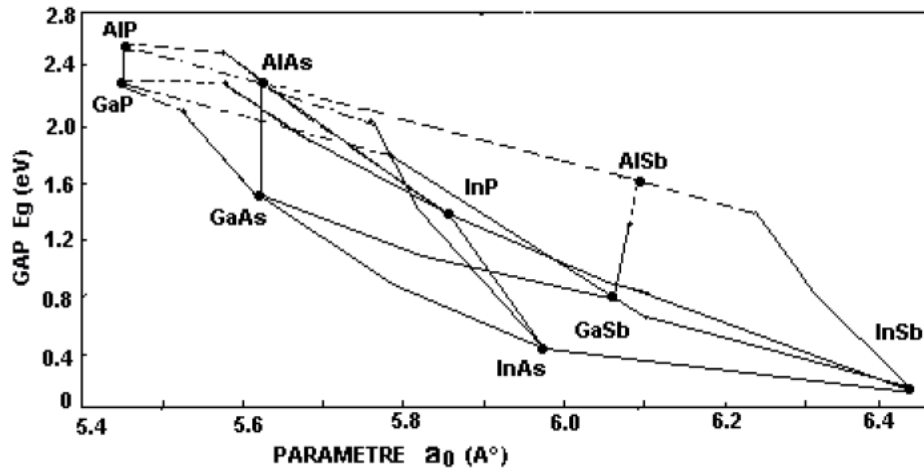
*Fig. I.2. Structure de bande de GaAs [3, 4].*

La masse effective des électrons étant inversement proportionnelle à cette courbure, ceci explique pourquoi dans les semi-conducteur III-V comme le : GaAs, InP ou bien GaInAs... etc, la masse effective des électrons en point ( $\Gamma$ ) est très faible, et par conséquent, la mobilité électronique est élevée [5].

**Tableau.I.3.** Paramètres de la bande de conduction dans GaAs [3].

Température	GaAS	
	300K	77K
$\Delta E_g(ev)$	1.43	1.51
$\lambda(\mu_m)$	0.87	0.82
$\Delta E_{\Gamma L}(ev)$	0.33	0.33
$\Delta E_{\Gamma X}(ev)$	0.48	0.46
$m_{e\Gamma^*}/m_0$	0.063	0.067
$m_{eL^*}/m_0$	0.22	0.22
$m_{eX^*}/m_0$	0.58	0.58

La figure (I.3) montre les bandes interdites  $E_g$  des principaux composés III-V en fonction des paramètres cristallins (paramètre de réseau)  $a_0$  [8,9]. En continu bandes interdites directes et en tirets bandes interdites indirectes; les discontinuités sont dues au changement de structures [8].



*Fig. I.3. Bandes interdites des principaux composés III-V en fonction des paramètres cristallins [8].*

Ce diagramme montre qu'il est possible d'obtenir des matériaux dont la largeur de la bande interdite, et donc les propriétés optiques, varient dans une large gamme. Il existe cependant une contrainte importante pour la fabrication de ces matériaux, la croissance épitaxiale sur un substrat binaire, dont le paramètre cristallin doit être très proche de celui du substrat [9].

## I.6. Propriétés optique

### I.6.1. Indices de réfraction

Dans un matériau l'indice de réfraction se trouve généralement dans sa forme réelle. Toutefois, il peut être trouvé sous sa forme complexe (voir l'équation I.1)

$$\tilde{n} = n + jk \quad (\text{I.1})$$

$\tilde{n}$  : L'indice de réfraction complexe,

$n$  : L'indice de réfraction réel,

$k$  : Le coefficient d'extinction du matériau.

L'indice de réfraction caractérise la vitesse de propagation d'une radiation monochromatique dans le matériau et est directement relié à la valeur du diélectrique du matériau [10]. Il est défini par :

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$c$  : la vitesse de la lumière dans le vide.

$v$  : Vitesse de l'onde lumineuse dans un milieu.

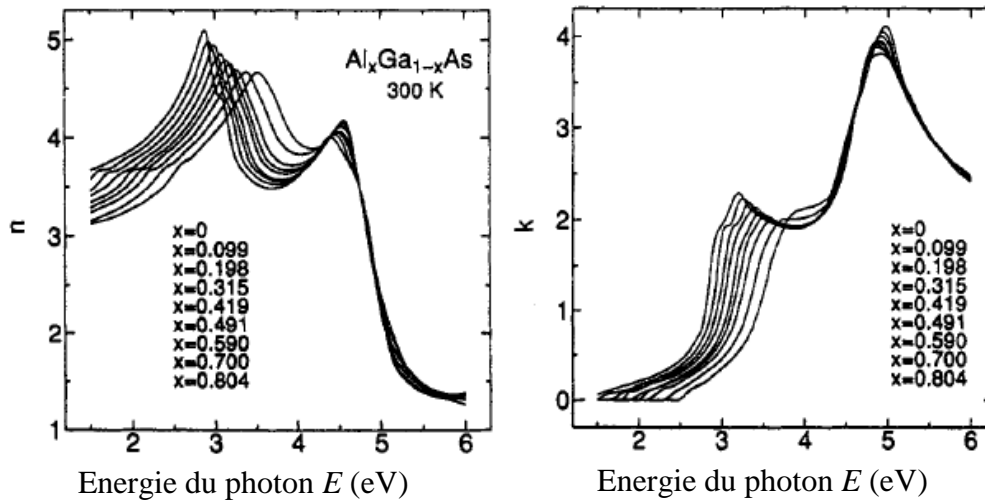
$\epsilon$  : Constante diélectrique.

### I.6.2. Le coefficient d'extinction

Le coefficient d'extinction d'un matériau, est une mesure qui caractérise la capacité du matériau à absorber une onde électromagnétique à une longueur d'onde  $\lambda(\mu\text{m})$  particulière [11]. Le coefficient d'extinction, relie au coefficient d'absorption  $\alpha$  par l'expression :

$$k = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha \quad (\text{I.3})$$

Les spectres des indices de réfraction en fonction de l'énergie du photon  $E$  ;  $n(E)$  et des coefficients d'extinction  $k(E)$  pour l'AlGaAs sont présentés respectivement dans les graphes de la figure (I.4) pour différentes valeurs de la composition «  $x$  » [12].



**Fig. I.4.** Spectres  $n(E)$  et  $k(E)$  pour AlGaAs avec les neuf compositions, de gauche à droite lorsque  $x$  augmente [12].

### I.6.3. Le coefficient d'absorption

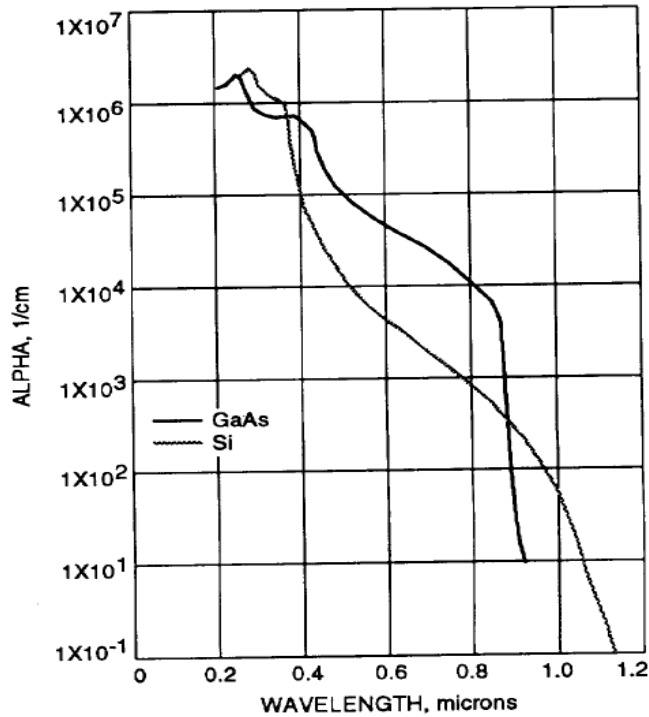
L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de bande interdite du matériau, c'est la raison pour laquelle on détermine un coefficient d'absorption intrinsèque. Pour des photons d'énergie inférieure à  $E_g$ , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle [13].

A proximité du seuil d'absorption intrinsèque, le coefficient d'absorption est proportionnel à la différence  $(h\nu - E_g)$  (voir l'équation I.4).

$$\alpha = B (h\nu - E_g)^a \quad (\text{I.4})$$

L'indice  $a$  prend des valeurs différentes, selon que le matériau est à transition interbande directe ( $a=1/2$ ), ou indirecte ( $a=2$ ). Le facteur multiplicatif  $B$  dépend du matériau. Dans le cas

du composé ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , le coefficient d'absorption change avec la fraction molaire  $x$  [10,11].



**Fig.I.5.** coefficient d'absorption pour le GaAs [12]

Le coefficient d'absorption en fonction de la composition  $x$  est représenté sur la figure (I.13). L'influence des transitions interbandes indirectes sur le coefficient d'absorption est sensible à partir d'une composition en aluminium supérieure à  $x=0.6$  [13].

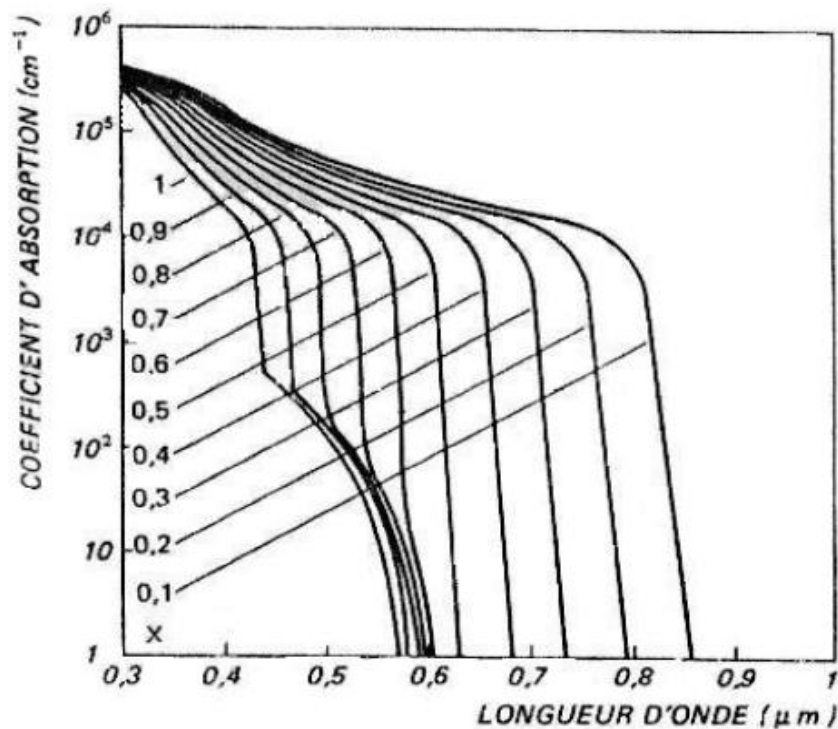


Fig. I.6. Spectre d'absorption optique du composé  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [13].

### I.7. Nature de la bande de conduction du matériau $\text{Ga}_{(1-y)}\text{Al}_y\text{As}$

Pour que deux matériaux puissent former une bonne hétérojonction, il est d'abord nécessaire que les paramètres de maille soient aussi voisins que possible. A cet effet, le matériau  $\text{Ga}_{(1-y)}\text{Al}_y\text{As}$  est très intéressant car, lorsque « y » varie de 0 à 1, c'est à dire lorsque l'on passe de GaAs à AlAs, la structure de bande passe d'un gap direct de valeur 1.43 eV à un gap indirect de valeur 2.16 eV, alors que la constante de maille passe de 5.653 Å à 5.661 Å, soit une variation < 0.2%. Ainsi il est possible de faire croître toutes les compositions sur le GaAs avec un accord de maille convenable [10].

Le paramètre de maille et les bandes d'énergies en fonction de la composition « y » de l'aluminium sont données par :

$$\text{Constante de maille (en \AA)} \quad a = 5.6533 + 0.0078y \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Bande interdite (en eV)} \quad E_g = 1.424 + 1.155y + 0.37y^2. \quad (\text{I.6})$$

### I.8. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les matériaux semi-conducteurs III-V ont été présentées dans ce chapitre, ainsi que les propriétés optique de ces composés binaires (III-V) destinés dans la conception des cellules solaires à hétérojonction AlGaAs/GaAs.

**Références de chapitre I**

- [1] R. Castagné et all, Circuits Intégrés en arséniure de Gallium., Physique, technologie et règles de conception. Masson et Cinet ENST Paris, (1989).
- [2] Henry Mathieu, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, Masson, 1987.
- [3] Gerald Bastard, *Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures*, les éditions de physique, paris, 1988.
- [4] C. Kittel .Introduction a la physique de l'état solide, Dunode (1972)
- [5] J.S.Blakemore, Semiconducting and other major properties of gallium Arsenide, J. Appl. phys. 53(10), October (1982).
- [6] Francis Levy, Traité des matériaux (18), Physique et technologie des semiconducteurs, Presses polytechniques et universitaires Romandes (1995)
- [7] Youla Fatima-Zohra, Modélisation de structure guide d'onde en semi-conducteurs III-V pour la commutation optique. Mémoire de magister Université de Canstantine (2003).
- [8] John H. Davies, *The physics of low-dimensional semiconductors*, Cambridge University Press, 1998.
- [9] WOLNY. M. et SELLE. D , *introduction aux composants à hétérostructures*, l'onde électrique, mai-juin, vol 70, 3, 1990, pp. 59-74.
- [10] Roland Lévy, Jean-Michel Jonathan, " L'optique non linéaire et ses matériaux ", EDP sciences ,2000
- [11] Peter William Atkins, " Éléments de chimie physique »,1998.
- [12] S. Adachi, Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors", Book, © 2009 Jhon Wiley & Sons Ltd.
- [13] S. Khlifi, Modélisation d'une Cellule Solaire  $Ga_{1-x}Al_xAs(n)$ -GaAs(i)-GaAs(p)", Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.

**Chapitre II**  
**Généralités sur les**  
**cellules**  
**photovoltaïques**

## II.1.Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque [1].

## II.2. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à  $1367\text{W/m}^2$ . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM) [2]. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000\text{W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1) [1]. Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000\text{W/m}^2$  [1].

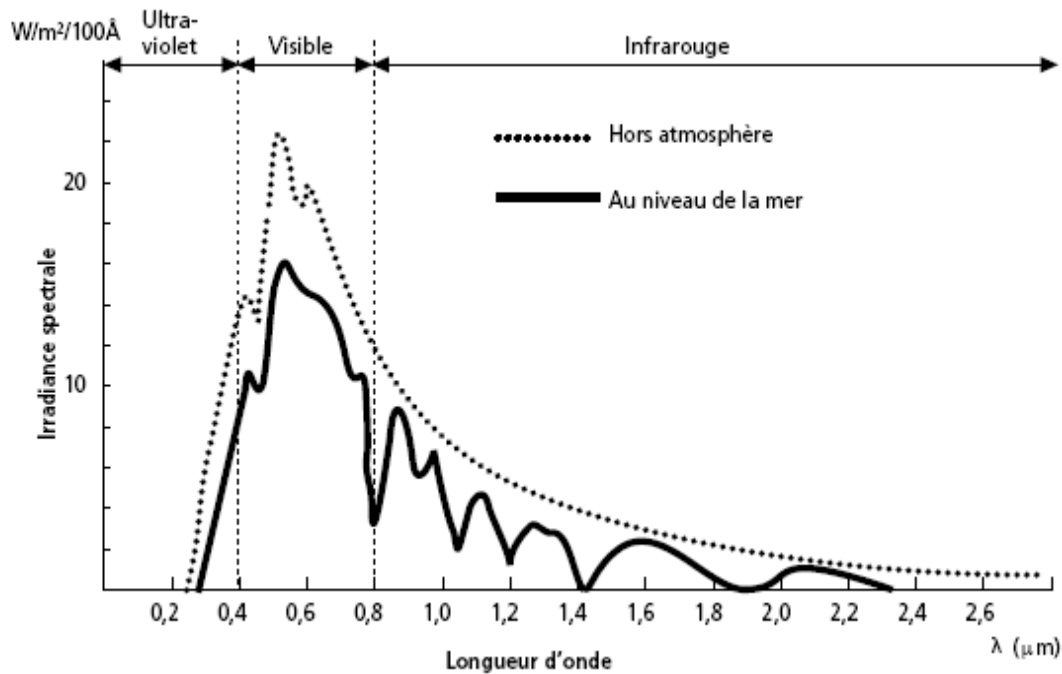
Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22\ \mu\text{m}$  à  $10\ \mu\text{m}$ . La figure (I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4\ \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4\ \text{à}\ 0,8\ \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8\ \mu\text{m}$ ) [2].

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré ( $\text{kW/m}^2$ ), a plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200\text{W/m}^2$ . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné

varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [3].



**Fig. II.1.** Analyse spectrale du rayonnement solaire [3].

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point [4].

### II.3. La conversion photovoltaïque

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [4].

#### II.3.1. L'effet photovoltaïque

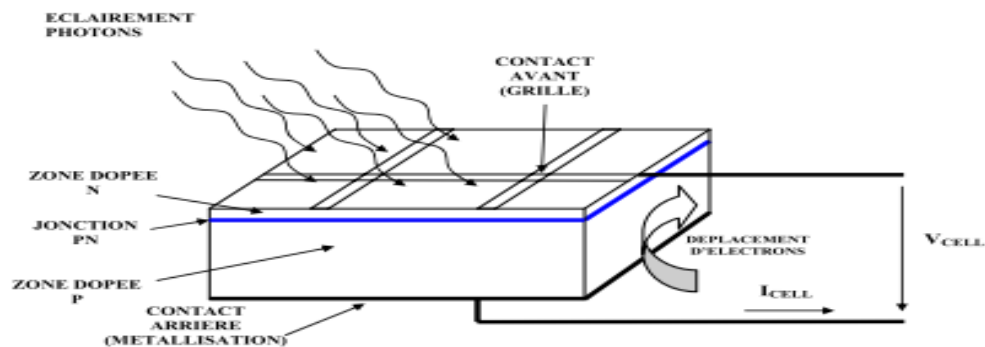
L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide d'un composant semi-conducteur appelé cellule solaire [4].

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [1]. Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium (Si), le germanium (Ge) et l'arséniure de Gallium (GaAs)...etc. [1].

### II.3.2 Le principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau dopé n diffusent dans le matériau dopé p [3].

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée [4]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue (figure II.2). Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un paire électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [4].

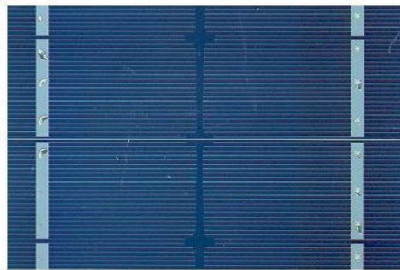


**Fig.II.2.** Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [4].

### II.3.3. La cellule solaire

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Généralement, le matériau le plus utilisé sur une large gamme pour les applications terrestres, c'est le silicium. Il existe trois types de silicium photovoltaïque : monocristallin, polycristallin et amorphe [5].

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique [5]. Le silicium cristallin a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher [6].



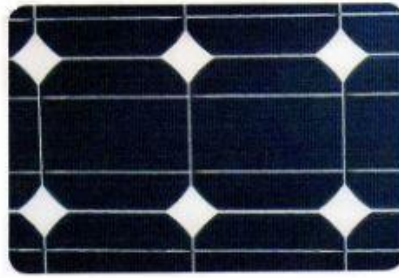
**Fig.II.3.**Cellule en silicium monocristallin [6].

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin) mais, les rendements sont faibles à ceux de monocristallins. Les cellules carrées ou rectangulaires sont souvent utilisées [6].



**Fig. II.4.**Cellule au silicium polycristallin [6].

Le silicium amorphe absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin, ce type de cellules est ordinairement constituées par des couches très minces [6].

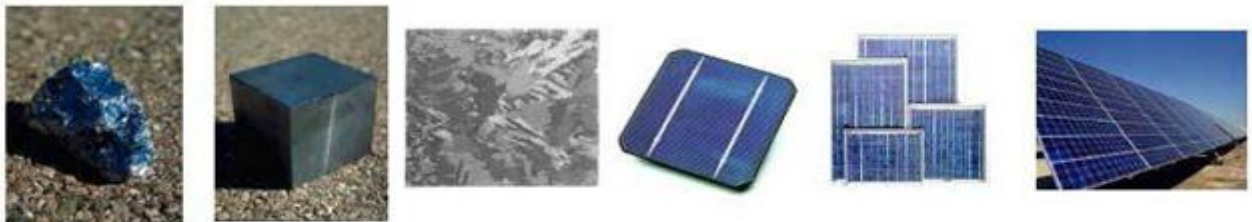


**Fig.II.5.** Cellule en silicium amorphe (couche mince) [6].

## II.4. Module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [6].



**Silicium purifié**

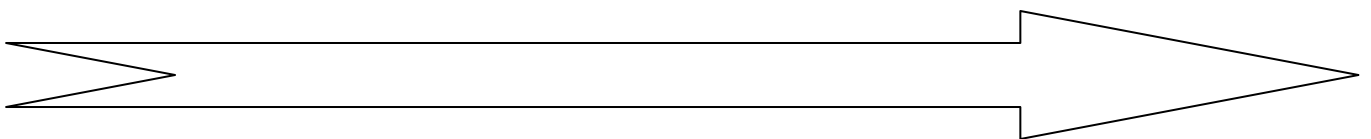
**Lingot**

**Wafer**

**Cellule**

**Modules**

**Systèmes**



**Fig .II.6.** Evolution de constructions des systèmes de production PV [6].

## II.5. La caractéristique courant tension et puissance tension

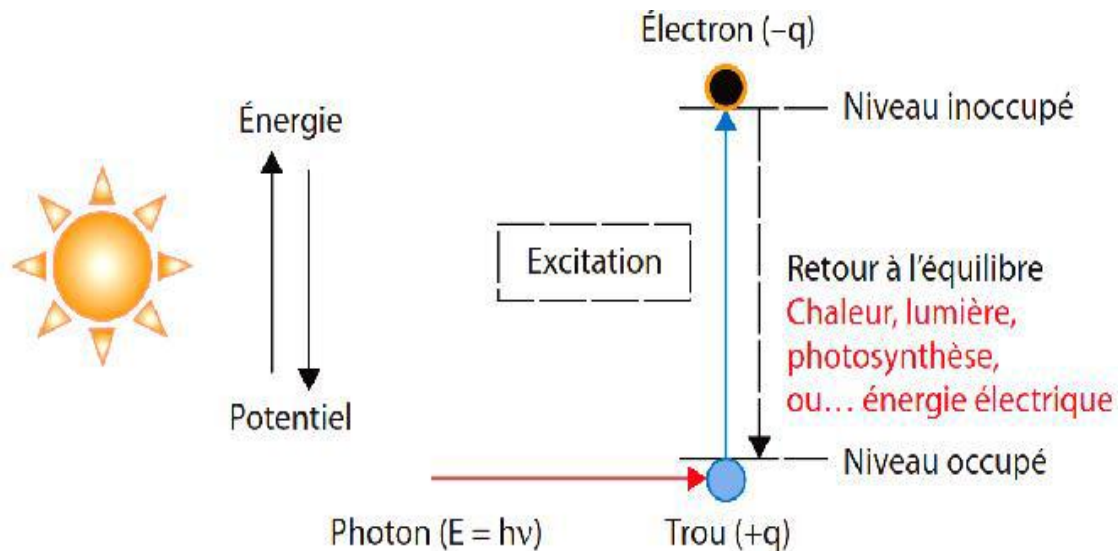
L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique:

- L'absorption de photons (figure II.7).
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.

- La collection de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

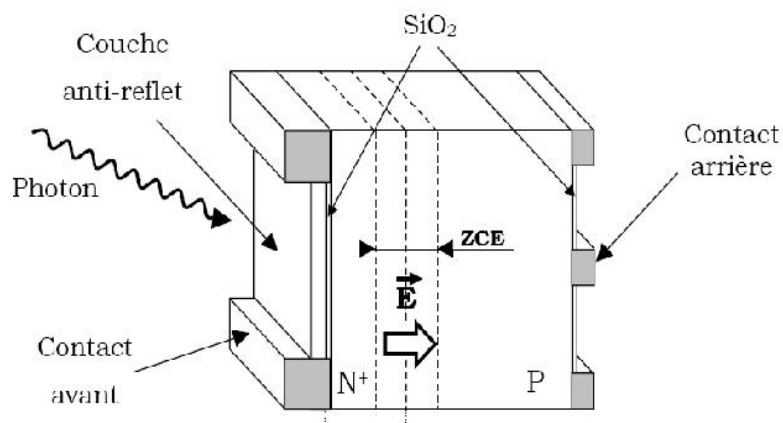
Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué:

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.
- D'une structure de collecte de résistance électrique la plus faible possible [7].



**Fig.II.7.** Processus d'absorption de la lumière dans un matériau [8, 9].

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons-trous créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n [12]. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustrées dans la figure (II.8).



**Fig.II.8.** Structure d'une cellule photovoltaïque, ("Photo watt") [7].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs 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 chassés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) ou ils sont majoritaires. On aura un photocourant de diffusion [10].

○ Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération [10].

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [11].

Sous éclairement la caractéristique  $I(V)$  de la diode ne passe plus par l'origine des coordonnées, il existe une région dans laquelle le produit  $V \cdot I$  est négatif (figure II.9), la diode fournit de l'énergie. Si on se limite à cette région active et si on compte positivement le courant inverse, la figure (II.9) se ramène à la figure (II.10) [7].

Donc, le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée se transcrit:

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

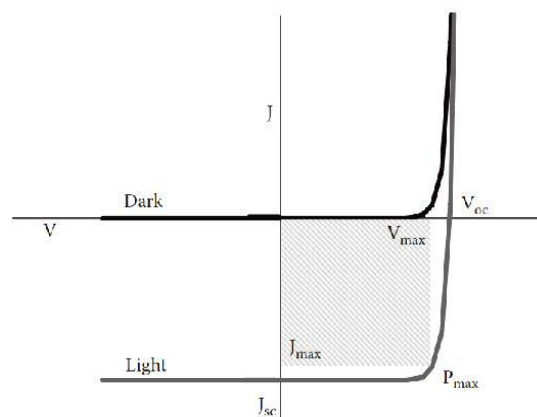
Avec  **$I_{ph}$**  : densité de courant photogénère (le photocourant ou bien le courant d'éclairage) et  **$I_{obs}$**  : densité de courant d'obscurité (le courant direct qui résulte de la polarisation de la diode dans le sens passant par la tension  $V$  qui apparaît aux bornes de la résistance de charge [7].

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (II.2) peut être écrite sous la forme suivante:

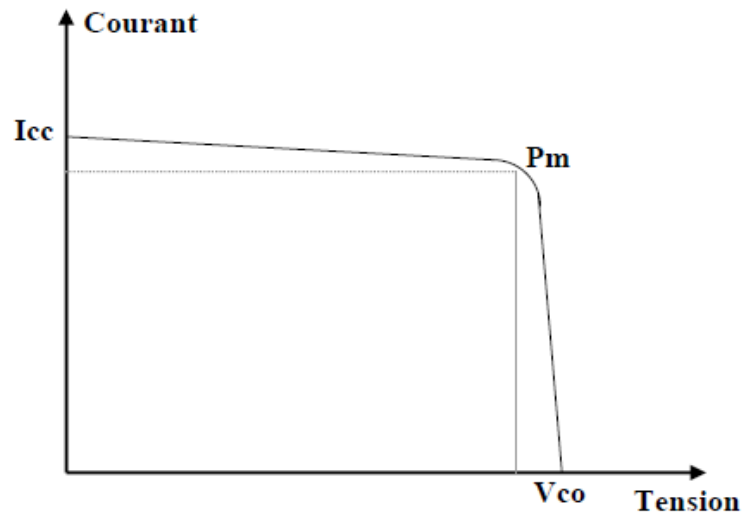
$$I(V) = I_{ph} - I_s(\exp(qV/kT) - 1) \quad (\text{II.2})$$

Avec  **$I_s$** : courant de saturation de la diode,  **$q$** : charge élémentaire,  **$k$** : constante de Boltzmann,  **$T$**  : température.

La caractéristique d'une cellule en pleine obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée dans la figure (II.10).



**Fig.II.9.** Schéma de la densité de courant en fonction de tension pour une diode en obscurité et sous éclairement [11].



**Fig.II.10** Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque [7].

A partir de la caractéristique I(V) (figure II.10) de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment:

**I<sub>cc</sub>**: courant de court-circuit (obtenu pour V=0).

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (\text{II.3})$$

**V<sub>co</sub>**: tension en circuit ouvert (obtenu pour I=0).

$$V_{co} = \frac{kt}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.4})$$

**I<sub>m</sub>**: courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

**V<sub>m</sub>**: tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

**η**: rendement de conversion.

**FF**: facteur de forme.

Avec:

η = (Puissance électrique maximale fournie) / (puissance solaire incidente):

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{II.5})$$

Avec **P<sub>i</sub>**: puissance d'éclairement reçue par unité de surface; **S**: surface de la cellule photovoltaïque.

FF = (puissance maximale délivrée sur la charge) / (V<sub>co</sub> \* I<sub>cc</sub>) [11,7]

## II.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

### II.6.1. Les avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- une haute fiabilité ( elle ne comporte pas de pièces mobiles ) qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [13,14].

### II.6.2. les inconvénients

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [13,14] .

## II.7. Avenir de l'énergie photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque [15]. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première

utilisation été dans le domaine des télécommunications. Après, certain puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV. A nos jours, quelques dizaines de village saharien de la région de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie [16].

## **II.8. Conclusion**

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium, l'Arséniure des Galium,...). Afin de la rendre réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit Système photovoltaïque.

Dans ce chapitre on a présenté des notions générales sur les cellules photovoltaïques, et les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le chapitre suivant, on va étudier à l'aide du PC1D, une structure photovoltaïque à base d'un semi-conducteur III-V qu'est le GaAs et leur ternaire AlGaAs, afin d'optimiser leur paramètres tels que le dopage et les épaisseurs des différentes couches, la couche BSF et la texturation, dont le but est d'augmenter le rendement de cette cellule.

## Références de chapitre II

- [1] BALI AMINA . Présenté Pour l'Obtention du diplôme de Magister en physique. Etude comparative entre les cellules solaire de type p+-AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs. UNIVERSITE MOHAMED KHEIDER-BISKRA.
- [2] G, Adam. R, Modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [3] Richard H, Bube, Photovoltaics Materials”, Book, Stanford University, USA. 1998.
- [4] Henry Mathieu.” Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques “, Masson, (1987).
- [5] Gerald Bastard, “ Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures“, Les éditions de physique, paris, (1988). Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.
- [6] J. Lavery, “Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.
- [7] Henry Mathieu “Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques“, cours, (livre), 5eme edition, Dunod, (2001).
- [8] Bruno Thuillier “Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin “ These de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon. (2001).
- [9] Daniel Lincot, “Les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat“, EDP Sciences, (2011), ISBN : 978-2-7598-0642-3, p. 127.
- [10] BENNACER HAMZA” Contribution au développement des nouvelles cellules solaires à base des semi-conducteurs composés” These doctorat en science , Université UDL – sidi belabesse , (2015).
- [11] S. R. Wenham and M. A. Green “ Silicon Solar Cells “, John Wiley& Sons, Ltd, 1062-7995/96/010003, (1995).
- [12] Nichiporuk Oleksiy “Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigitées“, These de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, (2005).
- [13] Daniel Lincot, “La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire“, découverte n° 344 - 345 janvier - février (2007).
- [14] Loucas Tsakalakos, “Nanotechnology for photovoltaics“, (Livre), Taylor and Francis Group, LLC, (2010).

[15] L.Mohamed. Etude de caractérisation d'un MESFET-GaAs hyperfréquence et application en circuit amplificateur linéaire à faible bruit (LNA) en bande étroite autour de 10 GHz en technologie MMIC pour les systèmes à communications rapides”, Mémoire magistère, Ecole normale supérieure d'enseignement technologique d'Oran. (2009)

[16] M. AMARA, Propriétés Electroniques des Conducteurs et des Semi-Conducteurs”, rappels théoriques Plate-forme Matière Condensée et Cristallographie ( MCC) C.E.S.I.R.E. Université J.Fourier Grenoble.

# **Chapitre III**

## **Résultats et discussion**

### III.1. Introduction

Les performances d'une cellule solaire photovoltaïque proviennent de l'optimisation de toutes les couches (*layers*) formant la cellule. Dans ce mémoire on va étudier deux structures PV à base des semi-conducteurs *GaAs* et le *AlGaAs*. La recherche des paramètres optimaux pour les deux cellules proposés dans les différentes régions offrant les meilleures caractéristiques de sortie (courant-tension) des cellules fait l'objet de cette étude. Dans le monde de la simulation et la caractérisation des dispositifs optoélectroniques en particulier les cellules photovoltaïques, il existe plusieurs environnements et outils de simulation comme le Synopsys, Silvaco, Scaps, AMPS-1D et le PC1D. On a choisi de travailler avec le simulateur PC1D car il est très facile, rapide et utile pour les structures simples non complexes. A partir des caractéristiques (courant-tension) fournies par le **PC1D**, on peut déterminer les valeurs des facteurs caractérisant les cellules, tels que le courant  $I_{cc}$ , la tension  $V_{co}$ , le rendement  $\eta$ , et le facteur de forme FF [1].

### III.2. Le simulateur PC1D

Le PC1D (personnel computer one-dimensionnel) est l'un des programmes qui a été élaboré pour modéliser et exploiter les composants semi-conducteurs, notamment les cellules photovoltaïques.

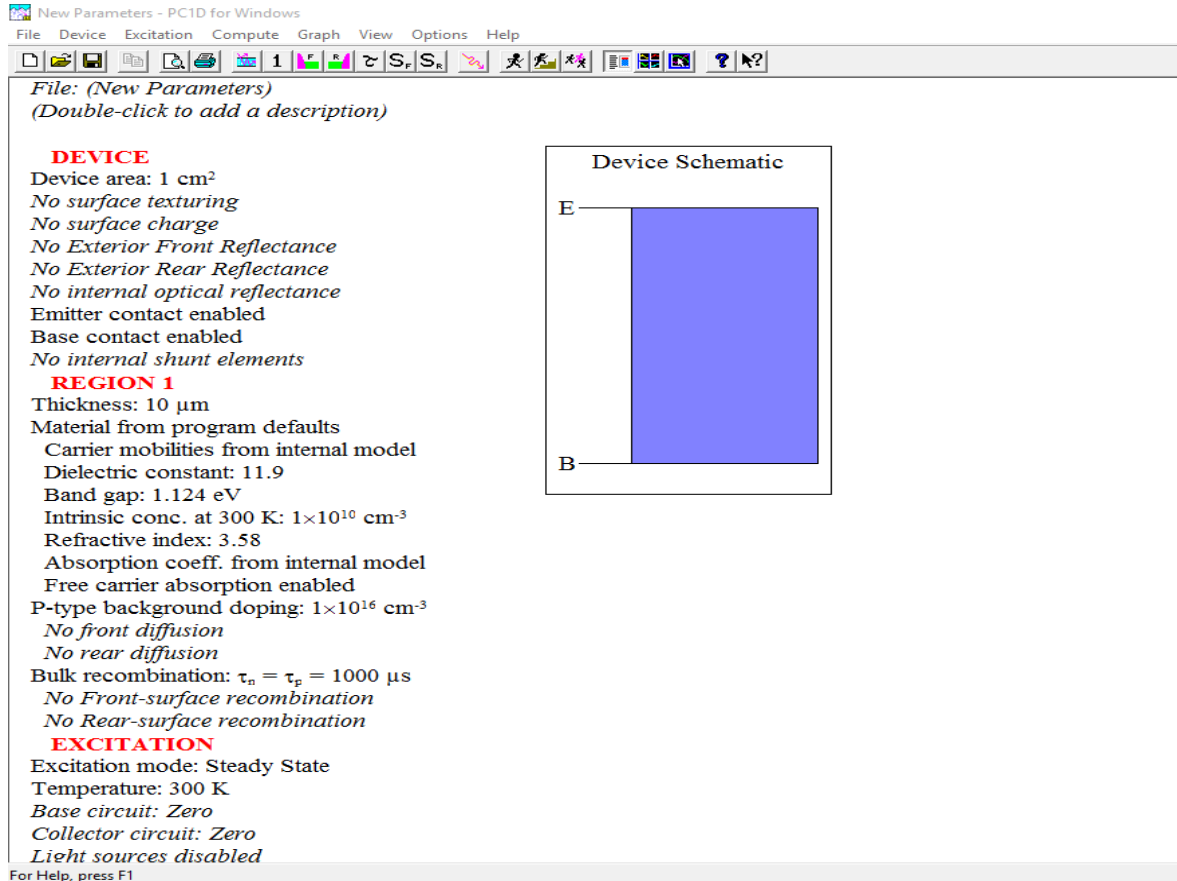
A l'aide du PC1D, la compréhension des cellules solaires et leurs phénomènes physiques internes tels que le mouvement des porteurs minoritaires la recombinaison et la photo génération, devient aisée [2].

Le programme PC1D a été élaboré par *Paul A. Basaure* durant ses travaux de recherche à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa, et fut rendu public, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18<sup>ème</sup> conférence sur le photovoltaïque *IEEE PVSC* (décembre 1985). La première version, fut le premier programme à résoudre avec succès les équations complexes des composants à semi-conducteurs sur un PC, les versions antérieures résolvaient seulement les équations des porteurs minoritaires pour des régions à dopage uniforme, cependant, les versions récentes offrent les solutions de ces équations pour différents profils de dopage (Uniforme, Exponentiel, Gaussien...) [2]. Lors du premier accès au simulateur PC1D, une interface est affichée (figures III.1 et III.2), Elle contient toutes les données nécessaires pour faire une simulation des cellules solaires. Beaucoup d'améliorations ont été apportées sur cette interface, cette page nous permet de bien simuler une cellule solaire. La structure technologique de la cellule à étudier est présentée dans cette interface. Cette dernière peut comprendre jusqu'à 5 couches empilées

[3]. Chaque couche est prise en charge par le simulateur à travers la fiche suivante (voir la figure III.1) :

Épaisseur de la couche
Type de matériau utilisé
Mobilité des porteurs
Constante diélectrique du matériau
Energie du gap
Concentration intrinsèque
Indice de réfraction
Coefficient d'absorption
Dopage de la couche
Diffusion avant (épaisseur et dopage)
Diffusion arrière (épaisseur et dopage)
Recombinaison en volume (durée de vie des porteurs)
Vitesse de recombinaison à l'avant de la couche
Vitesse de recombinaison à l'arrière de la couche

**Fig.III.1.** fiche des paramètres d'entrée pour chaque couches.



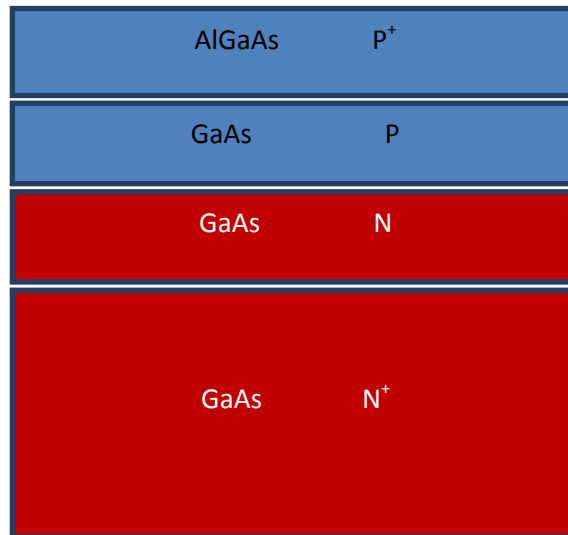
**Fig.III.2.** L'interface du logiciel PC1D.

### III.3. Optimisation des cellules

#### III.3.1. Présentation des cellules proposées

##### ✚ La structure A

La première structure proposée dans ce travail, est celle : AlGaAs<sub>(p<sup>+</sup>)</sub>-GaAs<sub>(p)</sub>/GaAs<sub>(n)</sub> d'une surface de  $1\text{cm}^2$  sans texturation de la surface, dont leur schéma de base est représenté sous la figure (III.3).



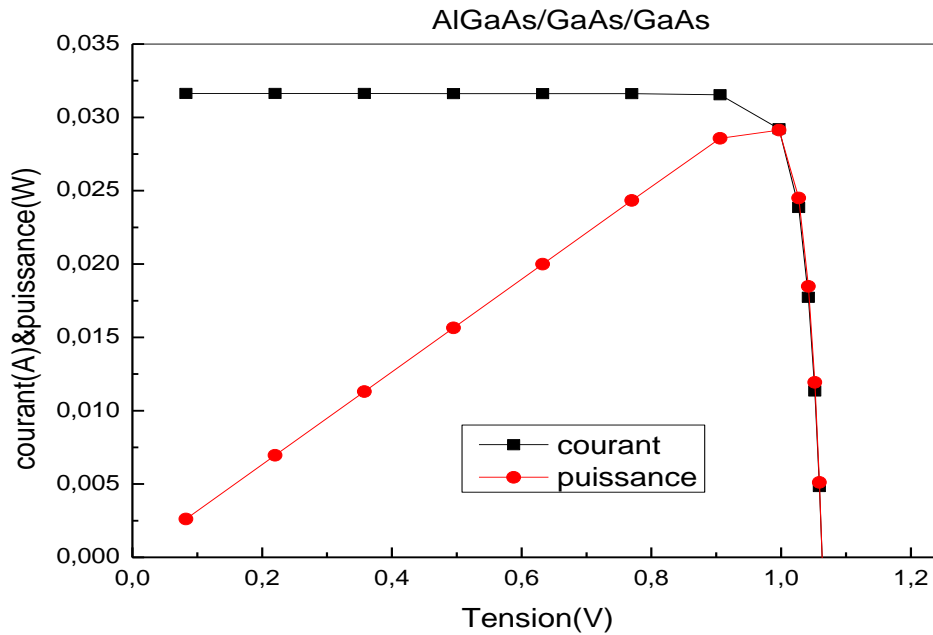
**Fig. III.3.** Schéma de la structure ‘A’ proposée : une cellule photovoltaïque à base d’AlGaAs/GaAs/GaAs.

On a résumé sous le tableau (III.1) les différentes épaisseurs et dopages initiaux (d’entrée) utilisés dans la simulation de la *structure A* de type (AlGaAs/GaAs/GaAs).

**Tableau. III.1.** Epaisseur et dopage initiales des différentes couches formants la cellule PV (AlGaAs/GaAs/GaAs).

	Fenêtre (Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As) p <sup>+</sup>	Émetteur (GaAs) P	Base(GaAs) n	Substrat(GaAs) n <sup>+</sup>
Epaisseur (μm)	0.03	0.3	2.5	300
Dopage (cm <sup>-3</sup> )	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

La structure à étudier est une cellule de type monojonction (p-n) à base de GaAs dont le schéma de base est représenté dans la figure (III.2). Elle est constituée principalement d’une couche Fenêtre AlGaAs dopée de type p, couche émettrice dopée de type p, la base dopée de type n et le substrat de type n.



**Fig.III.4.** Caractéristique (courant-puissance) en fonction de la tension pour la structure AlGaAs/GaAs/GaAs.

La figure (III.4) illustre la courbe caractéristique d’une cellule photovoltaïque qui représente la variation du courant qu’elle produit et la puissance en fonction de la tension aux bornes de cette cellule PV.

**La structure B**

La deuxième structure proposée pour notre cas est celle AlGaAs<sub>(P+)</sub>-GaAs<sub>(P)</sub>/GaAs<sub>(N)</sub>-AlGaAs<sub>(N)</sub> d’une surface de 1cm<sup>2</sup> sans texturation de la surface.



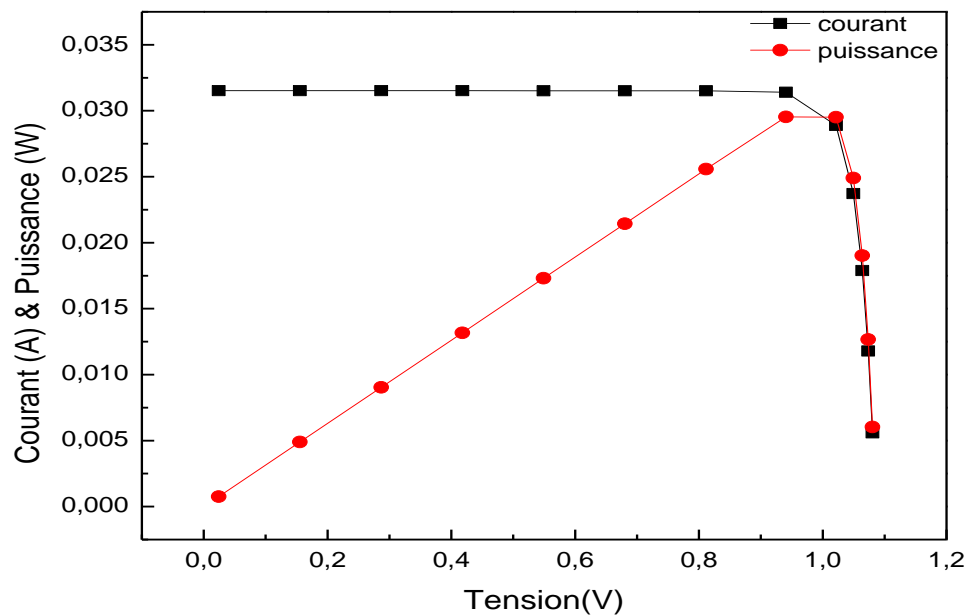
**Fig. III.5.** Schéma de la cellule solaire à base d’AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF.

On a résumé sous le tableau (III.2) les différentes épaisseurs et dopages initiaux utilisés dans la simulation de la *structure B* de type (AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF).

**Tableau.III.2.** Epaisseur et dopage des différentes couches de la cellule à hétérojonction (AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF).

	Fenêtre (Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As) p <sup>+</sup>	Émetteur (GaAs) P	Base(GaAs) N	BSF ( Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As)	Substrat(GaAs) n <sup>+</sup>
Epaisseur (μm)	0.03	0.3	2.5	1	300
Dopage (cm <sup>-3</sup> )	2x10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	2x10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	2x10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>	2x10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	2x10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>

La structure à étudier est aussi une cellule monojonction (p-n) toujours à base de GaAs. Elle est constituée principalement d'une couche fenêtre AlGaAs dopée de type p, couche émettrice de type p, la base dopée de type n, plus une couche AlGaAs joue le rôle d'une couche BSF, et le substrat de type n (voir la figure III.6).



**Fig.III.6.** Caractéristique (courant-puissance) en fonction de la tension pour la structure (AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF).

**Tableau.III.3.** Les paramètres photovoltaïques obtenus de la structure.

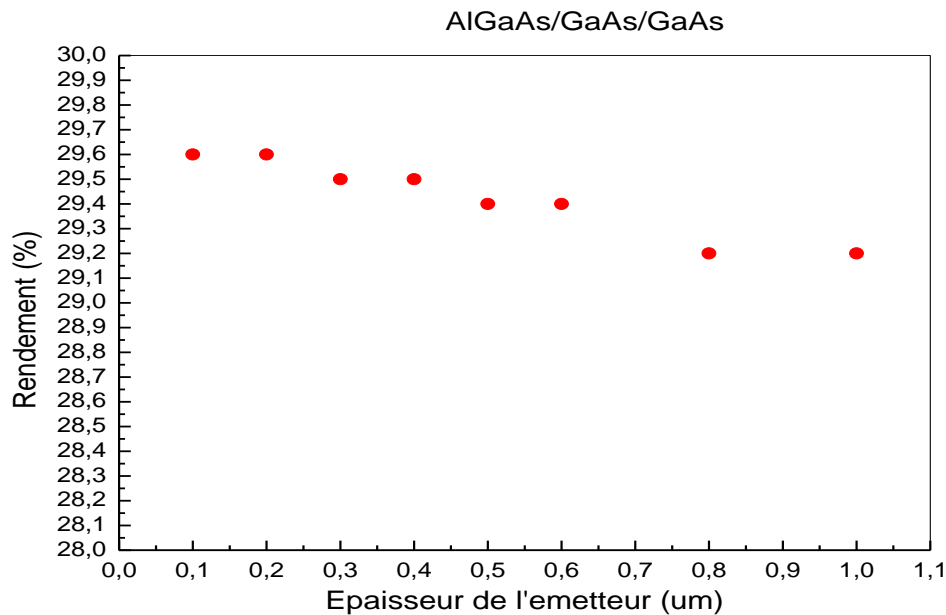
La structure	I <sub>cc</sub>	V <sub>co</sub>	P <sub>max</sub>	η(%)	FF(%)
AlGaAs/GaAs/GaAs	0.0316 A	1.063 V	0.0295 W	29.5	87.8
AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF	0.0315 A	1.085 V	0.0300 W	30	87.7

### III.4.Optimisation des paramètres des structures proposées sur le rendement photovoltaïque

#### III.4.1. Optimisation de la structure A

##### III.4.1.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement

Afin optimisé les paramètres de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ) offrant le rendement de conversion photovoltaïque optimal, nous avons varié l'épaisseur de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ).

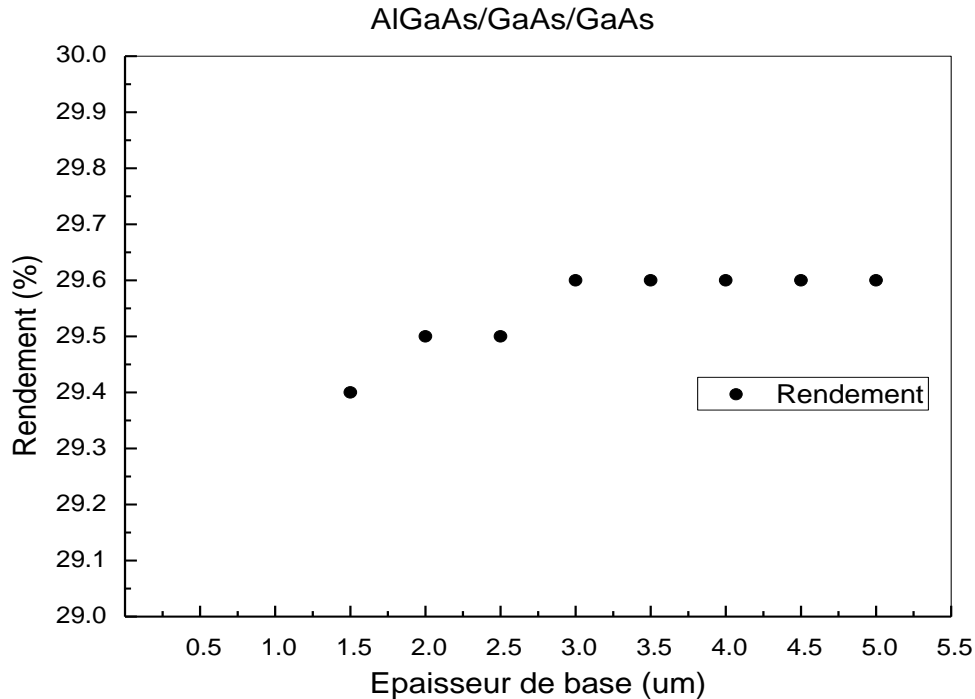


**Fig.III.7.** Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement de la structure AlGaAs/GaAs/GaAs.

A chaque fois on évolue l'épaisseur de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ) on observe une diminution au niveau du rendement où il revient à l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ). Lorsque l'épaisseur de la couche ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ) a diminué, le courant de court-circuit augmente en raison de l'amélioration de l'efficacité de la collecte résultant de la distance décroissante entre la surface et la zone de charge d'espace (ZCE). Le meilleur rendement est enregistré pour un épaisseur de 0.1  $\mu\text{m}$  (figure III.7).

### III.4.1.2. Influence de l'épaisseur de la base sur le rendement

Pour optimiser les paramètres de la base ( $\text{GaAs}_{(n)}$ ) offrant le rendement de conversion photovoltaïque optimal, on a varié l'épaisseur de la couche  $\text{GaAs}_{(n)}$  (base). Les résultats obtenus sont illustrés sous la figure (III.8).

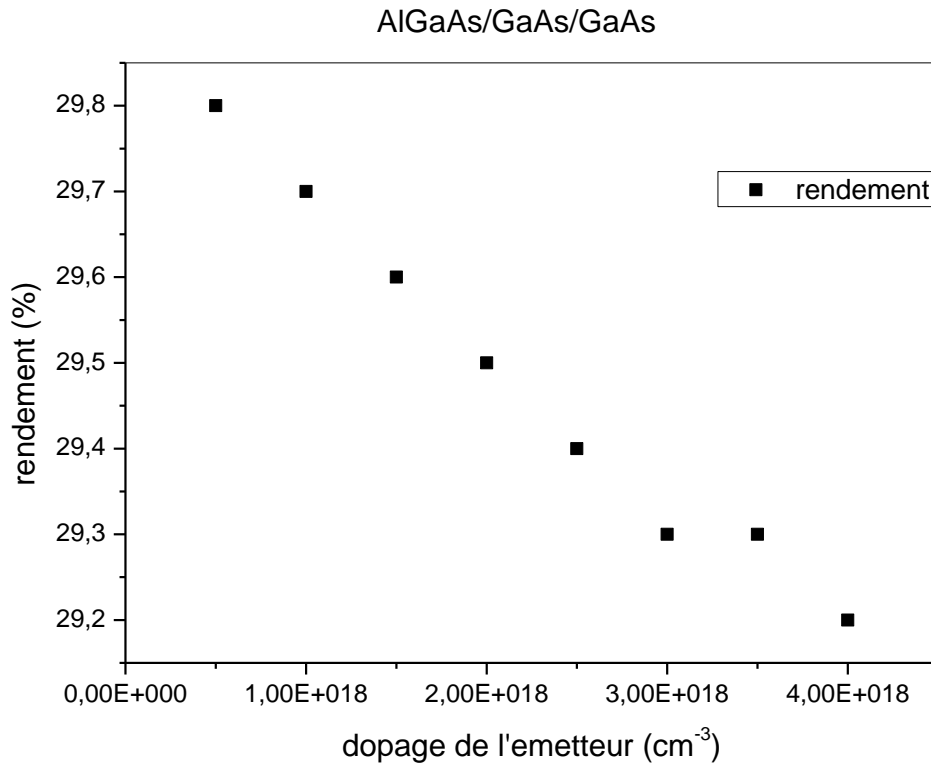


**Fig. III.8.** Effet de l'épaisseur de la base sur le rendement la structure AlGaAs/GaAs/GaAs.

Cette figure (III.8) montre que l'évolution de l'épaisseur de la base  $\text{GaAs}_{(n)}$  influe directement sur le rendement de conversion. Il est clair que le rendement  $\eta(\%)$  augmente de 29.4% jusqu'à 29.6%, quand on augmente dans l'épaisseur entre la marge de 1.5  $\mu\text{m}$  à 3.0  $\mu\text{m}$  respectivement. Mais, à partir l'épaisseur de 3.0  $\mu\text{m}$ , on observe que le rendement reste constante à 29.6%, par ce que après ce point l'influence de l'ensoleillement reste constante malgré l'augmentation de l'épaisseur de la base.

### III.4.1.3. Influence de dopage de l'émetteur sur le rendement

Dans cette partie, nous avons variés le dopage de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ) dans une gamme de  $5 \text{ E}+17$  à  $4 \text{ E}+18 \text{ cm}^{-3}$ . On a tracé la variation du rendement de conversion en fonction du dopage sous la figure (III.9), ou la variation du rendement est remarquable.



**Fig. III.9.** Influence du dopage de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ) sur le rendement.

D'après la figure (III.9), il est clair que, à chaque augmentation du dopage de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ) on remarque une diminution de la valeur du rendement  $\eta(\%)$ . le rendement maximal est obtenu au dopage  $N_A=5 \text{ E}+17 \text{ cm}^{-3}$ .

### III.4.1.4. Influence du dopage de la base sur le rendement

Maintenant, nous fixons tous les paramètres de la cellule et nous ne faisons varier que le dopage de la base pour différentes valeurs. Nous observons que la variation du rendement est remarquable (voir la figure III.10). A chaque changement dans l'augmentation du dopage de la base on remarque une diminution de la valeur du rendement

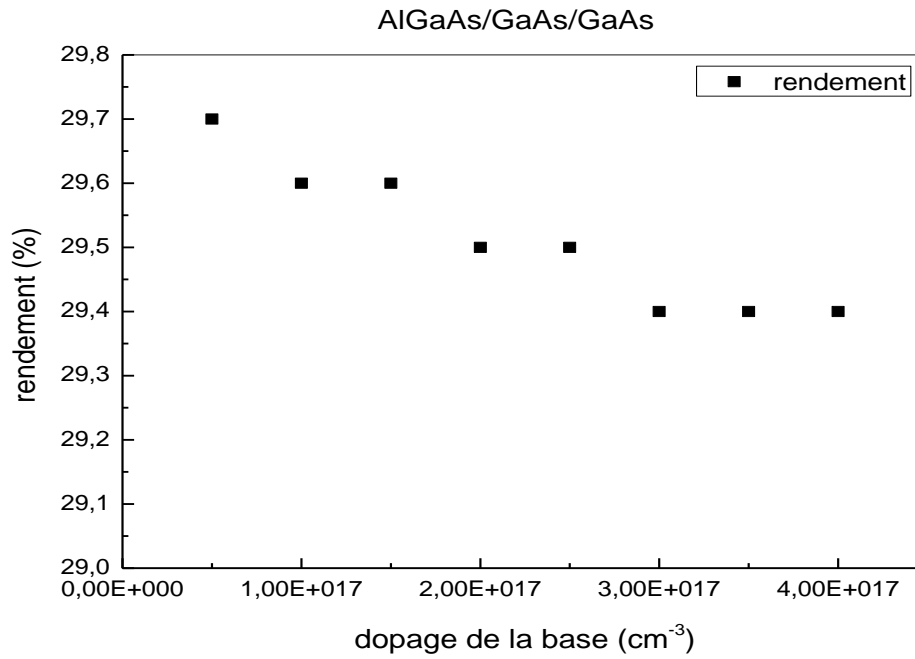


Fig. III.10. Influence du dopage de la base sur le rendement.

Tableau.III.4. Les paramètres optimaux de l'épaisseur et le dopage de la structure A

	l'émetteur	la base
l'épaisseur (μm)	0.2	3
Le dopage (cm <sup>-3</sup> )	0.5 E+18	0.5 E+17

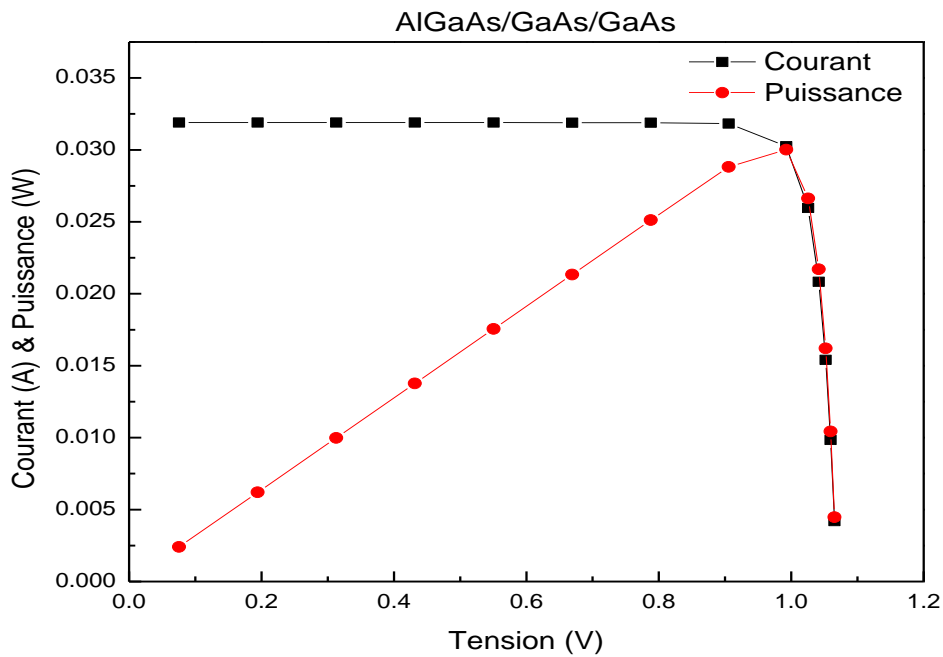
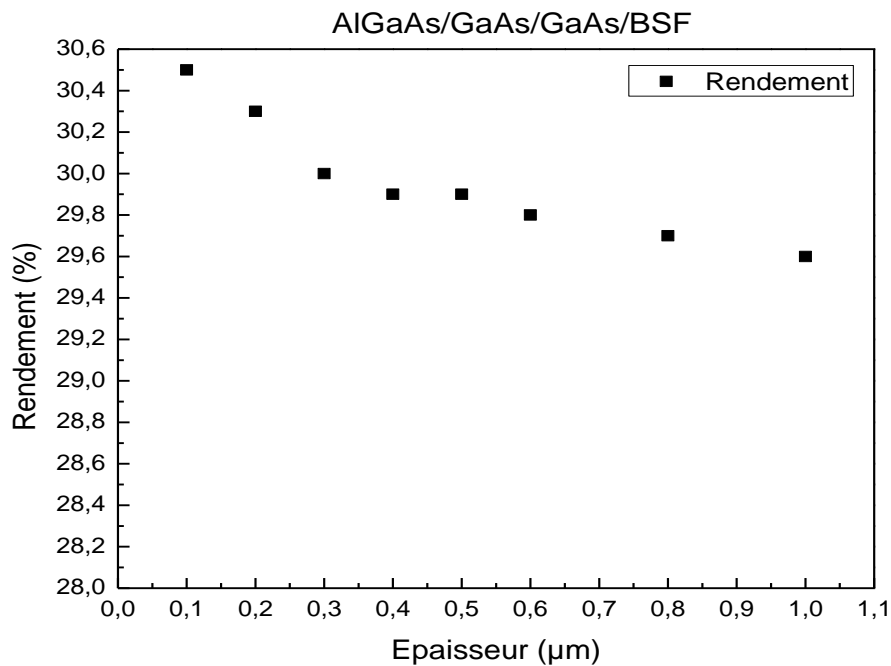


Fig.III.11. Caractéristique (courant-puissance) en fonction de la tension pour la structure optimale AlGaAs/GaAs/GaAs.

### III.4.2. Optimisation de la structure B

#### III.4.2.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement

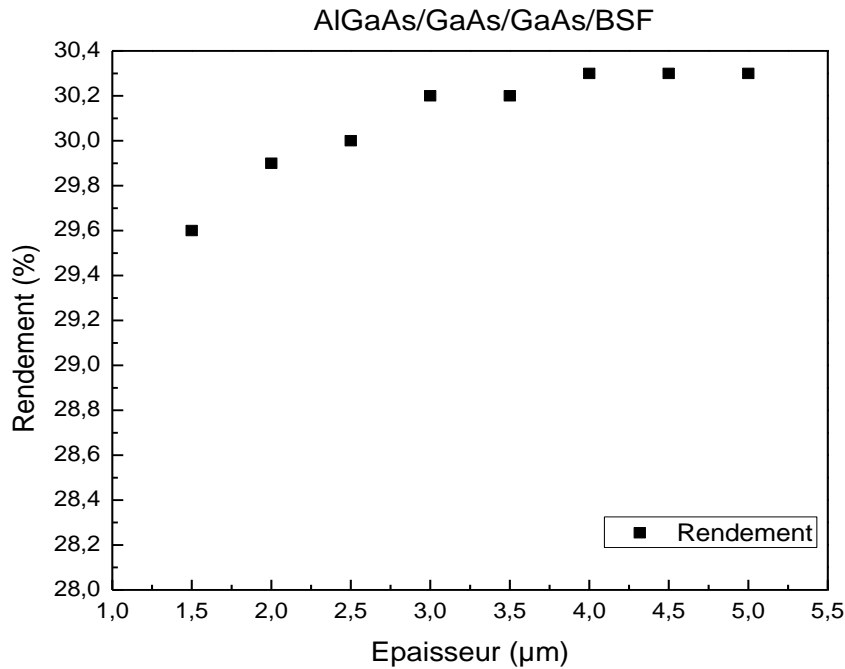
Afin d'optimiser les paramètres de l'émetteur offrant le rendement de conversion photovoltaïque optimal, nous avons varié l'épaisseur de l'émetteur pour plusieurs valeurs. Les résultats obtenus sont illustrés sous la figure (III.12). Suivant ces résultats, il est clair que le rendement de conversion  $\eta(\%)$  diminue lorsqu'on augmente dans l'épaisseur de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ). Le meilleur rendement est obtenu quand l'épaisseur est de l'ordre de  $0.1 \mu\text{m}$ .



**Fig.III.12.** Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement de la structure AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF.

### III.4.2.2. Influence de l'épaisseur de la base sur le rendement

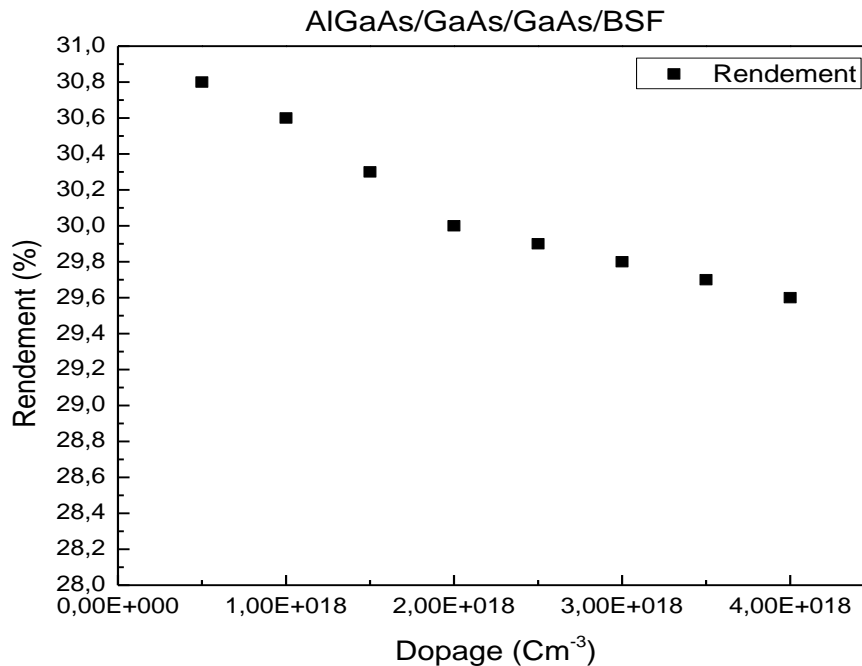
Afin optimiser les paramètres de la base offrant le rendement de conversion photovoltaïque optimal, nous avons varié l'épaisseur de la couche ( $\text{GaAs}_{(n)}$ ). On obtient les résultats résumés sous la figure (III.13). On constate que le rendement de conversion  $\eta(\%)$  devient plus grand lorsque l'épaisseur de la base ( $\text{GaAs}_{(n)}$ ) augmente. Le rendement est plus grand (30.30%) dans l'épaisseur de 4.0  $\mu\text{m}$ .



**Fig. III.13.** Effet de l'épaisseur de la base sur le rendement la structure AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF

### III.4.2.3. Influence du dopage de l'émetteur sur le rendement

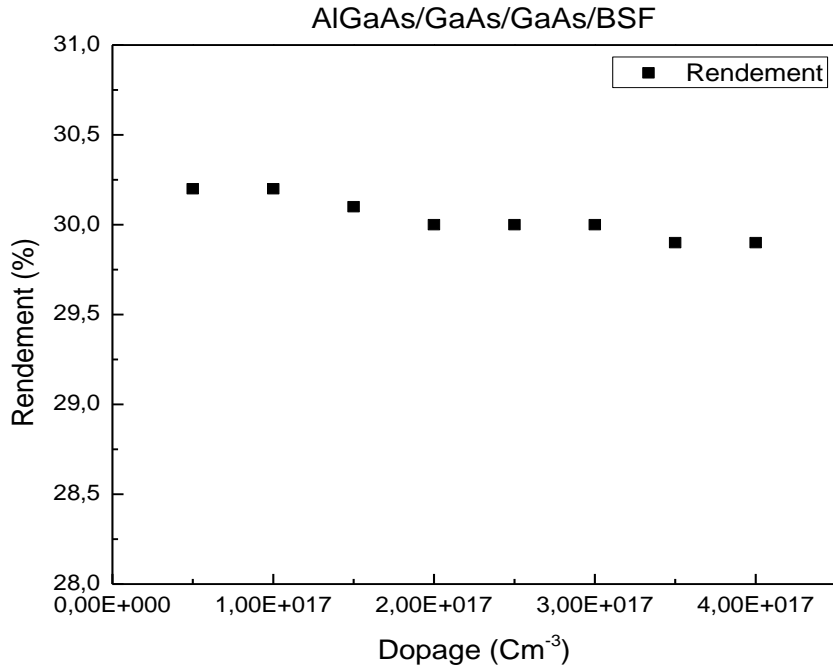
Maintenant, nous fixons tous les paramètres de la cellule et nous ne faisons varier que le dopage de la base pour différentes valeurs de longueurs de diffusion. nous observons que la variation du rendement est remarquable.



**Fig.III.14.**Influence du dopage de l'émetteur sur le rendement AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF.

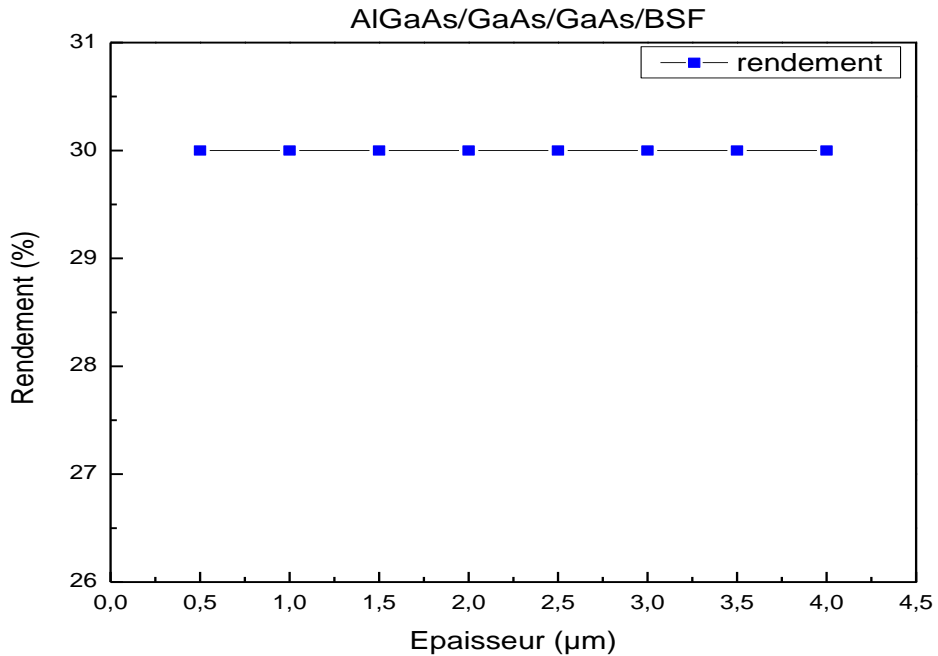
### III.4.2.4. Influence du dopage de la base sur le rendement

Maintenant, nous fixons tous les paramètres de la cellule et nous ne faisons varier que le dopage de la base ( $\text{GaAs}_{(n)}$ ) pour voir l'effet du dopage pour cette couche sur le rendement de conversion. Nous observons que la variation du rendement est remarquable. Quand on augmente dans le dopage, il est nette que le rendement rend moins grand. Le dopage optimal dans ce cas est de l'ordre de  $5,0 \text{ E}+16 \text{ cm}^{-3}$  correspond à 30,19% de rendement.



**Fig.III.15.**Influence du dopage de la base sur le rendement AlGaAs/GaAs/**GaAs**/BSF.

#### III.4.2.5. Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur le rendement

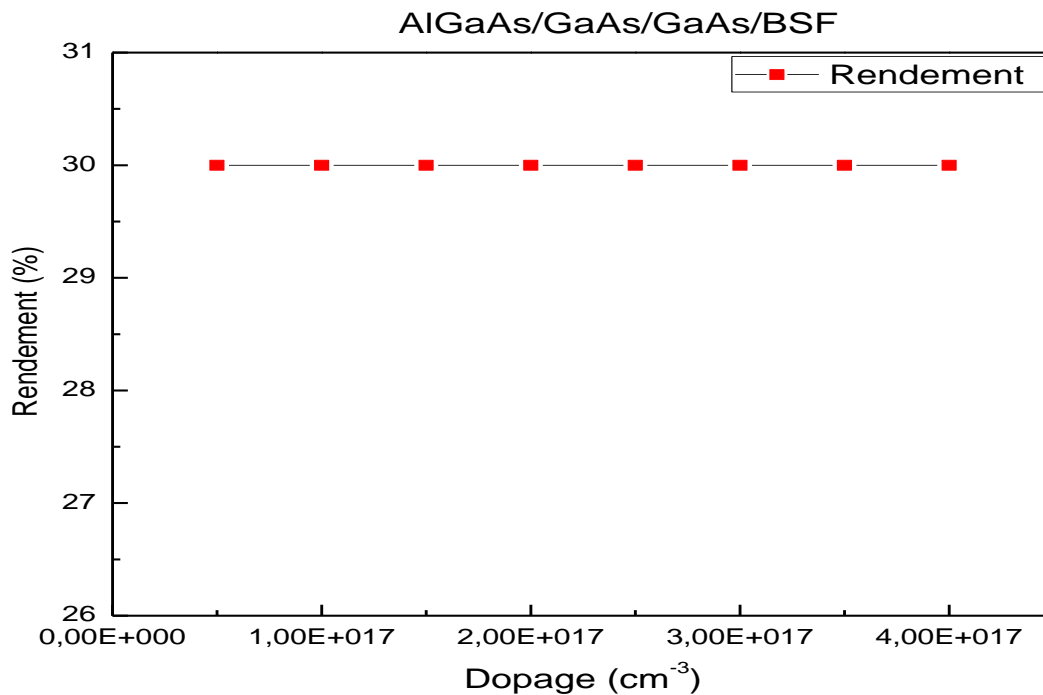


**Fig.III.16.**Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur le rendement AlGaAs/GaAs/GaAs/**BSF**.

La figure (III.16), montre que le rendement de conversion ne change pas avec la variation de l'épaisseur de la couche BSF.

#### III.4.2.6. Influence du dopage de la couche BSF sur le rendement

La figure au-dessous, montre que le rendement de conversion ne change pas avec la variation du dopage de la couche BSF.



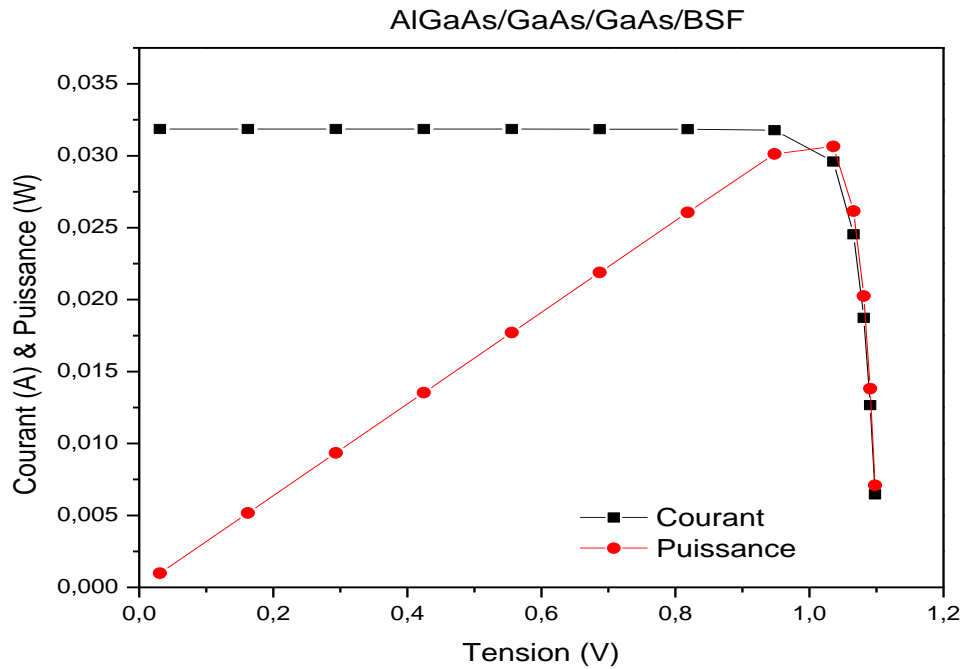
**Fig.III.17.**Influence de dopage de la couche BSF sur le rendement

AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF

Les paramètres optimaux de l'épaisseur et du dopage de la structure B sont résumés dans le tableau au-dessous (tableau III.5).

**Tableau.III.5.** les paramètres optimaux de l'épaisseur et le dopage de la structure B

	l'émetteur	la base	BSF
l'épaisseur (μm)	0.1	4	1
Le dopage (cm <sup>-3</sup> )	0.5 E+17	1. E+17	2.E+18



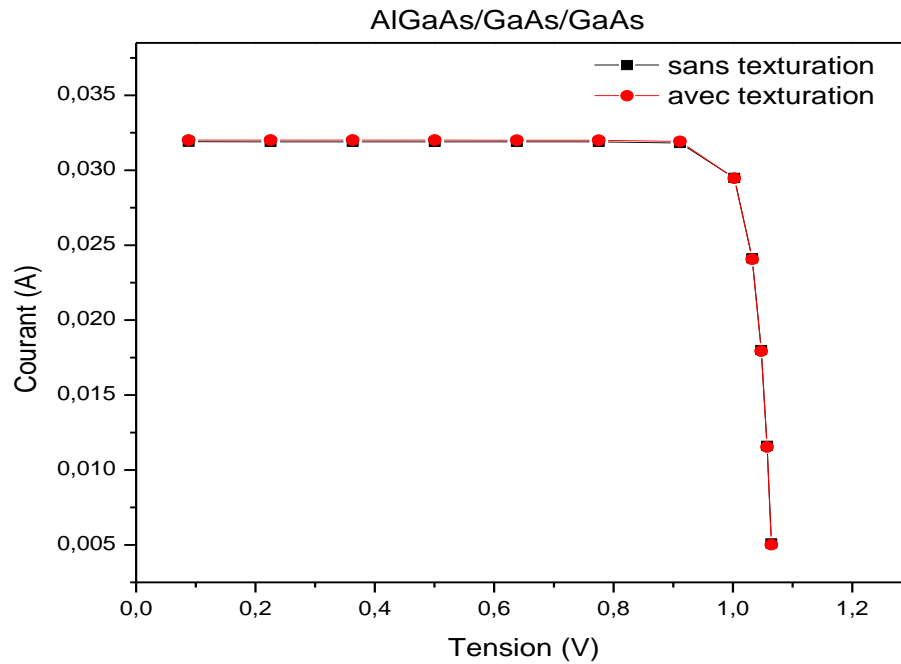
**Fig. III.18.** Caractéristique (courant-puissance) en fonction de la tension pour la structure optimal AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF.

### III.5. Effet de la texturation

La texturation de la surface avant, permet le confinement des rayonnements solaire dans le matériau, cette couche a un angle optimal pour bien piéger la lumière en vue d'optimiser l'absorption et de décaler la photo-génération vers la surface avant. Nous traçons l'allure suivante présentant les caractéristique courant-tension des deux structures A et B qui suivent :

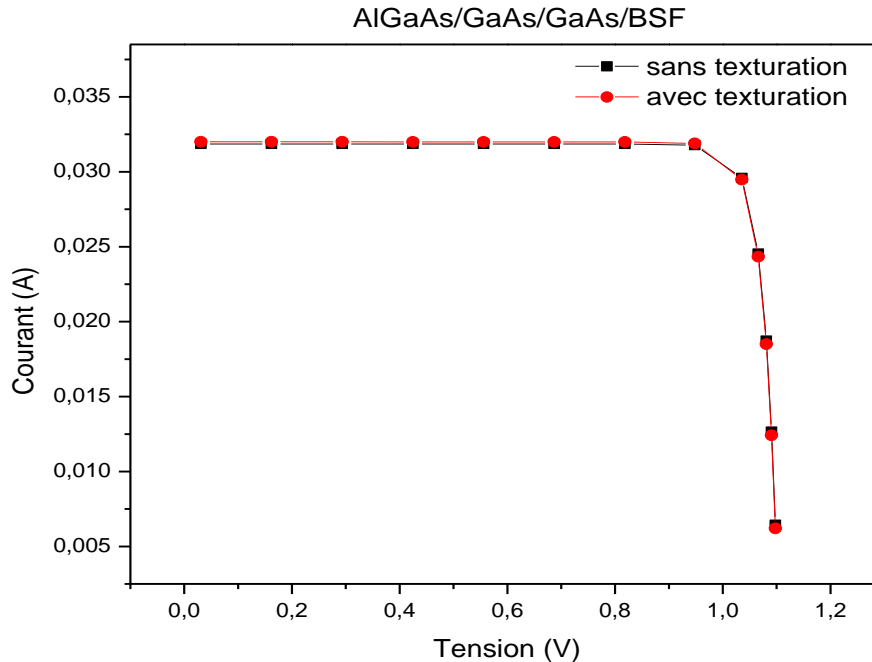
#### ✚ Structure A

Nous remarquons qu'il y a une différence de rendement 0.1% entre les deux structures ce qui signifie l'importance de texturation des faces solaire dans le but d'améliorer les performances de la structure.



**Fig.III.19.**Caractéristique courant-tension de la cellule solaire (avec et sans texturation).

 **Structure B**



**Fig.III.20.**Caractéristique courant-tension de la cellule solaire (avec et sans texturation).

D'après la figure (III.20), on remarque que l'effet de la couche de texturation est bon par rapport la première structure. En comparant la caractéristique I-V avec et sans texturation, nous remarquons qu'il y a une très faible différence qui conduit à une différence de rendement égale à 0.3%.

**Tab.III.6.** Paramètres photovoltaïques de la structure A et B avec et sans texturation.

	La structure	$I_{cc}$	$V_{co}$	$P_m$	$\eta(\%)$	FF(%)
Sans texturation	AlGaAs/GaAs/GaAs	0.318 A	1.070 V	0.0299 W	29.9%	87.8%
	AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF	0.319 A	1.104 V	0.0310 W	31%	88.02%
Avec texturation	AlGaAs/GaAs/GaAs	0.319 A	1.068 V	0.0299 W	29.9%	87.7%
	AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF	0.320 A	1.098 V	0.0310 W	31%	88.2%

### III.6. Conclusion

Dans ce travail, on a montré que l'utilisation de l'environnement PC1D est efficace et opérant pour la simulation des caractéristiques des cellules photovoltaïques. En comparant les deux structure étudiées, il est claire que la structure de type AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF présente des performances meilleurs que celles de type AlGaAs/GaAs/GaAs, grâce à la couche BSF qui influe directement sur l'amélioration du rendement de conversion.

### III.7. Références de chapitre III

- [1] Benaïcha Mouna, Etude des matériaux semi-conducteurs III-V application à la conversion photovoltaïque, MAGISTER EN PHYSIQUE, 2007.
- [2] Z.Abada. Etude des cellules photovoltaïques à base de GaInP et GaAs à haut rendement. Mémoire de magister en électronique. Université de Constantine (2000).
- [3] Mohamed Bouaouina. Contribution à l'étude et à l'optimisation des performances des cellules solaires à base de GaAs et de Si. Mémoire de magister en physique énergétique. Université de Constantine (2001).

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire photovoltaïque à monojonction PN à base le GaAs et leur ternaire AlGaAs par le simulateur PC1D. En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction. L'analyse et l'interprétation des résultats. Le logiciel PC1D compte parmi les outils de simulation les plus simples dans l'étude des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

On a présenté les résultats de l'étude pour deux structures. La première est formé par une couche fenêtre AlGaAs, couche émettrice GaAs les deux dopée de type p, une base GaAs dopée de type n et le substrat de type n. Deuxièmement, on a ajouté dans la même structure précédente une couche BSF pour examiner l'effet de cette couche sur le rendement de conversion. Les résultats de l'étude sont générés par le simulateur PC1D. On à joué sur l'épaisseur et le dopage de l'émetteur ( $\text{GaAs}_{(p)}$ ) et la base ( $\text{GaAs}_{(n)}$ ) pour extraire les paramètres optimales pour les deux propositions.

D'après les résultats, nous avons constaté une amélioration générale dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec l'ajout d'une couche BSF (AlGaAs), notamment dans le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), le facteur de forme  $FF$ , la puissance maximale  $P_{max}$  et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$ . A titre d'exemple, la densité de courant de court circuit  $J_{sc}$  s'améliore de 0.318 A à 0.319 A et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$  rend plus grand de 29.9% à 31%. Concernant l'effet de texturation de 0.5  $\mu\text{m}$  sur le rendement de conversion pour les deux structures proposées, on remarque une faible variation dans le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme ( $FF$ ), résultant une immobilisation dans le rendement et la puissance maximale.

Il est claire que la structure de type AlGaAs/GaAs/GaAs/BSF présente des performances meilleurs que celles de type AlGaAs/GaAs/GaAs, grâce à la couche BSF qui influe directement sur l'amélioration du rendement de conversion.

### Résumé :

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement des cellules photovoltaïques à base de GaAs qui enregistre, en effet, le meilleur rendement de conversion ( $> 30\%$ ) pour une cellule monojonction ces dernières années.

Dans ce travail de simulation, nous utilisons le simulateur PC1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de GaAs. Nous évaluons le rendement électrique  $\eta$  pour deux structure monojonction PN avec et sans texturation. Par la suite nous nous intéressons au dopage et à l'épaisseur des trois couches (AlGaAs, GaAs et la couche BSF) pour étudier l'influence de celles-ci sur le rendement électrique de la structure.

**Mots Clés :** Cellule solaire, photovoltaïque, PC1D, simulation, AlGaAs, GaAs.

### Abstract:

In this work, we use the simulator PC1D, to study the performances of the solar cells based on (GaAs). We evaluate the efficiency  $\eta$  for two monojonction structure PN with and without texturation. Thereafter, we are interested by the doping and the thickness of the layers (AlGaAs, GaAs and a BSF layer) to investigate the influence of these -ones on the conversion efficiency of these structures.

**Keys Words:** Solar cells, photovoltaic, PC1D, simulation, AlGaAs, GaAs.

### ملخص:

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية أصبح الرجوع الى الطاقات المتجددة ضروريا و بشكل خاص (الطاقة الشمسية الكهروضوئية).ولهذا السبب بات التطوير لجيل جديد من الخلايا الضوئية القائمة على اساس GaAs تبدو في الواقع واعدة،حيث فاق اداء هذه الخلايا اكبر من 30% في السنوات الاخيرة.

في هذه المحاكاة نستخدم برنامج PC1D لدراسة اداء الخلايا الشمسية القائمة على GaAs.حيث نقيم المردود الكهربائي  $\eta$  للهيكليين النموذجين، ونهتم بعد ذلك بسمك وشوائب الطبقات الثلاثة (AlGaAs, GaAs, و الطبقة BSF) لدراسة تأثير هذه الاخيرة على المردود الكهربائي للخلية الضوئية.

**كلمات مفتاحية :** الخلايا الشمسية , الكهروضوئية ، PC1D ، المحاكاة ، AlGaAs, GaAs