

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université SAAD DAHLEB BLIDA-1

Faculté de Technologies

Département des énergies renouvelables



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique en :

## **Energies Renouvelables**

Option : Conversion Photovoltaïque

Par :

- AMINE YOUSRA
- AMRANE TOUFIK

**Thème**

### **Modélisation et optimisation d'une cellule solaire n-c-AlGaAs / p-c-GaAs**

Soutenu devant le jury composé par :

**Dr. AIT SAHED. O**

**Dr. MAZOUZ. H**

**Dr. BEDIA. A**

**Président**

**Promotrice**

**Examinatrice**

Juillet 2021

## Résumé

L'énorme augmentation des prix de l'énergie a considérablement amplifié l'attention pour les énergies renouvelables, en particulier les cellules solaires. Cela se reflète dans l'élargissement important de la recherche dans ce domaine. La technologie des cellules solaires à couche mince offre toujours la possibilité de réduire les coûts de fabrication.

Dans ce travail, nous avons choisi de tester l'effet de la concentration de dopage et de l'épaisseur des couches sur les performances des cellules solaires à couche mince d'AlGaAs afin de trouver des valeurs optimums pour le bon fonctionnement de la cellule et d'obtenir le meilleur rendement de conversion en utilisant le logiciel de simulation numérique SCAPS 1D.

**Mots clés :** cellule solaire, couche mince, AlGaAs, SCAPS 1D

## Abstract

The huge increase of energy prices has amplified the attention for renewable energies significantly in particular solar cells. This is reflected in the important enlargement of research in this area. Thin-film solar cells technology still offers the possibility of reducing the manufacturing costs.

In this work we chose to test the effect of doping concentration and layers thickness on the performance of AlGaAs thin film solar cell in order to find optimum values for the proper functioning of the cell and to obtain the best conversion efficiency using SCAPS 1D digital simulation software.

**Key words :** solar cell, thin layer, AlGaAs, SCAPS 1D

## ملخص

أدت الزيادة الهائلة في أسعار الطاقة إلى تضخيم الاهتمام بالطاقات المتجددة بشكل كبير ولا سيما الخلايا الشمسية. وينعكس هذا في التوسع المهم للبحث في هذا المجال. لا تزال تقنية الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة توفر إمكانية تقليل تكاليف التصنيع.

في هذا العمل اخترنا اختبار تأثير تركيز المنشطات وسمك الطبقات على أداء الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة (زرنكسيد ألومنيوم الغاليوم) من أجل إيجاد القيم المثلى للتشغيل السليم للخلية والحصول على أفضل كفاءة تحويل باستخدام برنامج سكابس الرقمي للمحاكاة.

**كلمات مفتاحية:** الخلايا الشمسية، طبقة رقيقة، زرنكسيد ألومنيوم الغاليوم، سكابس

## Dédicace

A

*Nos très chères mères adorées*

*Nos très chers et regrettés pères*

*Nos chers frère et sœurs*

*Nos cousins et cousines*

*Toute nos familles*

*Notre encadreur Dr. MAZOUZ*

*Tous mes collègues et mes amis*

*Tous ceux que j'aime*

*Moi Mr. Amrane je dédie ce travail à mes oncles ma tante maternelle  
qui ma soutenue tout le long de mon parcours scolaire*

*Et à ma tante paternelle décédé Just avant ma soutenance*

*Ainsi que mes deux frère Otman et Abdellah*

*Et à mon petit frère et protégé Mr. Rabah*

*Moi Mlle. Amine je dédie ce travail et tout mon parcours scolaire à  
mes deux chères adoré porter dans mon cœur*

*Mon père et mon frère*

*Mes neveux et nièces adorés*



## **Remerciement**

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, Ce travail a été encadré par Madame MAZOUZ, qui trouvera ici l'expression de nos profondes gratitude, et nos sincères remerciements et reconnaissances pour son aide précieux, ses conseils pertinents et objectifs.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs remarques.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nos famille et collègues ainsi que nos enseignant qui nous ont accompagné tout le long de notre cursus*



# SOMMAIRE

Résumé	I
Dédicace	II
Remerciement	III
Sommaire	IV
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des symboles et acronymes	VIII
Introduction Générale	1
<b>Chapitre I : Principaux concepts et grandeurs liés à l'étude des cellules solaires</b>	
I.1 Introduction.	4
I.2 Généralité sur les cellules solaires	4
I.2.1 Principe de l'effet photovoltaïque	4
I.2.2 Description de la cellule solaire	5
I.2.3 Grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire	7
I.2.3.1 Courant de court-circuit	7
I.2.3.2 Tension de circuit ouvert	7
I.2.3.3 Facteur de forme	7
I.2.3.4 Rendement de conversion énergétique	7
I.3 Cellules solaires à hétérojonctions (AlGaAs/GaAs) :	8
I.3.1 Le composé GaAs	8
I.3.2 L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	10
I.3.3 Propriétés optiques	11

I.3.3.1 Indice de réfraction	11
I.3.3.2 Le coefficient d'absorption	12
I.3.4 La hétérojonctions (AlGaAs/GaAs)	12
I.4 Etat de l'art	15
I.4.1 simulation numérique de AF. Meftah	15
I.4.2 épitaxie organométallique en phase vapeur de A.A. Saxena	16
I.4.3 Réflecteur Bragg interne de M.Z. Shvarts	17
I.4.4 Etude de l'effet du gradage avant et complet de Nadia Messei	18
I.4.5 Amélioration et simulation des performances de M. Belmekki	19
I-5 Cellules solaires multi-jonctions à haut rendement	21
I-5 : Conclusion	21

## Chapitre II : Le logiciel de modélisation numérique SCAPS-1D

II.1 Introduction	22
II.2 Présentation du logiciel SCAPS-1D	23
II.3 Modélisation de la cellule AlGaAs/GaAs	23
II.3.1 L'utilisation du logiciel	23
II.3.2 Edition de la structure d'une cellule solaire	24
II.3.3 Contacts	25
II.3.4 Définition des couches	26
II.4 Conclusion	27

## Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction	29
III.2 la forme dimensionnelle de la cellule solaire sous modélisation	29
III.3 Résultats et discussion	31
III.3.1 Effet du dopage sur la cellule	31
III.3.1.1 L'influence de la concentration des accepteurs Na	31
III.3.1.2 L'influence de la concentration des donneurs Nd	32
III.3.2 Effet de l'épaisseur sur la cellule	33
III.3.2.1 L'influence de l'épaisseur de la couche p, $X_b$	33
III.3.2.2 L'influence de l'épaisseur de la couche n, $X_j$	35
III-4 conclusion	37
Conclusion générale	40
Bibliographie	42

## Liste des figures

<b>Figure I-1</b> : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	6
<b>Figure I-2</b> : Structure cristalline du GaAs, liaison tétraédrique de la structure Zinc-blende .....	9
<b>Figure I-3</b> : Structure du GaAs.....	10
<b>Figure I-4</b> : Diagramme de bande d'énergie d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs .....	14
<b>Figure I-5</b> : Exemple de structure d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs.....	14
<b>Figure I-6</b> : structure de la cellule solaire utilisée.....	15
<b>Figure I-7</b> : caractéristique I-V de la cellule .....	16
<b>Figure I-8</b> : structure utilisé 52.....	17
<b>Figure I-9</b> : A) structure utilisée B) caractéristique I-V.....	18
<b>Figure I-10</b> : structure utilisée.....	19
<b>Figure I-11</b> : structure utilisée.....	20
<b>Figure I-12</b> : caractéristique I-V .....	20
<b>Figure I-13</b> : Principe de la cellule à plusieurs jonctions.....	21
<b>Figure II-14</b> : fenêtre d'exécution "action panel" du logiciel SCAPS.....	24
<b>Figure II-15</b> : Solar Cell Definition Panel .....	25
<b>Figure II-16</b> : Panneau des propriétés des contacts .....	25
<b>Figure II-17</b> : Propriétés de la couche ajoutée .....	26
<b>Figure III-18</b> : Représentation dimensionnelle de la cellule solaire sous modélisation.....	29
<b>Figure III-19</b> : variation des paramètres ( $J_{cc}$ , FF, $V_{co}$ , $\eta$ ) en fonction de la concentration des accepteurs $N_a$ .....	31
<b>Figure III-20</b> : La variation des paramètres ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF, $\eta$ ) en fonction de la concentration des donneurs $N_d$ .....	32
<b>Figure III-21</b> : Variation des paramètres ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF, $\eta$ ) en fonction de la largeur de la zone p, $X_b$ ..	34
<b>Figure III-22</b> : Variation des paramètres ( $J_{cc}$ , $V_{co}$ , FF, $\eta$ ) en fonction de la largeur de la zone p, $X_j$ ..	35
<b>Figure 23</b> : caractéristiques J-V de la cellule optimisée.....	36

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1</b> : Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs.....	8
<b>Tableau I-2</b> : Propriétés physiques de quelques matériaux à 300 K° .....	9
<b>Tableau I-3</b> : Propriétés physiques de Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As .....	11
<b>Tableau I-4</b> : résultats obtenus par la simulation.....	16
<b>Tableau I-5</b> : résultats obtenus par cette épitaxie.....	17
<b>Tableau I-6</b> : résultats obtenus .....	18
<b>Tableau I-7</b> : résultat obtenu.....	19
<b>Tableau I-8</b> : résultat obtenu.....	20
<b>Tableau III-9</b> : paramètres utilisés pour la simulation.....	30
<b>Tableau III-10</b> : comparaison entre les résultats obtenues et celles des recherches précédentes.....	36

## Liste des symboles et acronymes

Symboles	Acronymes (unité)
$\lambda$	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )
$q$	La charge électrique élémentaire = $1,6 \cdot 10^{-19}$ (C) $\lambda$
$h$	Constante de Planck
$C$	Vitesse de lumière
$E_F$	Energie de fermi (eV)
$E_V$	La bande de valence (eV)
$E_C$	La bande de conduction (eV)
$E_g$	L'énergie de bande interdite (eV)
$T$	Température ambiante ( $K^\circ$ )
$K$	La constante de Boltzmann ( $1.381 \cdot 10^{-23}$ /K)
$\rho(x)$	La densité de charge d'espace
$a$	Constante de maille ( $Å^\circ$ )
$N_A/N_d$	Les concentrations d'accepteurs/donneurs ionisés
$n$	Les densités d'électrons libres
$p$	Les densités de trous libres
$\alpha$	Le coefficient d'absorption ( $cm^{-1}$ )
$\tau_{p0}, \tau_{n0}$	Les durées de vie des trous et d'électrons ( $\mu\text{s}$ )
$I_{cc}$	Courant de court-circuit ( $A/cm^2$ )
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert (V)
$FF$	Facteur de forme (%)
$\eta$	Rendement de conversion d'énergie
$I_{ph}$	Photo courant (mA)
$X_j$	l'épaisseur de la couche $N^+$
$X_b$	l'épaisseur de la couche $P^+$
$W$	l'épaisseur de la zone intrinsèque
$\mu_p, \mu_n$	Mobilité des trous/électrons
$\chi$	Affinité électronique (eV)
$\epsilon_r$	Constante diélectrique (F/m)
$v_{thn}/ v_{thp}$	Vitesse thermique des électrons (m/s)
$N_c/N_v$	Densité d'état effective BC/BV ( $cm^{-3}$ )



---

# *Introduction générale*

---

## **Introduction générale**

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant.

Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire PV, etc... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m<sup>2</sup>. La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion (transformation) de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire [1].

Cette transformation de l'énergie solaire en énergie électrique, nécessite l'utilisation d'un dispositif photovoltaïque (cellules solaires), ce sont des dispositifs à semi-conducteur qui transforment 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 créée 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.

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques est intimement lié aux propriétés des matériaux dont ils sont faits, et de nombreux problèmes de science des matériaux rencontrés dans la compréhension des cellules solaires existantes et le développement des cellules plus efficaces, moins coûteuses et plus stables.

L'efficacité des cellules solaires s'est améliorée au fil du temps en augmentant le nombre de jonctions. Chaque jonction est capable d'extraire l'énergie d'une partie du spectre solaire [2]. Une nouvelle voie pour améliorer l'efficacité consiste à utiliser des matériaux photovoltaïques à base d'alliage tels que l'arséniure de gallium (GaAs).

Les cellules solaires à base de GaAs sont au centre des efforts de développement considérable en raison de leur efficacité de conversion élevée 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. 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 (tandem, triple, quadruple) et / ou un éclairage concentré.

Les cellules solaires à base de GaAs ont des avantages significatifs supplémentaires. En comparaison avec les cellules solaires en silicium, Le GaAs possède des propriétés électroniques qui sont supérieures à celles du silicium. La vitesse de saturation des électrons est plus élevée et leur mobilité est une plus grande. Relativement aux cellules de silicium, un autre avantage de GaAs est dans le fait qu'il présente un gap d'énergie direct, ce qui signifie qu'il peut être utilisé pour émettre de la lumière de façon efficace.

Un problème important s'opposait au développement des cellules solaires au GaAs, est celui de la vitesse de recombinaison en surface [3]. Ce problème a été réduit grâce à la croissance d'une couche de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sur la surface du GaAs. Cette couche a été utilisée pour passiver la surface avant des cellules. Les deux matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison peuvent exister à l'interface entre les deux semi-conducteurs. C'est ainsi que le rendement des cellules à base de GaAs a dépassé pour la première fois 20% vers la fin des années 70 quand Woodall et Hovel ont fabriqué des cellules aux hétérostructures avec un rendement de 22% [4].

Le mémoire comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre présente la théorie de la conversion photovoltaïque, la structure et les propriétés physiques du GaAs et du AlGaAs, et les paramètres de sortie, mesurés par d'autres chercheurs, des cellules solaires hétéro jonction à base de GaAs et AlGaAs.
- Le deuxième chapitre présente le logiciel SCAPS-1D et les étapes de travail avec ce dernier
  - Modélisation de la structure
  - Simulation
  - Acquisition des résultats et le calcul des caractéristiques  $i(v)$ , FF,  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$
- Le troisième chapitre comportera nos résultats et nos observations ainsi qu'une comparaison avec les résultats des autres chercheurs.

---

*Chapitre I*

*Principaux concepts et  
grandeurs liés à l'étude des  
cellules solaires*

---

# Chapitre I : Principaux concepts et grandeurs liés à l'étude des cellules solaires

## I.1 Introduction :

Durant les dernières années et dans les recherches des rendements les plus approfondies obtenues par la conversion photovoltaïque, les cellules solaires à base des matériaux III-V ont été largement utilisées, plus particulièrement les cellules solaires à l'arséniure de gallium (GaAs) à travers la fenêtre (AlGaAs), et ce à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace [5]. Dans ce chapitre, nous définirons et exposerons quelques propriétés des semi-conducteurs de III-V en particulier les composés *GaAs*, *GaAlAs*, afin d'arriver à la présentation des principales caractéristiques d'une hétéro structure.

## I.2 Généralité sur les cellules solaires :

Les cellules photovoltaïques sont basées sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée par cette force électromotrice peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule

### I.2.1 Principe de l'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui se demandait pourquoi certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière, il a pu démontrer qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique. En 1905 Albert Einstein a écrit sur l'effet photovoltaïque en postulant que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites permettant la création d'un courant électrique [6]. L'effet photovoltaïque s'appuie principalement sur trois grands principes dont l'action combinée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

De ce fait, un dispositif photovoltaïque doit être constitué :

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie.

- Et d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible que possible.

L'optimisation de ce dispositif passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large que possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire ; ainsi qu'une différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'elle soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait du semi-conducteur le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. On en trouve actuellement en arséniure de gallium (AsGa) pour les applications spatiales, en silicium cristallin (c-Si) pour les applications terrestres et en silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) pour des cellules bas coût.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création de paires électron-trou. Un champ électrique permanent, au sein du matériau, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison. Ce champ peut être généré de plusieurs manières : par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonctions), soit par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diodes Schottky), ou encore à l'interface de zones d'un même semi-conducteur dont les concentrations en électrons libres sont différentes (homojonctions ou jonction PN)

### **I.2.2 Description de la cellule solaire :**

Un cristal semi-conducteur dopé de type P est recouvert d'une zone très mince dopée de type N et d'épaisseur  $e$ . Entre les deux zones se trouve la jonction PN. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode  $k$  tandis qu'une plaque métallique  $a$  recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du  $\mu\text{m}$ . Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode.

Les photons incidents créent des porteurs dans les régions neutres N, P et dans la région de déplétion.

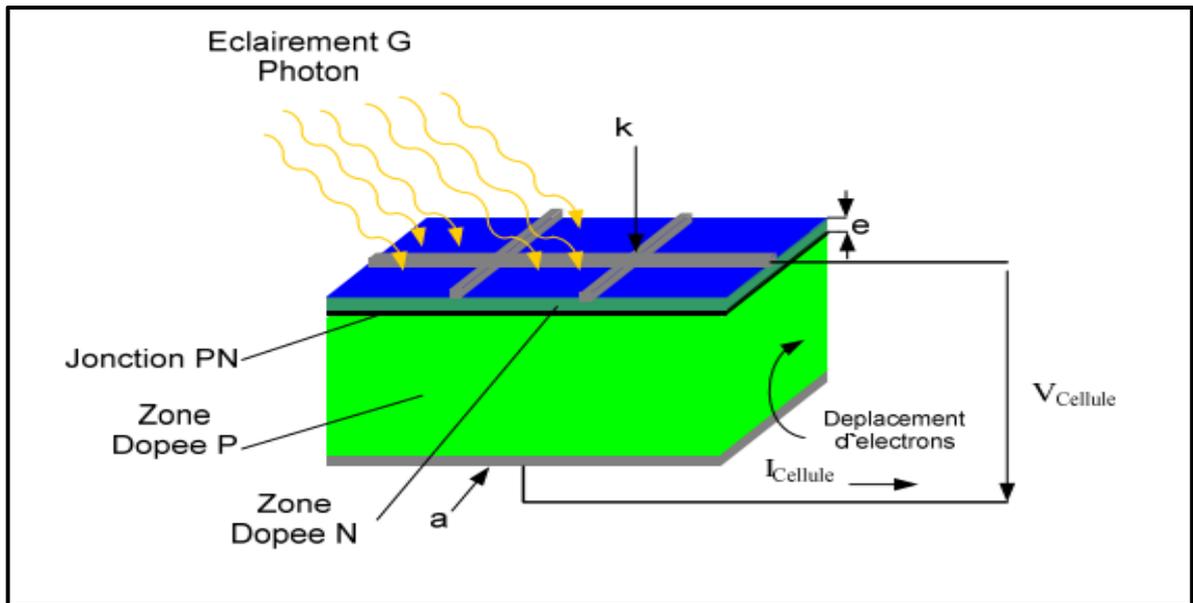


Figure I-1 : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les photons porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la région N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la région de déplétion sont "envoyés" par le champ électrique dans la région P (pour les trous) ou dans la région N (pour les électrons) où ils seront majoritaires ; on aura un photon courant de diffusion.

- Dans la région de déplétion, les paires électrons / 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 un photon courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photon courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. Le courant débité par la cellule solaire est le photon courant diminué du courant direct

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{I-1})$$

1)

Avec:

$$I_d = I_s \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{K T} \right) - 1 \right) + I_R \quad (\text{I-2})$$

Où :

q : charge élémentaire ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C).

K : constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K).

T : température (K).

V : tension aux bornes de la jonction (Volt).

$I_s$  : le courant de saturation.

$I_R$  : le courant de recombinaison de la région de déplétion.

### **I.2.3 Grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire :**

#### **I.2.3.1 Courant de court-circuit :**

Le courant de court-circuit (short circuit)  $I_{cc}$  est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il s'accroît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température

#### **I.2.3.2 Tension de circuit ouvert :**

La tension de circuit ouvert (open circuit)  $V_{co}$  est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroît avec la température et change peu avec l'intensité lumineuse. La tension en circuit ouvert peut être calculée à partir de :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I-3)$$

#### **I.2.3.3 Facteur de forme :**

Le facteur de forme (FF) représente l'efficacité de la cellule et peut également nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée ( $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ) et la puissance idéale ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ )

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (I-4)$$

#### **I.2.3.4 Rendement de conversion énergétique :**

Le rendement de conversion énergétique est le rapport entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire incident  $P_0$ . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance  $P_0$

L'énergie du rayonnement solaire n'est pas totalement transformée en électricité. Une bonne partie du rayonnement est simplement réfléchi sur la surface de la cellule. Une autre partie de l'énergie

apportée par la lumière pénètre parfaitement, mais ne sert qu'à augmenter l'agitation thermique (l'échauffement) et donc la température de la cellule.

Les grilles et les barreaux métalliques déposés sur la surface supérieure de la cellule constituent une perte dans le rendement, car elles diminuent la surface de la cellule exposée à la lumière solaire.

La fraction qui compte est celle qui contribue à la création des paires électron-trou dans la jonction ; dans les meilleures conditions du laboratoire, cette fraction est de 23%, c'est donc à peine le quart de la lumière qui est converti en électricité

Le tableau suivant représente les grandeurs photovoltaïques mesurées pour certaines cellules solaires de laboratoire à base de GaAs.

Structure	Aire (cm <sup>2</sup> )	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>cc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)	Centre de test
Hétérojonction-PPN	1	1.021	27.8	83.7	23.7	-
GaAs(AlGaAs)	3.91	1.022	28.2	87.1	25.1	NREL
GaAs-couche mince	4	1.011	27.6	83.8	23.3	NREL
PN-GaAs (AlGaAs)	1	1.036	27.5	85.1	24.2	ISE
PN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	26.9	83.5	23.4	ISE
PIN-GaAs(AlGaAs)	8	1.038	27.1	82.9	23.3	ISE
GaAs(AlGaAs)	4	1.022	28.2	87.1	25.1	ISE

**Tableau I-1** : Grandeurs photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs

(a) National Renewable Energy Laboratory (USA).

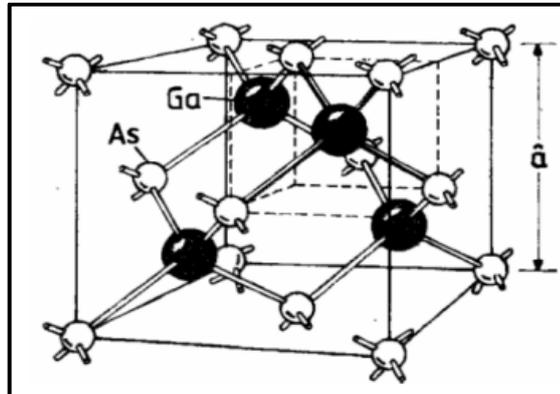
(b) Fraunhofer Institute for Solar Energy System (Allemagne).

### I.3 Cellules solaires à hétérojonctions (AlGaAs/GaAs) :

#### I.3.1 Le composé GaAs :

Le faible coût, la grande disponibilité, la grande conductivité thermique et la bonne qualité de son oxyde ont fait du silicium le matériau clé de l'électronique. Toutefois, les semi-conducteurs III-V sont rapidement apparus comme des matériaux de choix pour des applications spécialisées. Notamment, l'arséniure de gallium (GaAs) et le phosphore d'indium (InP) se sont distingués par leur grande mobilité électronique et leur bande interdite directe. Leur grande mobilité électronique permet d'obtenir des dispositifs à haute rapidité de commutation en électronique, alors que leur bande interdite directe favorise les transitions optiques. Ces propriétés, communes à la plupart des matériaux III-V sont très prises dans l'élaboration des dispositifs optoélectroniques Le GaAs cristallise dans une structure de type

zinc-blende Il est formé de deux réseaux cubiques à faces centrées identiques qui s'interpénètrent, l'un contenant les atomes de gallium 'Ga', l'autre l'atome de l'arsenic 'As'. Le décalage entre les deux réseaux est d'un quart de la diagonale principale du cube. On a donc quatre paires d'atomes par cellule conventionnelle. Les liaisons tétraédriques covalentes telles que les liaisons Si-Si par exemple ou partiellement ioniques et partiellement covalentes telles que les liaisons Ga-As dans le cas qui nous concerne sont la base de la structure zinc-blende. En effet, chaque atome est l'origine de quatre liaisons orientées dans l'espace suivant les axes de symétrie d'un tétraèdre régulier



**Figure I-2** : Structure cristalline du GaAs, liaison tétraédrique de la structure Zinc-blende

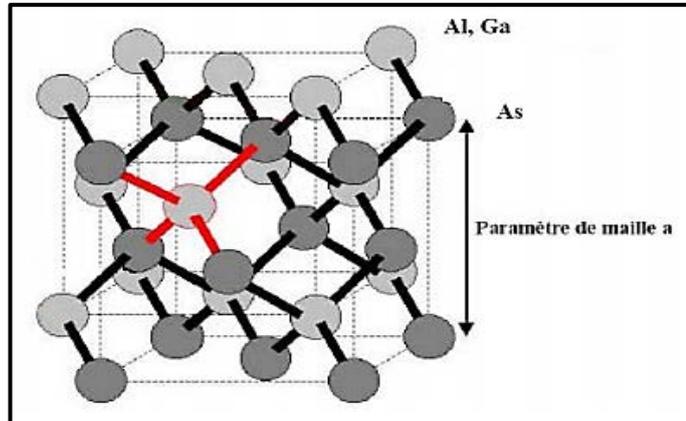
Ces conditions sont bien satisfaites pour certains semi-conducteurs, tel que l'arséniure de gallium et le germanium, où le désaccord entre les paramètres cristallins est de l'ordre de 0.088% et les coefficients de dilatation ont des valeurs voisines, ainsi que pour le GaAs et le  $Al_xGa_{1-x}As$ . comme le montre le tableau suivant

Propriété	Symbole	Ge	GaAs	$Al_xGa_{1-x}As$
Paramètre de maille (Å)	$a$	5.658	5.653	5.655
Densité ( $g.cm^{-3}$ )	$\rho$	5.32	5.36	4.88
Structure de bande	$E_g$	Indirect	Directe	Directe
Energie de gap		0.67	1.424	1.798
Concentration intrinsèque ( $cm^{-3}$ )	$N_i$	$2.4 \cdot 10^{13}$	$2.2 \cdot 10^6$	$2.4 \cdot 10^{13}$
Mobilité des électrons ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ )	$\mu_n$	4000	8800	-
Mobilité des trous ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ )	$\mu_p$	2000	400	-
Vitesse de saturation (cm/s)	$v_s$	-	$10^7$	$10^7$
Conductivité thermique ( $W/cm.^{\circ}C$ )	$K$	0.6	0.46	-
Coefficient de dilatation thermique ( $10^{-6}/^{\circ}C$ )	$\alpha_{th}$	5.5	6.4	6.04
Permittivité relative	$\epsilon_r$	16.3	13.18	12.24

**Tableau I-2** : Propriétés physiques de quelques matériaux à 300 K°

### I.3.2 L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ :

C'est une solution solide de GaAs et de AlAs. Les paramètres physiques relatifs à cet alliage peuvent être obtenus par combinaison des paramètres correspondants au GaAs et à l'AlAs. Les deux matériaux ont la même structure cristalline. Avec des paramètres physiques voisins et se rejoignent pour une température de 900 °C environ



*Figure I-3 : Structure du GaAs*

Elle se compose de deux sous réseaux cubiques à faces centrées, décalés d'un quart de la grande diagonale du cube, et occupés l'un par l'anion (As), et l'autre par le cation (Al, Ga).

La nature de la transition énergétique de l'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  change selon le taux d'aluminium  $x$ , avec  $0 < x < 1$ . Pour une fraction d'aluminium inférieure à 0,45, la transition de l'alliage est identique à celle du GaAs caractérisé par une transition directe. La transition devient indirecte quand le taux d'aluminium devient supérieur à 0,45. Les différents paramètres physiques du  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sont donnés en fonction de la fraction  $x$  de l'aluminium. 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  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  est très intéressant car, lorsque ( $x$ ) varie de 0 à 1, c'est à dire lorsque l'on passe de GaAs à AlAs, la structure de bande passe d'une bande interdite à gap direct de valeur de 1.43 eV à une bande interdite à gap indirect de valeur de 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.

Les différents paramètres physiques du  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  en fonction de la fraction  $x$  de l'aluminium sont résumés sur le tableau (I-3) [7]

Paramètres	Unité	Symbole	Loi
Constante de maille	Å	$a$	$5.6533+0.0078x$
Energie de gap	eV	$E_g$	$X < 0.45/1.424+1.247x$ $X > 0.45/1.9+0.125x+0.143x^2$
Constante diélectrique	F/m	$\epsilon_r$	$12.9-2.84x$
Mass effective d'électron		$m_e$	$0.063+0.083x$
Mass effective de trou		$m_h$	$0.51+0.25x$
Affinité électronique	eV	$\chi$	$X < 0.45/4.07-1.1x$ $X > 0.45/3.64-0.14x$
Mobilité des électrons	$\text{cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_n$	$8*10^3-2.2*10^4x+10^4x^2$
Mobilité des trous	$\text{cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_p$	$370-970x+740x^2$
Vitesse thermique des électrons	m/s	$v_{thn}$	$(4.4-2.1x)10^5$
Vitesse thermique des trous	m/s	$v_{thp}$	$(1.8-0.5x)10^5$
Densité d'état effective BC	$\text{cm}^{-3}$	$N_c$	$2.5*10^{19}*(0.063+0.83x)^{3/2}$
Densité d'état effective BV	$\text{cm}^{-3}$	$N_v$	$2.5*10^{19}*(0.51+0.25x)^{3/2}$

Tableau I-3 : Propriétés physiques de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

### I.3.3 Propriétés optiques :

#### I.3.3.1 Indice de réfraction :

La réflexion d'un rayonnement électromagnétique sur une surface du semi-conducteur est caractérisée par les paramètres comme l'indice de réfraction  $n$  ; constant  $\epsilon$  et coefficient de réflexion  $R$ . la réflexion du rayonnement réduit l'intensité de flux lumineux pénétrant dans le semi-conducteur et par suit le phénomène d'absorption. Dans un milieu matériel la vitesse de la lumière dans un matériau est différente de celle du vide suivant la relation :

$$n(x) = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon(x)} \quad (I-5)$$

Tel que :

- $n(x)$  : L'indice de réfraction
- $\epsilon(x)$  : Constant diélectrique
- $v$  : La vitesse de rayonnement dans le milieu matériel

Pour tous les semi-conducteur  $n$  varie entre 3 et 4 de sorte que  $R$  varie entre 0.25 et 0.35. Le constant diélectrique  $\varepsilon(x)$  donné par la formule suivante [8].

$$\varepsilon(x) = 12.4 - 3.12x \text{ Pour } 0 < x < 1$$

Généralement le coefficient de réflexion  $R$  donne par l'équation suivante :

$$R = \left( \frac{n(x)-1}{n(x)+1} \right)^2 \quad (\text{I-6})$$

### I.3.3.2 Le coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption dépend de l'état du semi-conducteur et précisément de sa bande interdite. Il en proportionnel à la différence  $[h\nu - Eg]$ . [9]

$$\alpha(E, x) = \alpha_0 \times (h\nu - Eg)^L \quad (\text{I-7})$$

Tel que  $\alpha_0$  constant qui dépend du matériau [10]

$$\alpha_0 = 3.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \text{ Pour le GaAs}$$

$$L = 1/2 \text{ Pour transition direct}$$

$$L = 2 \text{ Pour transition indirect}$$

L'équation (I-7) est valable pour les bandes d'énergie supérieure à la bande interdite  $h\nu > Eg$

Les semi-conducteurs réels contiennent généralement des impuretés (piège), qui peuvent créer un ou plusieurs niveaux énergétiques dans la bande interdite ( $E_t$ ), Donc l'électron prend une première absorption pour passer de  $E_v$  vers  $E_t$  et une deuxième absorption pour passer de  $E_t$  vers  $E_c$  alors dans les bandes d'énergie  $h\nu < Eg$  le coefficient d'absorption varie sous la forme exponentielle [5].

$$\alpha(v, x) = \alpha_0 \exp \frac{h\nu - Eg}{\varepsilon} \quad (\text{I-9})$$

Tel que :  $\alpha_0 = 10^{-4}/\text{cm}$  ,  $\varepsilon = 0.01 \text{ eV}$

### I.3.4 La hétérojonctions (AlGaAs/GaAs) :

Les rendements les plus élevés en utilisant tous les matériaux ont été obtenus avec des cellules solaires à base de GaAs et de ses solutions solides. L'arséniure de gallium a la largeur de bande interdite optimale pour une cellule solaire à jonction unique, un coefficient d'absorption élevé, et la plus grande efficacité théorique (environ 39% pour les cellules à jonction unique de moins de 1000 suns). Il peut également être utilisé sous forme d'alliage avec d'autres matériaux tels que AlGaAs et InGaAs

Lorsque deux matériaux, Métal - Semi-conducteur, semi-conducteur- semi-conducteur ou métal-isolant-semi-conducteur, sont en contact, il s'établit un échange de charges pour que le système trouve un équilibre thermodynamique.

Dans les cellules solaires conventionnelles à homojonction PN, l'émetteur est formé par la zone fortement dopée, alors que dans les cellules solaires à hétérojonction cet émetteur est remplacé par le matériau à large bande interdite. Cependant, le problème de recombinaison en surface rencontré dans la cellule photovoltaïque à homojonction est remplacé par le problème des recombinaisons au niveau de l'interface. Il est à signaler que le taux de recombinaison au niveau de l'interface est considérablement inférieur au taux de recombinaison au niveau de la surface. Cette comparaison est valable dans le cas où le matériau à large bande interdite est passif, c'est-à-dire, présente une faible absorption et une recombinaison nulle.

Le GaAs est le semi-conducteur monocristallin le plus utilisé, ou souvent, les solutions solides (Al, Ga) As. C'est le matériau le plus performant du point de vue rendement de conversion, bien que sa densité soit 203 fois supérieure à celle du silicium

Les cellules solaires à base de l'arséniure de gallium sont largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ceci à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations spatiales. Cependant, un problème important s'opposait au développement des cellules solaires au GaAs, à savoir celui de la vitesse de recombinaison en surface. C'est la raison pour laquelle le rendement réalisé pour les premières cellules solaires était seulement de l'ordre de 10%. Ce problème a été résolu partiellement grâce à la croissance d'une couche de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sur la surface du GaAs. Les deux matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison pouvant exister à l'interface entre les deux semi-conducteurs. C'est ainsi que le rendement des cellules au GaAs a dépassé la première fois 20% La cellule supérieure étant une hétérostructure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . L'état graduel de la bande interdite de la couche AlGaAs résulte en un champ interne qui réduit les pertes par recombinaison à la surface et en volume. Il a été découvert que l'interface AlGaAs/GaAs est caractérisée par une faible densité de défauts étendus en raison des mêmes paramètres de réseau à la température de croissance des couches épitaxiales. Celle-ci a fournie dans les cellules solaires basées sur des structures AlGaAs/GaAs une faible vitesse de recombinaison surfacique (S) et deux côtés porteurs de collecte avec un rendement élevé  $\eta = 25\text{-}27\%$ .

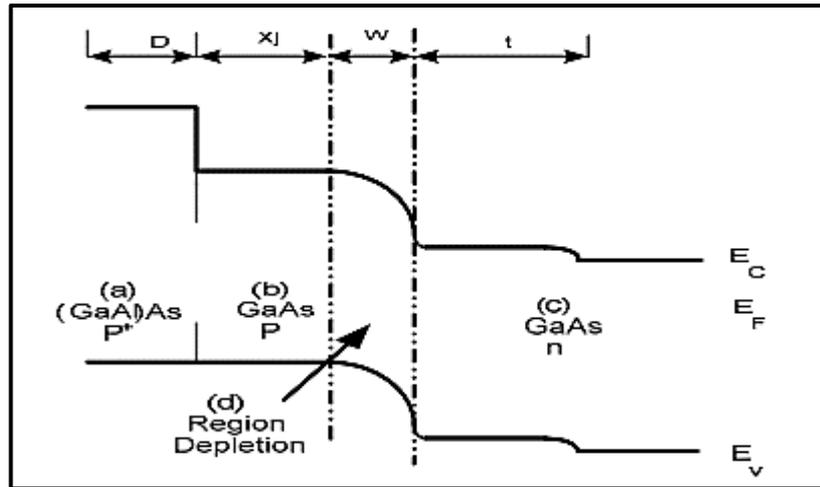


Figure I-4 : Diagramme de bande d'énergie d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs[11]

Les principaux éléments dans la cellule sont :

- un contact ohmique supérieur (grille métallique) en : Ni-Al, Ag-Al
- un oxyde transparent conducteur (OTC) : ZnO, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> - une couche absorbante
- Un substrat : le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques. A ceci est parfois ajoutée une couche antireflet (MgF<sub>2</sub>). Ces matériaux ne sont pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques particulières

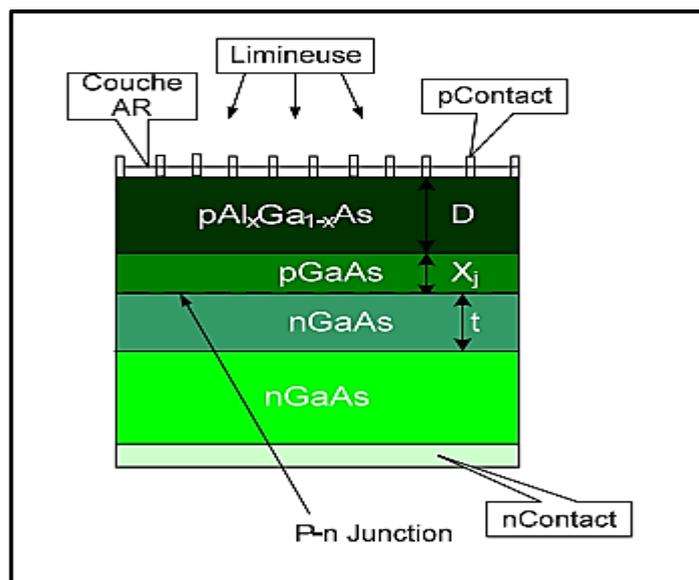


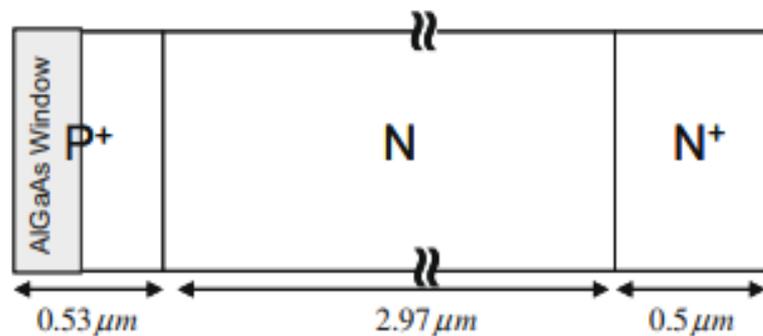
Figure I-5 : Exemple de structure d'une cellule solaire à hétérojonction AlGaAs/GaAs[11]

## I.4 Etat de l'art

### I.4.1 simulation numérique de AF. Meftah

En 2010 AF. Meftah a fait une simulation numérique pour étudier l'effet de la composition de la fenêtre  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sur les caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire  $p^+ - n - n^+$  GaAs sous éclairage AM0. GaAs est généralement préféré pour les applications spatiales en raison de sa technologie plus avancée et moins chère, de son efficacité de conversion et de sa résistance aux rayonnements plus élevées. Malheureusement, toutes les cellules solaires GaAs souffrent d'une perte de porteur en raison d'une vitesse de recombinaison de surface élevée. Afin de réduire une telle perte, une couche de surface à large bande interdite d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  est placée sur le dessus d'un émetteur GaAs pour créer une cellule solaire à hétérojonction. Ce travail est fait pour une raison de prédire la dégradation de la caractéristique J-V d'une cellule solaire  $p^+ - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / p^+ - n - n^+ - \text{GaAs}$ , deux cellules ont été utilisées avec différentes structures de fenêtres. Les deux cellules ont une fenêtre/émetteur de type  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}) - p^+$  et des couches collectrices de type  $n^+$  qui ont respectivement 0,53 et 0,5  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, tandis que l'épaisseur de la région de base de type  $n$  est de 2,97  $\mu\text{m}$ . Pour la première cellule la fenêtre est  $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$  avec une épaisseur de 0.03 $\mu\text{m}$  tandis que pour la deuxième cellule la fenêtre est  $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}/\text{Al}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  avec une épaisseur de 0.09 $\mu\text{m}$ . Les résultats obtenus ont montré que les cellule 1 et 2 ont donné un rendement de 15.65% et 15% respectivement donc on constate que la fenêtre graduelle d' $\text{AlGaAs}$  diminue le rendement.

La structure utilisée pour cette cellule est montrée sur la figure II-20 :



*Figure I-6 : structure de la cellule solaire utilisée [11]*

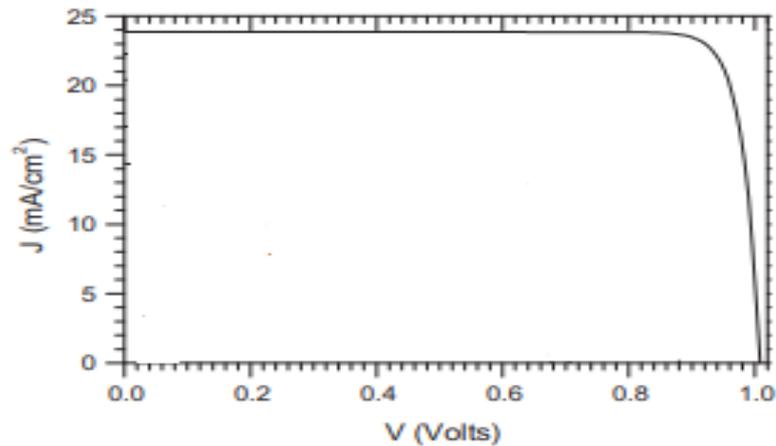


Figure I-7 : caractéristique I-V de la cellule [11]

Le tableau I-4 résume les résultats obtenus pour les deux cellules :

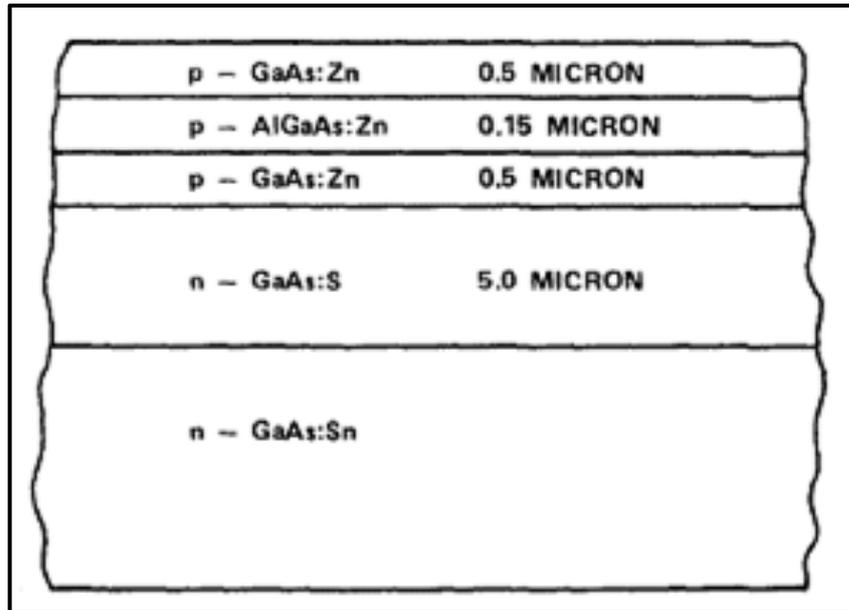
	Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	Vco (V)	FF (%)	η (%)
<b>Cellule 1</b>	24	1.01	88	15.65
<b>Cellule 2</b>	23	1.01	88	15

Tableau I-4 : résultats obtenus par la simulation [11]

#### I.4.2 épitaxie organométallique en phase vapeur de A.A. Saxena

En 1980, A.A. Saxena a démontré un rendement égal 20,9% avec des cellules solaires Al<sub>0,9</sub>Ga<sub>0,1</sub>As / GaAs fabriquées par épitaxie organométallique en phase vapeur. L'amélioration des performances est attribuée à une structure repensée qui utilise une fine couche de fenêtre et les résultats sont obtenus pour un rayonnement égal à 814W/m<sup>2</sup>. De plus, le boîtier de cellules solaires a été amélioré pour inclure une grille de connexion à courant élevé fixée en permanence à la surface avant des cellules solaires et représente une étape importante vers la transformation des cellules de concentrateur GaAs en un photovoltaïque pratique.

La structure utilisée dans ce travail est montrée dans la figure II-22 :



*Figure I-8 : structure utilisé 52 [12]*

Le tableau II-5 résume les résultats obtenus :

Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	Vco (V)	FF (%)	η (%)
18.9	0.8	78	20.9

*Tableau I-5 : résultats obtenus par cette épitaxie [12]*

### I.4.3 Réflecteur Bragg interne de M.Z. Shvarts

En 2001, M.Z. Shvarts a montré que Les cellules solaires AlGaAs / GaAs avec réflecteur Bragg interne déposée par MOCVD basse pression a montré des gains d'efficacité et de stabilité au rayonnement par rapport aux cellules solaires AlGaAs / GaAs standard. Il a été démontré que la connaissance du rôle du réflecteur Bragg en tant que barrière de potentiel de surface arrière et miroir sélectif en relation avec les paramètres de structure interne des cellules permet d'augmenter la résistance au rayonnement des cellules solaires GaAs. Réduction de l'épaisseur de la base à 1,1-1,5 μm et du niveau de dopage de la base à  $N_D=1*10^{15} \text{ cm}^{-3}$  dans les cellules GaAs.

Les résultats qu'il a obtenus sont présentées sur les figures suivantes

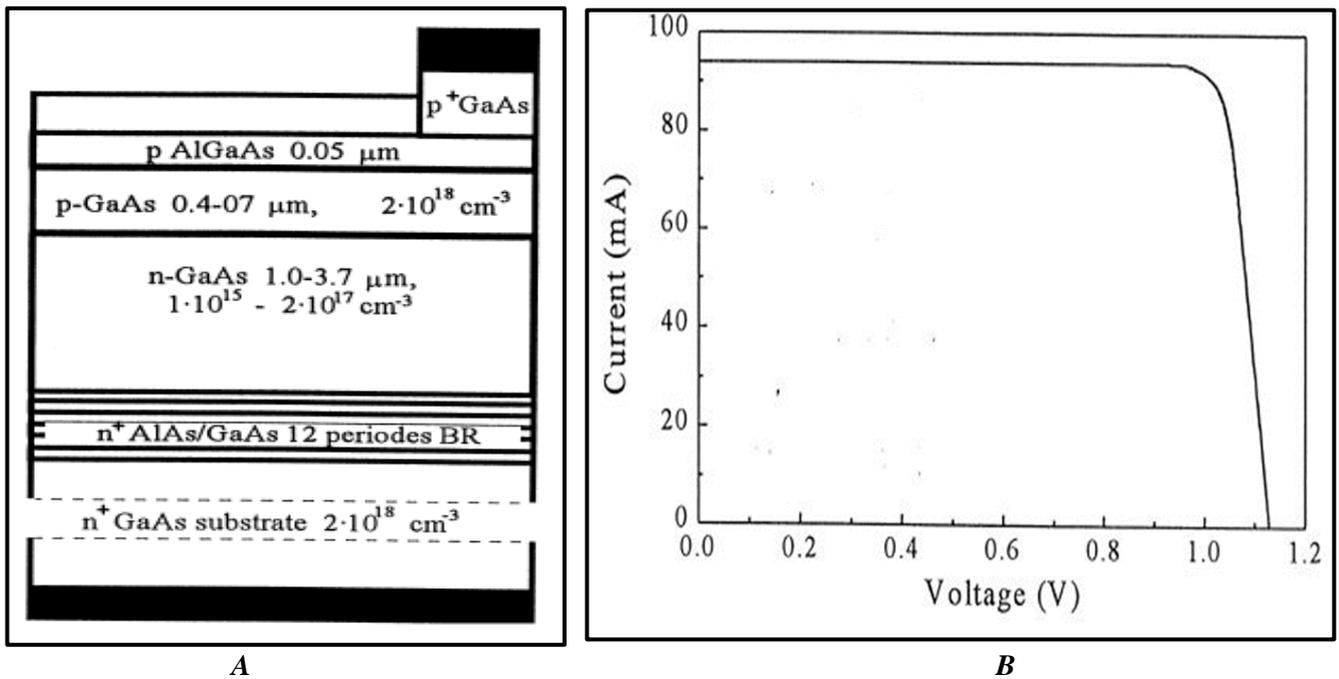


Figure I-9 : A) structure utilisée B) caractéristique I-V [13]

Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	Vco (V)	FF (%)	η (%)
24.8	1.14	87	27.2

Tableau I-6 : résultats obtenus [13]

#### I.4.4 Etude de l'effet du gradage avant et complet de Nadia Messei :

En 2015, Nadia Messei a étudié l'effet du gradage avant et du gradage complet dans une cellule solaire p-i-n AlGaAs. Le gradient est à la fois dans la composition et dans la concentration de dopage. Pour atteindre cet objectif, elle a optimisé le dispositif p-i-n standard dans un premier temps. Ensuite, elle a optimisé le dispositif gradué avant habituel. La simulation du dispositif entièrement gradué a été effectuée et l'observation la plus importante est que la tension en circuit ouvert (Vco) est beaucoup plus élevée que la Vco du dispositif avec une bande interdite uniforme où la densité de tension en circuit ouvert diminue considérablement. Elle a montré qu'une stratégie de gradation avec un dispositif entièrement gradué peut en effet conduire à un échange plus favorable entre Jsc et Vco que ce qui peut être obtenu avec un dispositif AlGaAs uniforme.

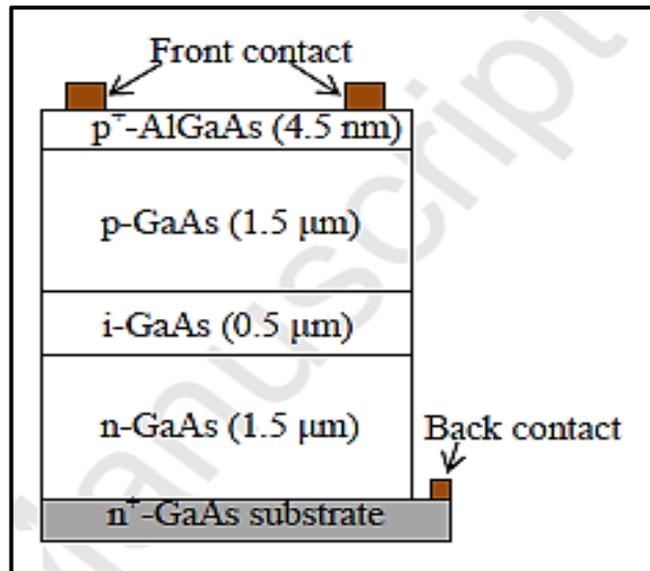


Figure I-10 : structure utilisée [14]

Appareil	Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	Vco (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
Uniforme	31.12	1.1	87.55	30.09
Gradage complet	30	1.35	89	34.01

Tableau I-7 : résultat obtenu [14]

#### I.4.5 Amélioration et simulation des performances de M. Belmekki

En 2019, M. Belmekki, a amélioré un modèle pour simuler les performances, la composition de l'appareil et les paramètres des appareils. Le but de son travail était d'établir un modèle qui permet de prédire une amélioration des rendements des cellules solaires élaborées par des composés hétérostructures ; il a concentré son optimisation par simulation sur une cellule solaire n-c-AlGaAs/p-c-GaAs à champ de surface arrière (BSF), qui est une jonction p/p+. Cette jonction crée une barrière de potentiel qui évite la recombinaison rapide des porteurs minoritaires (électron dans la base), cependant tous les paramètres principaux qui ont un impact important sur la densité de courant de court-circuit, sur la tension en circuit ouvert, sur le facteur de forme et sur le rendement ont été discutés dans ce travail. Généralement la conversion électrique est fonction des concentrations de dopage accepteur et donneur, des épaisseurs de cellule émettrice et de base, de la vitesse de recombinaison surfacique aux contacts avant et arrière et de durée de vie des porteurs (pour les électrons et les trous).

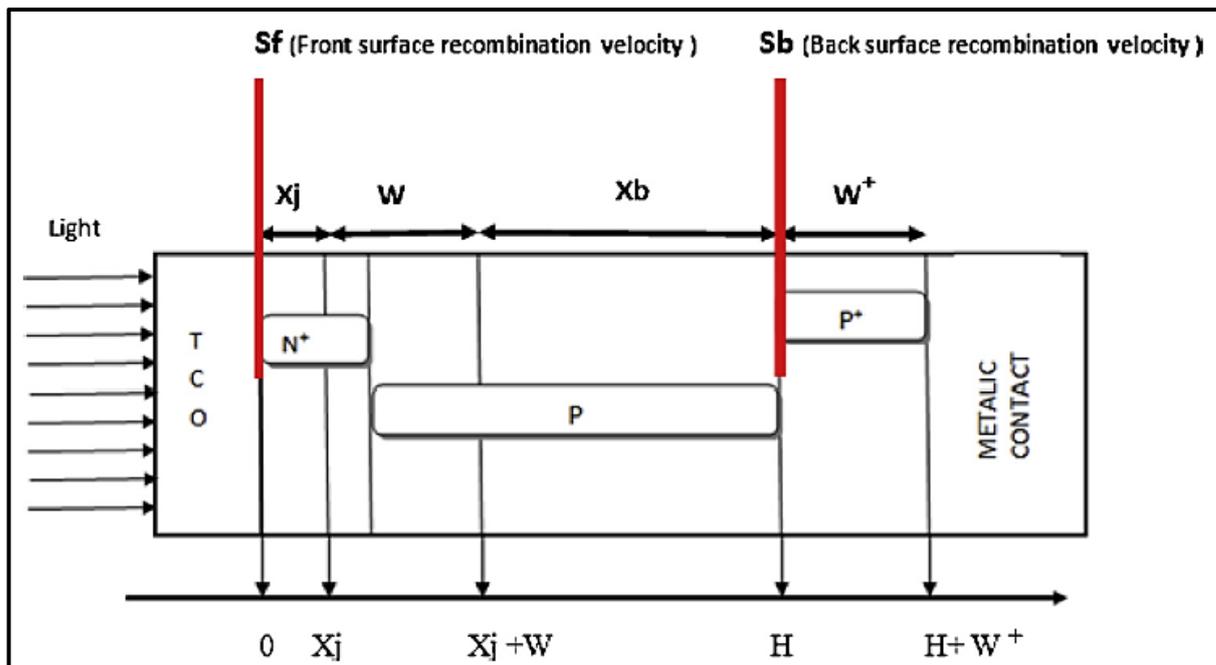


Figure I-11 : structure utilisée [15]

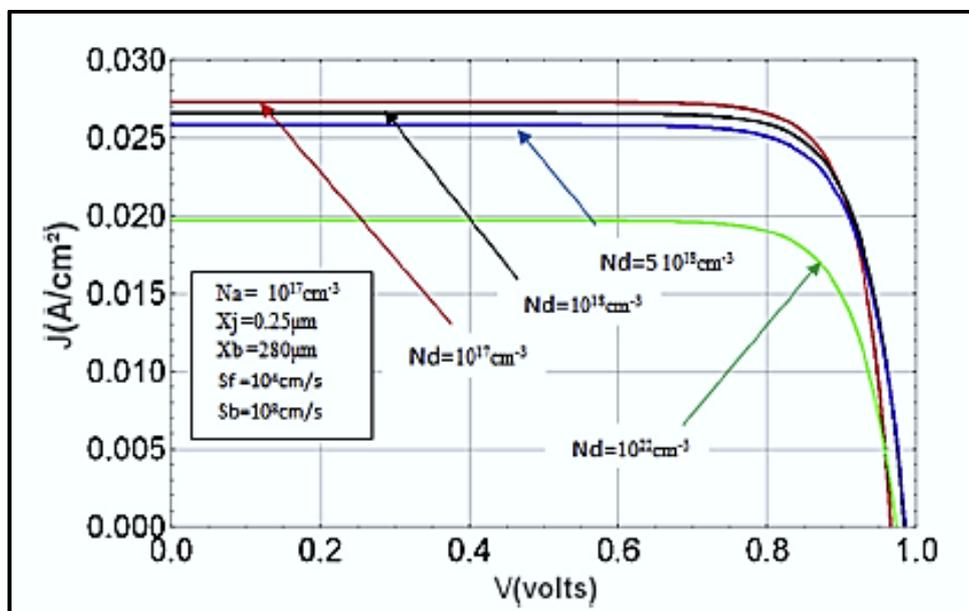


Figure I-12 : caractéristique I-V [15]

Jcc (mA/cm <sup>2</sup> )	Vco (V)	FF (%)	η (%)
25.77	0.985	80	23.8

Tableau I-8 : résultat obtenu [15]

### I-5 Cellules solaires multi-jonctions à haut rendement :

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure I-13). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [16].

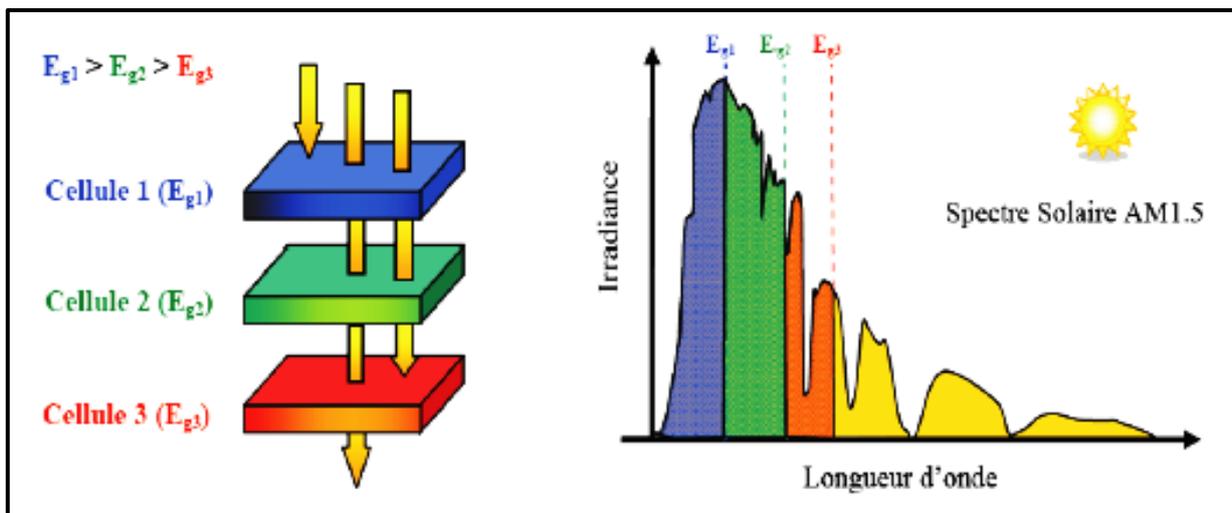


Figure I-13 : Principe de la cellule à plusieurs jonctions [16]

### I-5 : Conclusion :

Ce chapitre constitue le principe de la conversion photovoltaïque, la structure et les propriétés physiques du GaAs et du AlGaAs, et les paramètres de sortie, mesurés par d'autres chercheurs, des cellules solaires à jonction unique.

Plus précisément, Ce chapitre nous a permis d'aborder le fonctionnement et les caractéristiques d'une hétérojonction qui a un rôle primordial dans la cellule solaire.

---

## *Chapitre II*

# *Logiciel de modélisation numérique SCAPS-1D*

---

## Chapitre II : Le logiciel de modélisation numérique SCAPS-1D

### II.1 Introduction :

Dans ce travail nous allons étudier les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) de structure  $n^+pp^+$ . La modélisation permet de définir les différents paramètres de la cellule qui sont généralement, les générations photo-courants, le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF, la puissance de sortie exploitable, et le rendement de conversion  $\eta$ , tous ces paramètres sont proportionnels aux dimensions de la structure et aux paramètres physiques du composant solaire. Ce n'est pas n'importe quelle structure qui peut servir d'une source d'énergie.

Notre recherche se porte essentiellement sur un composant, qui est une jonction P-N pour laquelle notre étude sera menée à l'aide du logiciel de simulation SCAPS-1D afin de lui permettre l'aspect d'une source d'énergie et surtout en concordance avec une rentabilité et efficacité de conversion maximale.

Le travail qui a été fait au paravent [15], nous a permis d'avoir une base de données susceptible de nous servir pleinement dans notre investigation, les dimensions de la structure sont tellement flexibles, qui nous donne la possibilité de faire varier les grandeurs physiques d'une manière objective.

Pour modéliser précisément la sortie électrique dans la plupart des types de cellules, il suffit de résoudre les équations de base des semi-conducteurs avec l'approximation dérive-diffusion :

- Equation de poisson :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (II-1)$$

Avec :  $\rho = q(p - n + N_d^+ - N_a^-)$

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial(nE)}{\partial x} + G - \frac{n-n_0}{\tau_n} \quad (II-2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial(pE)}{\partial x} + G - \frac{p-p_0}{\tau_p} \quad (II-3)$$

- Equation de convection-diffusion :

$$J_n = qn(x)\mu_n E + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (II-5)$$

$$J_p = qp(x)\mu_p E - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (II-6)$$

Avec :

$\epsilon_0\epsilon_r$  : permittivité du sime-conducteur en F/cm

$\rho$  : concentration de charges totales en C/cm<sup>3</sup>

$J_n/J_p$  : densité de courant des électron/trous

$D_n/D_p$  : constante de diffusion des électron/trou

$\mu_n/\mu_p$  : mobilité des électron/trou

## II.2 Présentation du logiciel SCAPS-1D :

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension) est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement : Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers, Stefan Degrave [17-18].

Il a été développé pour simuler de façon réaliste les caractéristiques électriques des cellules solaires en films minces.

Le programme SCAPS-1D trouve des solutions pour :

- Les structures constituées d'un nombre arbitraire des couches semi-conductrices.
- Les profils de dopage quelconques.
- Les distributions énergétiques de donneur / d'accepteurs (niveau unique ainsi qu'uniforme...)

Les grandeurs simulées sont :

- La caractéristique I-V
- La capacitance en fonction de la tension « C-V »
- La capacitance en fonction de la fréquence « C-f »
- Le rendement quantique Q-E

## II.3 Modélisation de la cellule :

### II.3.1 L'utilisation du logiciel :

Après avoir cliqué sur l'icône qui représente le logiciel, la fenêtre figure (II-14) apparait et ça s'appelle le panneau d'action

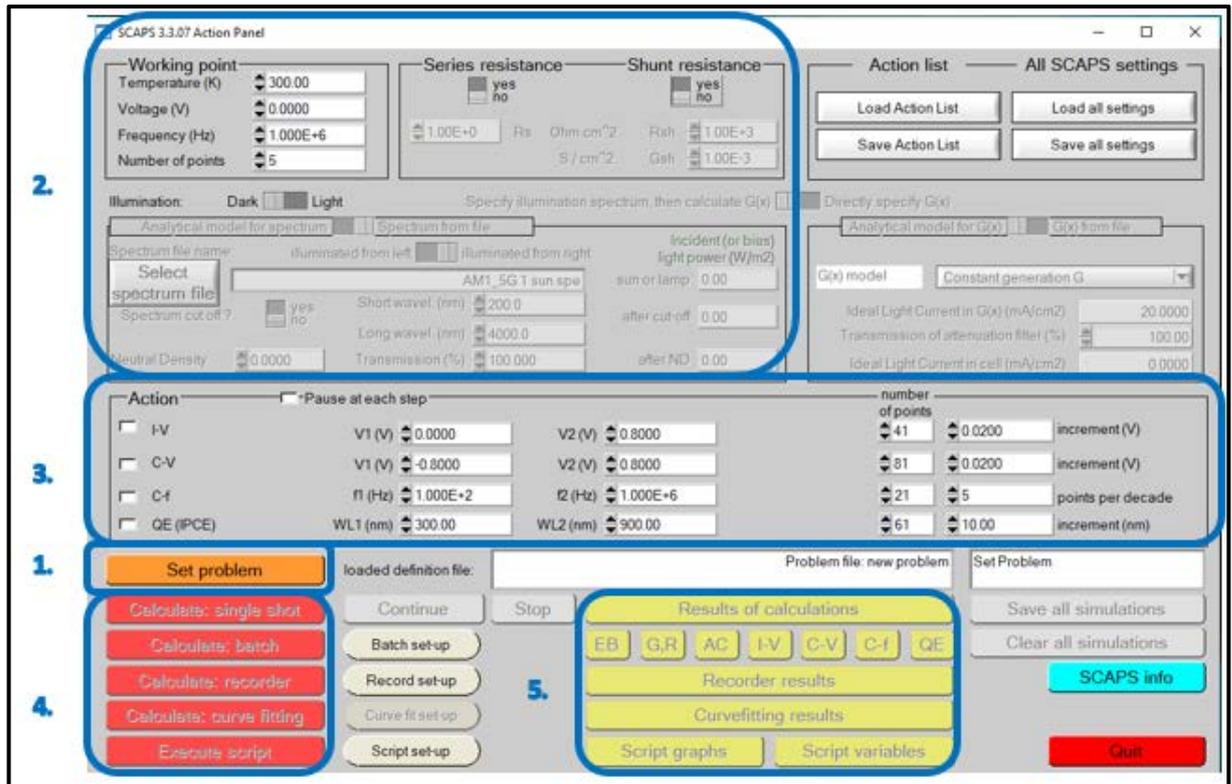


Figure II-14 : fenêtre d'exécution "action panel" du logiciel SCAPS

La signification des blocs numérotés de 1 à 5 est expliquée dans le texte.

1. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
2. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
3. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
4. Commencer le(s) calcul(s).
5. Afficher les courbes de simulation.

### II.3.2 Edition de la structure d'une cellule solaire :

On clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension qui peuvent s'ouvrir avec notepad.exe ou Wordbad.exe. Il est déconseillé de les modifier au risque de les rendre inutilisables par la suite. Les propriétés des couches, des contacts et d'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure (II-15). De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'

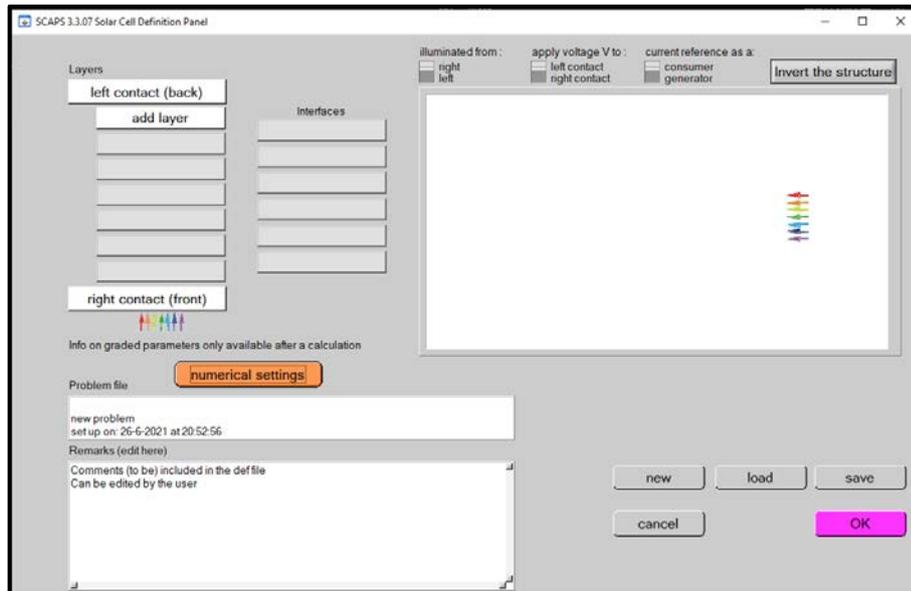


Figure II-15 : Solar Cell Definition Panel

### II.3.3 Contacts

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact ‘CONTACT PROPERTIES PANEL’ s’ouvre, comme le montre la figure (II-16).

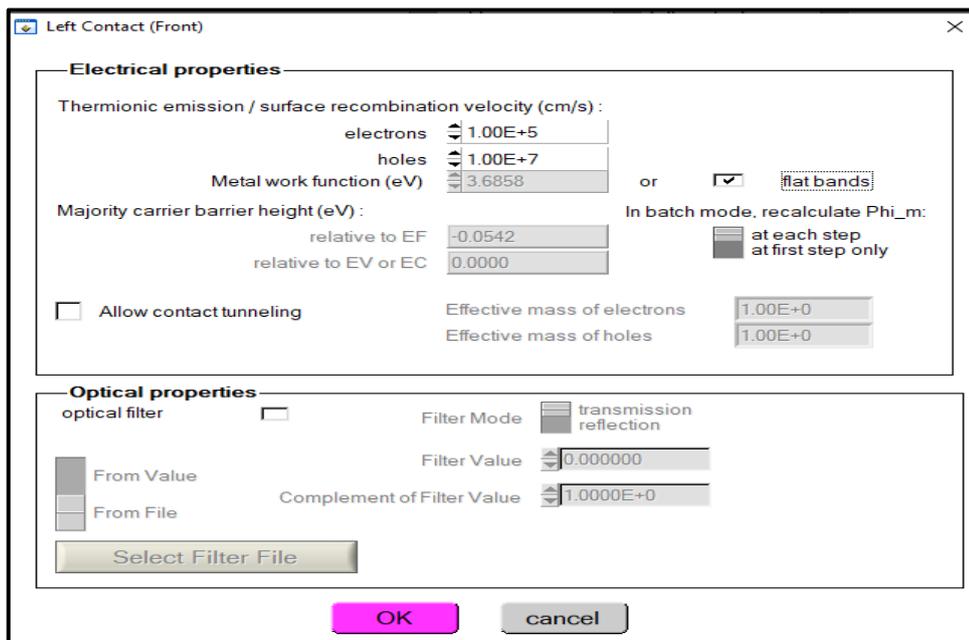


Figure II-16 : Panneau des propriétés des contacts

Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L'effet tunnel (si on veut en tenir compte)

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

### II.3.4 Définition des couches :

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure (II-17)) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

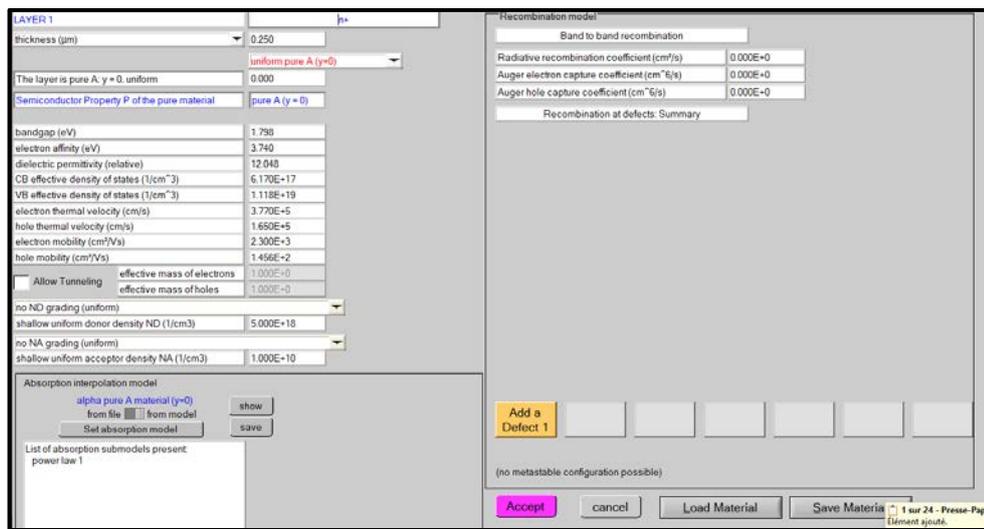


Figure II-17 : Propriétés de la couche ajoutée

Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile.

Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesse thermique des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous.

Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel.

Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniformes, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres.

Dans le cinquième block, on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques, ...)

Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droit du panneau des propriétés de la couche. Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges.

#### **II.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation SCAPS-1D. Nous avons défini sa structure, ses outils et ses capacités permettant de calculer tous les paramètres internes et externes liés à la cellule solaire et générer ainsi ses caractéristiques électriques comme la caractéristique densité de courant – tension (I-V) et la réponse spectrale (QE) ; Ainsi elle est nécessaire pour l'optimisation des structures des dispositifs photovoltaïques.

---

## ***Chapitre III***

### ***Résultats et discussion***

---

## Chapitre III : Résultats et discussion

### III.1 Introduction :

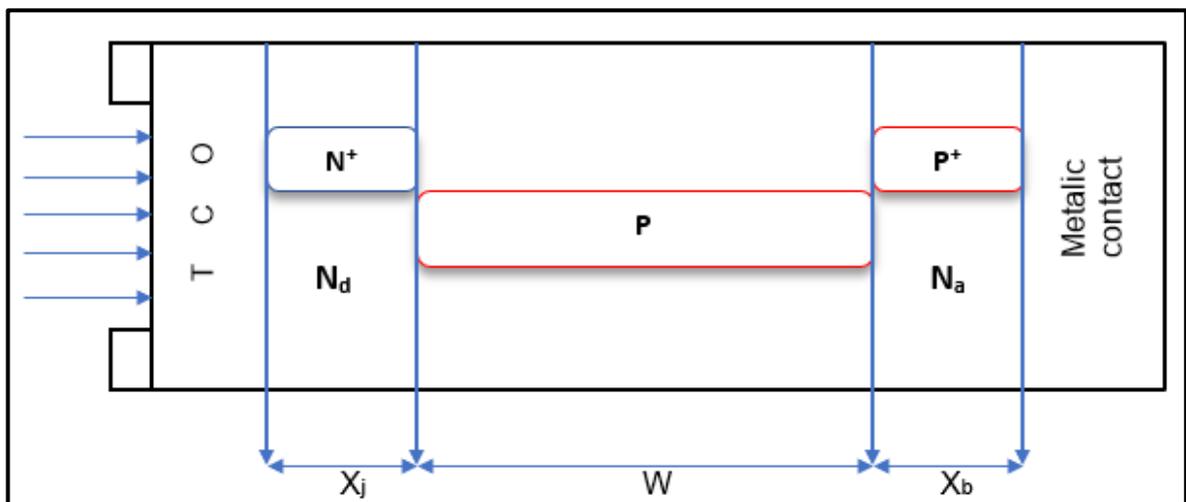
Ces dernières années, en raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. La simulation par le logiciel SCAPS 1D permet de déterminer les caractéristiques électriques des cellules solaires comme les caractéristiques densité de courant – tension (J-V), et par la suite les paramètres photovoltaïques liés à ces caractéristiques tels que la densité du courant de court-circuit ( $J_{cc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ).

Dans ce chapitre nous présentons l'étude des caractéristiques électriques de cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs / GaAs) de structure  $n^+pp^+$  par le logiciel de simulation SCAPS 1D tout en faisant varier la concentration de dopage et l'épaisseur. Compte tenu de l'importance du rôle de l'hétérojonction (AlGaAs / GaAs) on peut voir son impact sur les caractéristiques de la cellule.

Les résultats de la simulation sont présentés sur le tableau III-10 ainsi que les résultats des recherches précédentes.

### III.2 la forme dimensionnelle de la cellule solaire sous modélisation :

Notre travail consiste à faire une modélisation d'une cellule hétérojonction AlGaAs/GaAs, d'où la structure utilisée est représentée dans la figure (III-18) à l'aide du logiciel SCAPS-1D.



*Figure III-18 : Représentation dimensionnelle de la cellule solaire sous modélisation*

$X_j$  : Représente l'épaisseur de la couche  $N^+$

$X_b$  : Représente l'épaisseur de la couche  $P^+$

$W$  : Représente l'épaisseur de la zone intrinsèque

$N_d$  : La concentration du dopage dans l'émetteur

$N_a$  : La concentration du dopage dans la base

Le tableau suivant représente les paramètres utiliser pour la simulation :

Paramètres	Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	GaAs
Band gap (eV)	1.798	1.424
Electron affinity (eV)	3.74	4.07
Dielectric permittivity	12.048	12.9
Effective density of states $N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	$6.17 \cdot 10^{17}$	$4.7 \cdot 10^{17}$
Effective density of states $N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	$1.118 \cdot 10^{17}$	$9 \cdot 10^{18}$
Electron thermal velocity (cm/s)	$3.77 \cdot 10^5$	$4.4 \cdot 10^5$
Hole thermal velocity (cm/s)	$1.65 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^5$
Electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	2300	8500
Hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	145.6	400

**Tableau III-9** : paramètres utilisés pour la simulation

### III.3 Résultats et discussion :

#### III.3.1 Effet du dopage sur la cellule :

##### III.3.1.1 L'influence de la concentration des accepteurs Na :

La figure (III-19) représente variation des paramètres ( $J_{cc}$ , FF,  $V_{co}$ ,  $\eta$ ) en fonction de la concentration des accepteurs Na pour une gamme de dopage allant de  $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$  à  $1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$

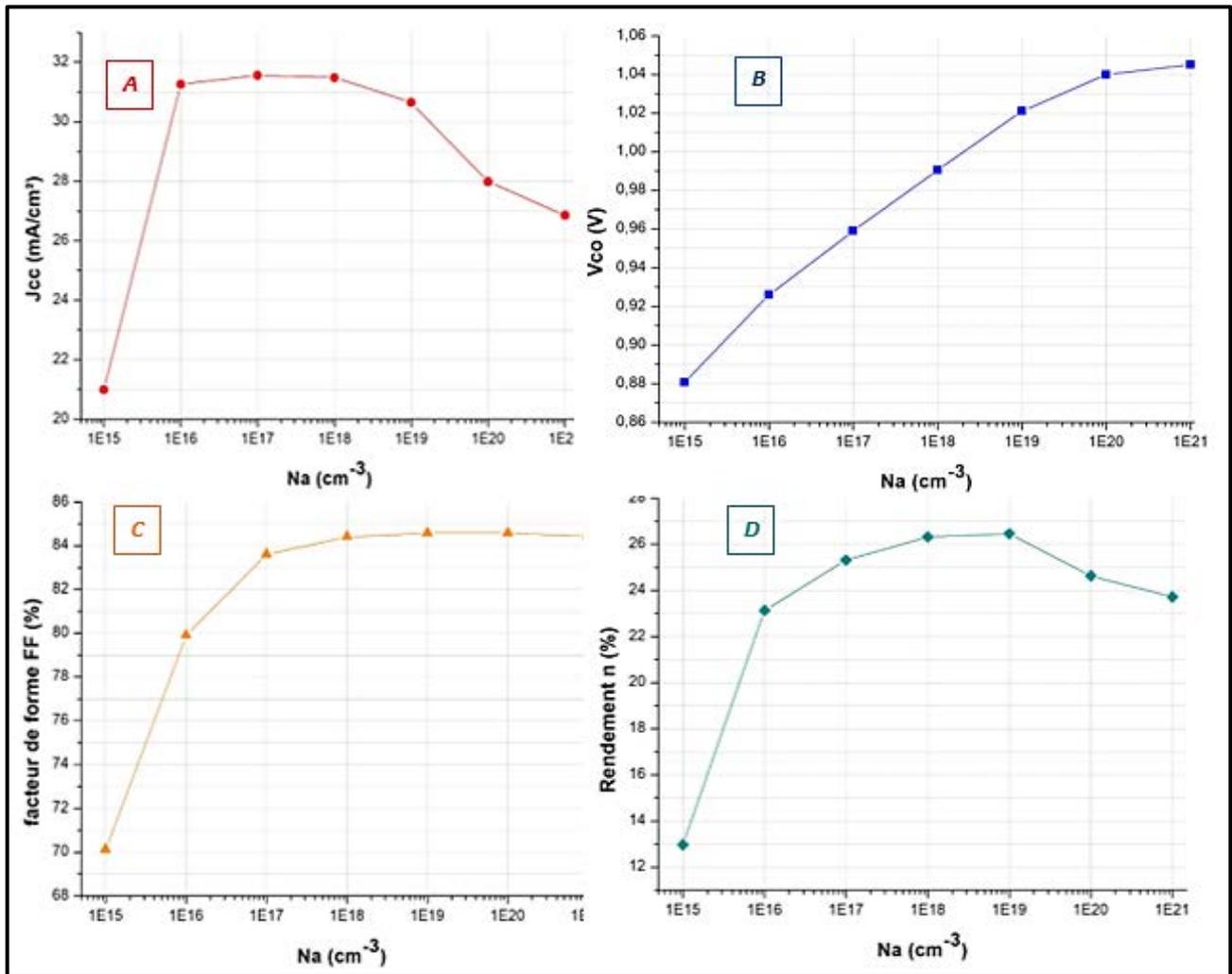


Figure III-19 : variation des paramètres ( $J_{cc}$ , FF,  $V_{co}$ ,  $\eta$ ) en fonction de la concentration des accepteurs Na

#### Observations :

Grphe (A) → on remarque que la densité de courant de court-circuit atteint des valeurs optimales allant jusqu'à  $31.56 \text{ mA/cm}^2$  pour un dopage entre  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , et diminue en dehors de cet intervalle.

Graphe (B) → la tension du circuit-ouvert augmente proportionnellement avec la concentration des accepteurs Na et se dirige vers un régime permanent de valeur égale à 1.045V au-delà de la valeur  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

Graphe (C) → le facteur de forme augmente sous une forme exponentielle inverse jusqu'à atteindre un régime permanent de valeur égale à 84.57%, qui est une valeur optimale pour une concentration des accepteurs allant de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Graphe (D) → Le rendement augmente et atteint des valeurs optimales égale à [26.32%-26.46%] pour des concentrations de dopage entre  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et diminue hors cet intervalle.

### III.3.1.2 L'influence de la concentration des donneurs Nd :

La figure (III-20) représente variation des paramètres ( $J_{cc}$ , FF,  $V_{co}$ ,  $\eta$ ) en fonction de la concentration des donneurs Nd pour une gamme de dopage allant de  $1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$  à  $1.10^{21} \text{ cm}^{-3}$

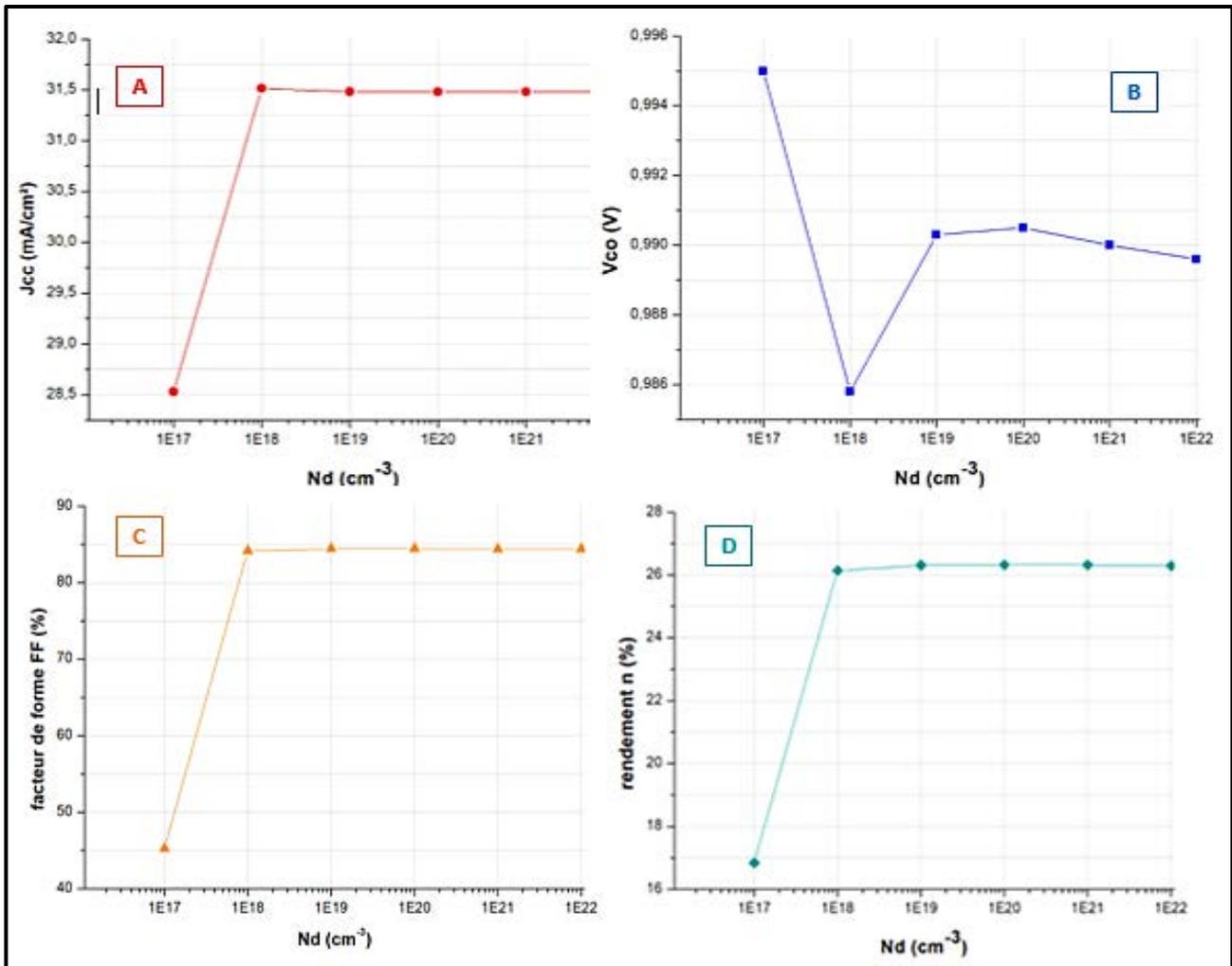


Figure III-20 : La variation des paramètres ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF,  $\eta$ ) en fonction de la concentration des donneurs Nd

Observations :

En remarque que la variation de la densité de court-circuit, facteur de forme et le rendement en fonction de la concentration de Nd (graphes A, C et D) est identiques. La valeur augmente en passant d'une concentration de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ensuite stagne approximativement dans les mêmes valeurs :

- $J_{cc} \approx 31.5 \text{ mA/cm}^2$
- $FF \approx 84 \%$
- $\eta \approx 26.3 \%$

Pour la variation de la tension de circuit ouvert en fonction de Nd (graphe B), sa valeur diminue de 0.995 V jusqu'à 0.985 V puis augmente jusqu'à atteindre  $\approx 0.9905 \text{ V}$  ensuite diminue légèrement et se dirige vers une stagnation.

Remarque :

Suite à ses résultats on peut constater que les valeurs des paramètres externe sont optimale pour les concentrations de dopage suivant :

Na entre  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  jusqu'à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Nd entre  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  jusqu'à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$

### **III.3.2 Effet de l'épaisseur sur la cellule :**

#### **III.3.2.1 L'influence de l'épaisseur de la couche p, $X_b$ :**

La figure (III-21) représente la variation des paramètres externes ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et  $\eta$ ) en fonction de l'épaisseur de la couche p

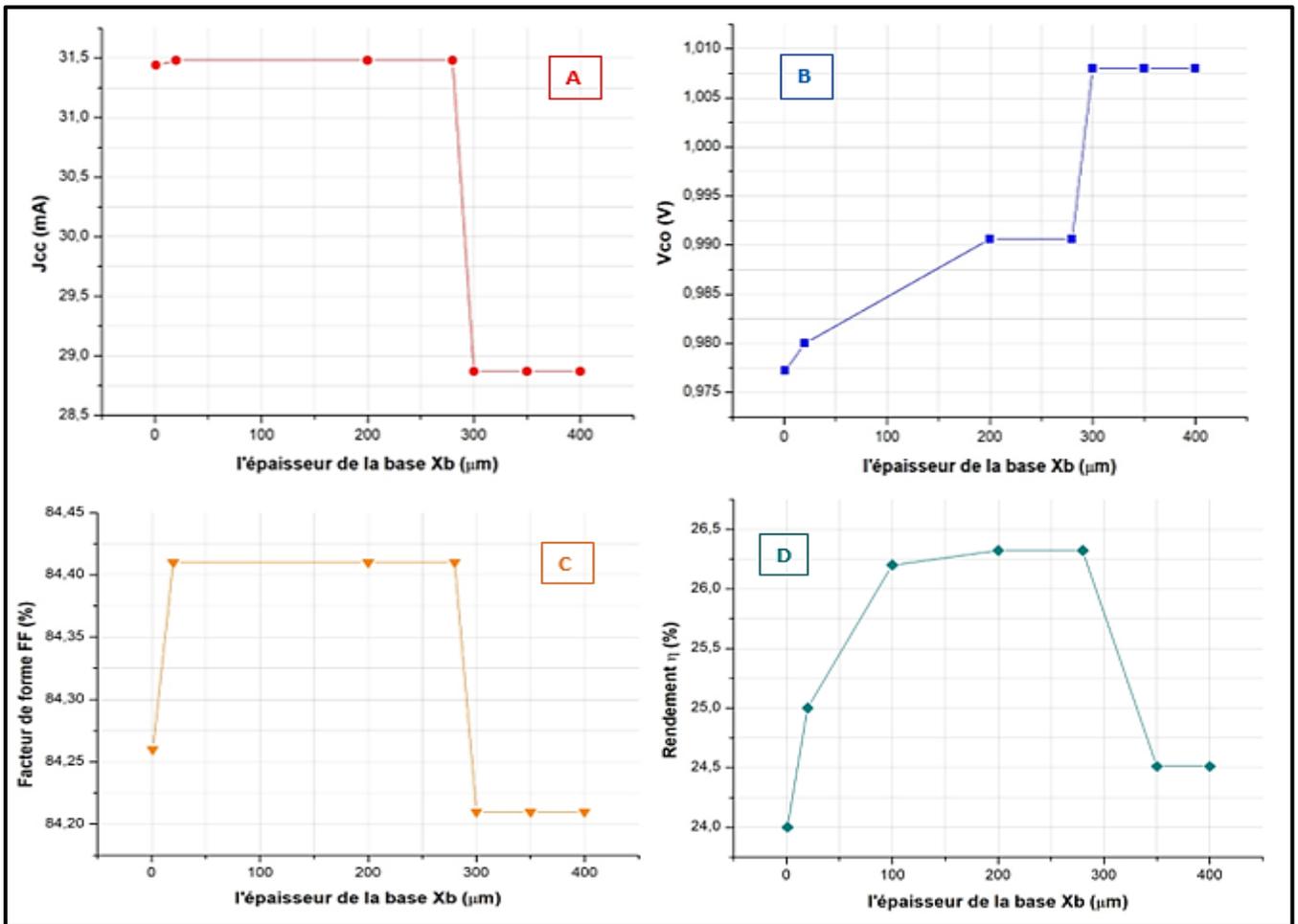


Figure III-21 : Variation des paramètres ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) en fonction de la largeur de la zone  $p, X_b$

Observation :

D'après les graphes suivant on peut remarquer que la variation de la densité de court-circuit, facteur de forme et le rendement en fonction de la variation de  $X_b$  est presque identique est atteint des valeurs optimum ( $J_{cc} \approx 31.5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF \approx 84.4 \%$ ,  $\eta \approx 26.3 \%$ ) pour un intervalle d'épaisseur allant de 150  $\mu\text{m}$  à 280  $\mu\text{m}$ . Par contre la variation de la tension du circuit ouvert augmente en remontant l'épaisseur jusqu'à atteindre 0.99 V puis elle stagne est subit une autre augmentation en remontant l'épaisseur de 280  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$  et se stabilise à 1.008 V pour une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$  à 400  $\mu\text{m}$

### III.3.2.2 L'influence de l'épaisseur de la couche n, $X_j$ :

La figure (III-22) représente la variation des paramètres externes ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) en fonction de l'épaisseur de la couche n ( $X_j$ )

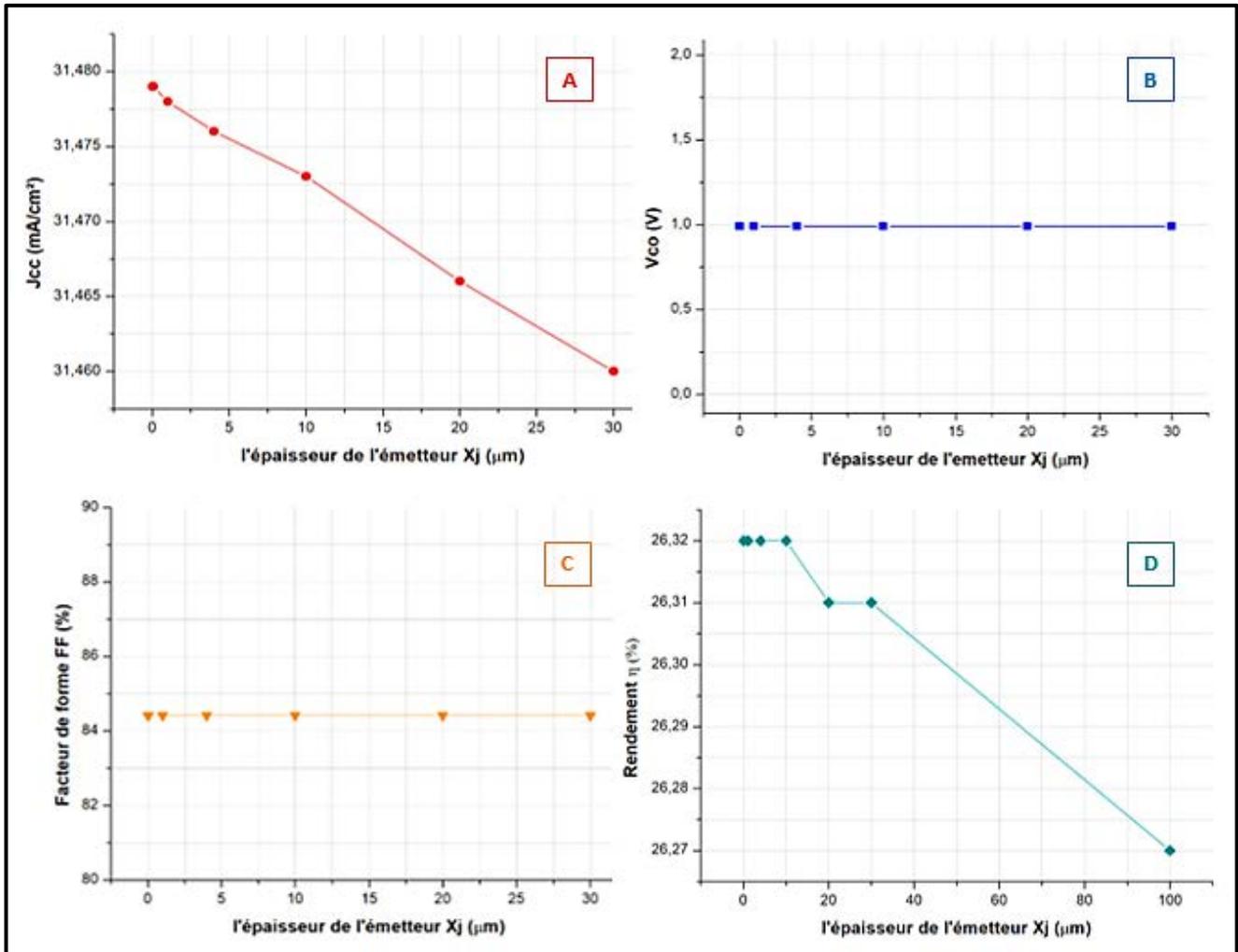


Figure III-22 : Variation des paramètres ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF,  $\eta$ ) en fonction de la largeur de la zone p,  $X_j$

#### Observation :

D'après les graphes représentés sur la figure III-21 on peut remarquer que l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ) influe sur la valeur de la densité de court-circuit et le rendement, car ces dernières diminuent en augmentant l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ). Les meilleures valeurs obtenues sont :

$J_{cc} \approx 31.478 \text{ mA/cm}^2$  pour  $X_j$  entre  $0.1 \mu\text{m}$  à  $5 \mu\text{m}$

$\eta = 26.32 \%$  pour  $X_j$  entre  $0.1 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$

D'un autre coté la variation de l'épaisseur n'apporte aucun changement sur la tension du circuit ouvert et le facteur de forme.

**Remarque :**

D’après les résultats obtenus on peut constater que les meilleures valeurs des paramètres externes sont obtenues pour les épaisseurs suivantes :

Xb entre 200  $\mu\text{m}$  à 280  $\mu\text{m}$

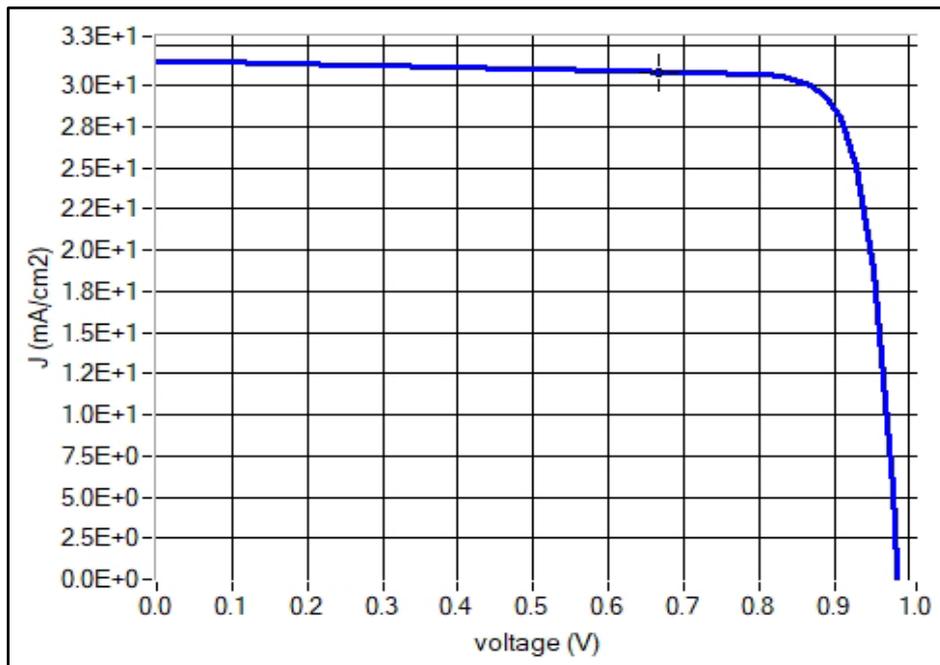
Xj entre 0.1  $\mu\text{m}$  à 5  $\mu\text{m}$

On peut conclure que la concentration de dopage et l’épaisseur apporte un changement sur les paramètres externes de la cellule. Cependant, une couche d’émetteur mince (Xj) et une couche de base épaisse (Xb) conduisent à une efficacité de conversion prometteuse.

Le tableau III-10 représente les résultats de notre simulation ainsi que les résultats des recherches précédentes, et la figure III-23 représente la caractéristique I-V de la cellule optimisée

n-AlGaAs/p-GaAs solar cell	Notre model	Data [15]	Data [20]	Data [21]	Data [22]
<b>Jsc (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	31.512	25.77	25.30	27.4	29.92
<b>Vco (V)</b>	0.986	0.985	0.99	0.99	0.992
<b>FF</b>	0.84	0.80	0.87	0.83	0.88
<b><math>\eta</math> (%)</b>	26.17	23.80	23	22.50	26.15

*Tableau III-10 : comparaison entre les résultats obtenues et celles des recherches précédentes*



*Figure III-23 : caractéristiques J-V de la cellule optimisée*

### **III-4 conclusion :**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation et à l'analyse des résultats du modèle que nous avons adopté. Nous avons tracé la variation des paramètres externes en fonction de  $(N_a, N_d, X_b, X_j)$  pour voir leurs influences sur ces dernières, ce qui nous a permis de déterminer des différentes valeurs optimales de ces paramètres pour le bon fonctionnement de la cellule solaire.

---

# *Conclusion générale*

---

## Conclusion générale

En guise de conclusion, nous pouvons dire que durant ces dernières années de nombreuses études ont été conduites afin de réaliser des cellules solaires à haut rendement. En effet, si la technologie des cellules au silicium est bien maîtrisée, les cellules solaires à hétérojonction à l'arséniure de gallium offrent un rendement théorique plus élevé, dû au fait que GaAs a presque la valeur optimum de largeur de bande interdite, elles offrent également de meilleures performances de fonctionnement à haute température et une plus grande résistance aux rayonnements, le coefficient d'absorption optique du GaAs étant beaucoup plus élevé que celui du Si, les cellules solaires à hétérojonction au GaAs fonctionneront plus efficacement que les cellules au Si.

Dans ce travail nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction (AlGaAs/GaAs) de structure  $n^+pp^+$ . La modélisation permet de définir les différents paramètres de la cellule qui sont généralement, le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension du circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF, et le rendement de conversion  $\eta$ , tous ces paramètres sont proportionnels aux dimensions de la structure et aux paramètres physiques du composant solaire

Notre recherche se porte essentiellement sur un composant, qui est une jonction P-N pour laquelle notre étude sera menée à l'aide du logiciel de simulation SCAPS-1D afin de lui permettre l'aspect d'une source d'énergie et surtout en concordance avec une rentabilité et efficacité de conversion maximale.

A travers ce travail nous avons amélioré un modèle pour simuler les performances, la constitution de l'appareil et les paramètres des appareils ( $N_d$ ,  $N_a$ ,  $X_j$ ,  $X_b$ ) pour une cellule solaire à hétérostructure n-c-AlGaAs/ p-c-GaAs, notre niveau de dopage optimal est compris entre  $N_a=10^{16}$  à  $10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$  pour les couches émettrices et entre  $N_d=10^{18}$  à  $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  pour les couches de base. L'épaisseur de l'émetteur doit être aussi mince que possible en moyenne (0,1-5  $\mu\text{m}$ ) et l'épaisseur de base aussi grande que possible en moyenne (200-280  $\mu\text{m}$ ).

Les quantités optimales selon le meilleur rendement de conversion sont comparées aux résultats obtenus par d'autres travaux sous la même valeur pour les mêmes paramètres. Un bon accord a été obtenu. Cependant, une couche d'émetteur mince  $X_j$  et une couche de base épaisse  $X_b$  conduisent à une efficacité de conversion prometteuse ( $> 23,80\%$ ). Cette structure est recommandée pour l'alimentation des cellules solaires et des concentrations solaires.

Nous ajoutons à ces éléments influençant, la résistance série  $R_s$  et la résistance shunte  $R_{sh}$ , son influence comme nous le savons porte sur  $I_{cc}$  qui diminue en fonction de l'augmentation de  $R_s$ . Contrairement la  $R_{sh}$  augmente le courant  $I_{cc}$ .

Enfin, après la simulation, notre structure a eu comme résultats :

$$J_{cc} = 31,512 \text{ mA/cm}^2$$

$$V_{co} = 0.986 \text{ V}$$

$$FF = 84 \%$$

$$\eta = 26.17 \%$$

En somme, on peut dire que ce modèle nous permet beaucoup de choses et choix pour améliorer les paramètres de la cellule solaire ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et  $\eta$ ), ce qui n'est pas le cas pour les cellules classiques. Et pour terminer, les cellules solaires sont un champ très vaste et ont des horizons promettant dans le domaine de photovoltaïque

- [1] D. Benmoussa « Modélisation d'une cellule solaire mode dichroïque » magister en Ecole Doctorale « Energies Renouvelables » année 2009/2010.
- [2] B. Garcia, Jr, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2007.
- [3] H. Beatrice Honsberg, Design and Fabrication of Thin Light-Trapped GaAs Solar Cell", University of Delaware. 1992.
- [4] S. Khlifi, Modélisation d'une Cellule Solaire  $Ga_{1-x}Al_xAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p)$ ", Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.
- [5] G. Sassi « cascade solar structures : an alternative Design », (1986).
- [6] K. TAHRI, B. BENYOUCE, Etude de Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque", Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1, Université Abou Bakr Belkaid- B.P: 119 Tlemcen 13000. 2010.
- [7] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>
- [8] S.M.SZE, Physique of semiconductor Devices, John Wiley & Sons ,1981.
- [9] B. Benabdallah, Nadia, Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe", These magister, Université Abou bekr belkaid-Telemcen. 2006.
- [10] M.F. Mahi, « Etude analytique de la réponse spectrale et du rendement de la cellule solaire P-AlGaAs-n-GaAs », Mémoire de magister, microélectronique-photovoltaïque, CUB (2004)
- [11] AF. Meftah, AM. Meftah, N. Sengouga, S. Khelifi. The  $Al_xGa_{1-x}As$  window composition effect on the hardness improvement of a  $p^+-n-n^+$  GaAs solar cell exposed to the electron irradiation. Energy Conversion and Management 51 (2010) 1676–1678
- [12] R. R. Saxena, V. Aebi, C. B. Cooper III, M. J. Ludowise, H. A. Vander Plas, B. R. Cairns, T. J. Maloney, P. G. Borden, and P. E. Gregory. High efficiency AlGaAs/GaAs concentrator solar cells by organometallic vapor phase epitaxy. Journal of Applied Physics 51, 4501 (1980)
- [13] M.Z. Shvarts\*, O.I. Chosta, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, V.M. Andreev. Radiation resistant AlGaAs/GaAs concentrator solar cells with internal Bragg reflector. Solar Energy Materials & Solar Cells 68 (2001) 105-122

- [14] N. Messei, M.S. Aida, Numerical simulation of front graded and fully graded AlGaAs/GaAs solar cell, *Optic - International Journal for Light and Electron Optics* (2015)
- [15] M. Belmekki and A. Belfar, *Optic - International Journal for Light and Electron Optics*, 2019
- [16] F. ABDO, “ Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour application photovoltaïque”, Thèse Doctorat, L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [17] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, *Thin Solid. Films*, 361 (2000) 527-532.
- [18] A. Niemegeers, M. Burgelman, Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells, *Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington DC, 1996, pp.901-904
- [19] S.C. Jain, D.J. Roulston, *Solid State Electron.* 34 (1991) 453.
- [20] S. Noor. Mohamed, *J. App. Phys.* 61 (2) (1987).
- [21] J.J. Liou, Physical models for predicting the performance of Si/Si, AlGaAs/GaAs and Si/SiGe solar cells, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 29 (1993) 261–276.