

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

Filière : ÉLECTRONIQUE

Spécialité : MICRO-ÉLECTRONIQUE

Par

CETTOUH Salah.

HATOUT Salah.

Thème

**Etude du rendement de cellule solaire
hétérojonction à base InGaP/GaAs par
simulation**

Soutenu le : 17/09/2019

Devant le jury :

- Dr.Dib **Président**
- Mme.Kherrat **Examineur**
- Mr.L.Djedoui **Encadreur**
- Dr.Djemouai **Co-Encadreur**

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

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

Nous exprimons notre profonde gratitude, notre profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à Mr Djedoui Layachi étudiant doctorat, Djemoui Abd elwahab Maître de conférences à l'université de BBA, pour m'avoir encadré tout le long de mon travail.

Que Mr Dib, Maître de conférences à l'université de BBA, trouve ici l'expression apporté à ce travail. Je le remercie vivement d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement M^{me} Kherrat, Maître de conférences à l'Université de BBA, pour l'honneur qui m'a fait d'avoir accepter d'examiner ce modeste mémoire.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, j'aimerais leur dire merci.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes :

Parents,

Ma femme la mère de mes fils Serradj Eddine et Abd Errahmane

Mon frère,

Mes sœurs, et A tous ceux qui me sont chers.

Merci à tous.

Résumé

Les cellules solaires à base des matériaux semi-conducteurs III-V sont largement utilisées grâce à leurs rendements élevés. Dans cette mémoire, on vise à améliorer la performance de la cellule solaire à hétérojonction (double jonction) InGaP/GaAs. Les deux sous cellules sont interconnectés par une jonction tunnel (JT) InGaP/InGaP et constituants des couches à la surface arrière (BSF) des matériaux InAlGaP pour la cellule InGaP et la cellule GaAs. La simulation est faite après une optimisation, modélisation et le choix des matériaux utilisés et les épaisseurs des différentes couches constituant la cellule solaire. Le choix des matériaux dont l'énergie de gap est décroissante permet l'absorption du spectre solaire dans sa quasi-totalité et l'optimisation des épaisseurs des couches (couches minces) permet un compromis entre la performance et le coût de la conception de la structure optimisée. La cellule solaire InGaP/GaAs avec des paramètres optimaux est illuminée par un spectre solaire AM1.5 à travers une couche fenêtre InAlGaP. L'extraction des paramètres courant de court-circuit (J_{CC}), la tension à circuit ouvert (V_{CO}), et le rendement (η) sont fait en utilisant le logiciel TcadSilvaco.

Mots clés : Cellule solaire, hétérojonction, Jonction tunnel (JT), BSF, InGaP, GaAs, TcadSilvaco.

Abstract

Solar cells based on III-V semiconductor materials are widely used owing to their high efficiencies. In this work, we aim to improve the performance of the heterojunction solar cell (double junction) InGaP / GaAs. The two sub cells are interconnected by an InGaP/InGaP tunnel junction (JT) and a back surface layer (BSF) with InAlGaP and materials for the InGaP cell and the GaAs cell. The simulation is done after optimization, modeling and choice of the used materials and the thickness of different layers constituting the solar cell. The choice of materials whose gap energy is decreasing allows the absorption of the solar spectrum in its almost totality and the optimization of the thickness of layers (thin layers) allows a compromise between the performance and the cost of the design optimized structure. The InGaP/GaAs solar cell with optimal parameters is illuminated by an AM1.5 solar spectrum through an InAlGaP window layer. The extraction of current short circuit parameters (J_{CC}), open circuit voltage (V_{CO}), and efficiency (η) are done using TcadSilvaco software.

Key words: Solar cell, heterojunction, tunnel junction (JT), BSF, InGaP, GaAs, TcadSilvaco.

المخلص

تستخدم الخلايا الشمسية التي تعتمد على مواد أشباه النواقل من النوع III-V على نطاق واسع بسبب كفاءتها العالية في هذا العمل ، نهدف إلى تحسين أداء الخلية الشمسية غير المتجانسة (ثنائية الوصلة) InGaP/GaAs. ترتبط الخليتان الفرعيتان بواسطة القطب النفقي (JT) InGaP/InGaP وطبقة السطح الخلفي (BSF) بمواد InAlGaP لخلية InGaP و خلية GaAs. تتم المحاكاة بعد التحسين والنمذجة وإختيار المواد المستخدمة وسمك الطبقات المختلفة التي تشكل الخلية الشمسية. إن إختيار المواد التي تتناقص طاقة فجواتها يسمح بإمتصاص الطيف الشمسي بكامله تقريباً، كما أن تحسين سماكة الطبقات (الطبقات الرقيقة) يسمح بالموازنة بين المردودية وتكلفة التصنيع الأمثل المختار. تضاء الخلية الشمسية InGaP/GaAs مع الخصائص المثلى المنتقاة بواسطة الطيف الشمسي AM1.5 من خلال طبقة نافذة InAlGaP. يتم استخلاص تيار الدارة القصيرة (J_{CC})، جهد الدارة المفتوحة (V_{CO})، المردودية (η) باستخدام برنامج محاكاة Tcadsilvaco.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، غير متجانسة (ثنائية الوصلة)، القطب النفقي (JT)، BSF،

Tcadsilvaco، GaAs، InGaP.

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Chapitre I : Physique des cellules solaires	
I.1. Introduction	03
I.2. Définition de semi-conducteurs III-V	03
I.3. Classification des Matériaux	03
I.4. La structure atomique	05
I.5. La bande d'énergie	06
I.6. Type des semi-conducteurs :	08
I.6.1. Semi-conducteur intrinsèque :	08
I.6.2. Semi-conducteur extrinsèque :	08
I.6.2.1. Semi-conducteur dopé n :	08
I.6.2.2. Semi-conducteur dopé p	09
I.7. Gap direct et gap indirect	10
I.8. Niveau de Fermi	10
I.9. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs	11
I.9.1. Equation de Poisson	11
I.9.2. Equations de continuité	12
I.9.3. Equations de transport	12
I.10. Absorption et génération optique	13
I.10.1. Absorption optique	13
I.10.2. Génération optique des porteurs	14
I.11. La Recombinaison	15
I.11.1. Recombinaison en surface	15
I.11.2. Recombinaison bande à bande (radiative)	16
I.11.3. Recombinaison SRH	16
I.11.4. Recombinaison en volume de type Auger	17
I.12. Multi-jonction	18
I.12.1. Jonction PN à l'équilibre	18
I.12.2. Hétérojonction	19
I.13. Structure cristalline des matériaux utilisés	21
I.13.1. Le matériau GaAs	21
I.13.2. Le matériau GaInP	22
I.14. Conclusion	22

SOMMAIRE

Référence du chapitre I	24
Chapitre II : Les cellules solaires	
II.1. Introduction	28
II.2. Spectre solaire	28
II.3. Principe de la conversion Photoélectrique	29
II.4 La cellule solaire	32
II.4.1 Définition	32
II.4.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	32
I.4.4. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	34
II.4.5. Paramètres essentiels caractérisant les cellules photovoltaïques	35
a) Courant de court-circuit	35
b) Tension de circuit ouvert	36
c) La puissance caractéristique d'une cellule PV	36
d) Facteur de forme	37
e) Rendement de conversion d'énergie	37
II.5 Architecture de la cellule photovoltaïque	37
II.5.1. Les contacts	38
II.5.2. La couche fenêtre	39
II.5.3. Emetteur et base	39
II.5.4. La surface arrière BSF	39
II.5.5. Couche antireflet	40
II.6. Générations de cellules solaires	42
II.6.1. Première génération	42
II.6.2. Deuxième génération	42
II.6.3. Troisième génération	43
II.7. Les Cellules solaires multi-jonctions	44
II.7.1. Aperçu sur les Cellules solaires multi-jonctions	44
II.7.2. Utilité des cellules multijonctions	44
II.7.3. Structure et principe de base des Cellules solaires multijonctions	45
II.7.3.1. Structure multijonction	45
II.7.3.2. Principe de base	45
II.7.3.3. La jonction tunnel	46
II.7.3.4. Critères de choix de la jonction tunnel	47
II.7.3.5. Avantage de l'utilisation de la jonction tunnel	48

SOMMAIRE

II.7.4. Cellule solaire à Multijonctions	48
II.7.4.1. Système Multi-spectrale	48
II.7.4.2. Système à empilement mécanique (mechanically stacked MSC)	49
II.7.4.3. Cellule monolithique (Tandem, Cascade ou Multicolore MC, Two-terminal Series-connected)	50
II.8. Conclusion	51
Référence du chapitre II	52

Chapitre III : Le simulateur Tcad Silvaco-Atlas

III.1. Introduction	55
III.2. Présentation d'Atlas	55
III.2.1. DeckBuild	56
III.2.2. TonyPlot	57
III.3. Ordres de commandes d'Atlas	57
III.4. Spécification de la structure	59
III.4.1 Mesh	59
III.4.2 Régions	60
III.4.3 Electrodes	61
III.4.4 Doping	62
III.5 Spécification des modèles des matériaux	63
III.5.1 Matériau	63
III.5.2 Models	63
III.5.3 Beam	64
III.5.4 Contact	64
III.6 Sélection de la méthode numérique	64
III.7 Spécification des solutions	64
III.8 Analyse des résultats	65
III.9. Organigramme de simulation	66
III.10. Conclusion	67
Référence du chapitre III	68

Chapitre IV : Les cellules solaires

IV.1. Introduction	70
IV.2. Le choix de la structure InGaP/ GaAs	70
IV.4. Structure de la cellule et méthode d'optimisation	71
IV.5. paramètres de simulation	71
IV.6. Circuit équivalent de la cellule simulé InGaP/GaAs	72
IV.7. Le spectre solaire	74
IV.8. Simulation de la cellule InGaP/GaAs	75
IV.8.1 Simulation de la cellule GaAs	75
IV. 8.1.1. Résultats et discussions	75
IV.8.2. Simulation de la cellule solaire à base InGaP	76

SOMMAIRE

IV.8.2.1. Résultats et discussions	78
IV.8.3. Cellule solaire à double jonctions : Structure Tandem (InGaP/GaAs)	79
IV.8.3.1. Présentation de la structure	79
IV.9. L'effet de la jonction tunnel	81
IV.10. Comparaison entre les différentes jonctions tunnels	82
IV.10.1. L'effet de la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel	83
IV.11. L'effet de la couche fenêtre sur le rendement de la cellule	85
IV.12. L'effet de champ de la surface arrière (BSF)	86
IV.13. Variation des niveaux de dopage	87
IV.13.1. Concentration de dopage des bases	87
IV.14. Conclusion	88
Conclusion générale	90

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure (I.1)	: Tableau périodique partielle	03
Figure (I.2)	: Classification des matériaux par leur conductivité	04
Figure (I.3)	: Modèle de bande	05
Figure (I.4)	: Structure atomique d'un atome de silicium	06
Figure (I.5)	: Bandes d'énergie dans différents types de matériaux	07
Figure (I.6)	: Type de semi-conducteurs extrinsèque au zéro absolu	09
Figure (I.7)	: Différence entre une bande interdite directe et indirecte d'un semi-conducteur	10
Figure (I.8)	: Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur	15
Figure (I.9)	: Recombinaison radiative.	16
Figure (I.10)	: Recombinaison SRH	17
Figure (I.11)	: Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.	18
Figure (I.12)	: Représentation d'une jonction PN à l'équilibre	19
Figure (I.13)	: Diagrammes schématique montrant deux types différents d'hétérojonction.	20
Figure (I.14)	: Structure cristalline des deux matériaux utilisés (a) InGaP [41], (b) GaAs	21
Figure (II.1)	: Spectre d'émission solaire	29
Figure (II.2)	: Structure et diagramme de bande d'une cellule Photovoltaïque sous éclairement.	33
Figure (II.3)	: Schéma électrique équivalent Schéma d'une cellule en silicium cristallin.	34
Figure (II-4)	: (a) Caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque sous éclairement et dans l'obscurité. (b) Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V).	35
Figure (II-5)	: Puissance maximum d'une cellule PV.	36
Figure (II.6)	: Composition d'une cellule photovoltaïque.	38
Figure (II-7)	: Couche antireflet d'une cellule photovoltaïque	41
Figure (II-8)	: Diagramme de bande de dopage de la jonction tunnel.	47
Figure (II.9)	: Association de plusieurs cellules solaires pour une conversion multi-spectrale	49
Figure (II-10)	: Empilement mécanique des cellules solaires, schéma de principe.	50
Figure (II-11)	(a) : Schéma synoptique d'une cellule solaire monolithique.	51
Figure (II-11)	(b) : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire tandem avec interconnexion des diodes Tunnel.	51

Liste des figures

Figure (III.1)	: Atlas entrées et sorties.	56
Figure (III.2)	: Menu de commandes de DeckBuild.	57
Figure (III.3)	: Atlas mesh.	60
Figure (III.4)	: Régions créées dans la cellule solaire tandem à base de InGaP/GaAs.	61
Figure (III.5)	: Atlas dopage.	62
Figure (III.6)	: Atlas dopage.	63
Figure (III.7)	: Caractéristique IV	66
Figure (III.8)	: Organigramme des étapes de construction d'un model sur ATLAS .	67
Figure IV.1	: Schéma de la cellule monolithique Tandem GaInP / GaAs avec ses paramètres technologiques	71
Figure IV.2	: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction (InGaP/GaAs).	73
Figure IV.3	: Structure de la cellule InGaP/GaAs sous Tcad Silvaco.	73
Figure IV.4	: Maillage de la cellule InGaP/GaAs	74
Figure IV.5	: Spectre solaire AM1.5G	74
Figure IV.6	: Structure de la cellule solaire GaAs	75
Figure IV.7	: Structure de la cellule solaire GaAs simulée	75
Figure IV.8	: Caractéristique I-V à base de la cellule solaire GaAs	76
Figure IV.9	: Couches de cellules supérieures détaillées	77
Figure IV.10	: Structure de la cellule solaire à base de InGaP.	77
Figure IV.11	: Caractéristique J-V de la cellule InGaP.	78
Figure IV.12	: Structure de la cellule solaire à double jonctions InGaP/GaAs.	79
Figure IV.13	: Caractéristique (J-V) de la cellule InGaP/GaAs.	80
Figure IV.14	: Courbe de puissance.	80
Figure IV.15	: Cellule solaire (InGaP/GaAs) sans la jonction tunnel.	81
Figure IV.16	: Caractéristique J-V de la cellule solaire InGaP/GaAs sans la jonction tunnel	82
Figure IV.17	: Caractéristique J-V de la cellule solaire GaAs/GaAs	85
Figure IV.18	: Caractéristique J-V de la cellule InGaP/GaAs sans la couche fenêtre.	85
Figure IV.19	: Caractéristique J-V de la cellule solaire InGaP/GaAs avec la couche fenêtre	86
Figure IV.20	: Caractéristique J-V avec une seule couche BSF de la cellule InGap.	87

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau (I.1)	: Alliage de quelque matériaux III-V et II-VI.	05
Tableau (I.2)	: Energie de gap des semi-conducteurs.	07
Tableau (I.3)	: Le coefficient de la recombinaison radiative B et les coefficients de capture des trous et des électrons Auger.	18
Tableau (I.4)	: Extrait du tableau périodique des éléments.	21
Tableau (II.1)	: L'indice de réfraction de quelques matériaux.	41
Tableau (III.1)	: Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe.	58
Tableau (IV.1)	: Paramètres majeurs pour le réseau ternaire $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ et quaternaire $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$ correspondant aux matériaux GaAs utilisés dans cette conception	71
Tableau (IV.2)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (GaAs) simulés sous éclairage AM1.5G.	74
Tableau (IV.3)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (InGaP) simulés sous éclairage AM1.5G	76
Tableau (IV.4)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire Tandem (InGaP/GaAs) simulée sous éclairage AM1.5G.	78
Tableau (IV.5)	: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire (InGaP/GaAs) sans jonction tunnel simulée sous éclairage AM1.5G	80
Tableau (IV.6)	: Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP-	82
a) Et b)	InGaP.	
Tableau (IV.7)	: Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs/GaAs	82
Tableau (IV.8)	: Résultats de variation de concentrations de dopage de base InGaP.	85
Tableau (IV.9)	: Résultats de variation de concentrations de dopage de base GaAs.	86

INTRODUCTION GENERALE

La consommation d'énergie est nécessaire pour le développement économique et social. La source principale de l'énergie électrique est produite par des ressources non renouvelables telles que la combustion du carbone, pétrole, gaz, et le nucléaire. Cependant les réserves de ces derniers sont limitées et seront épuisées dans quelques décennies. En plus l'utilisation de ce type de production d'énergie est très toxique et il est responsable du réchauffement de la planète et l'émission des gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables sont les énergies alternatives et non polluantes telles que l'éolienne, géothermie et l'énergie solaire.

L'énergie solaire photovoltaïque est continuée à être développer et la recherche est très active dans le domaine au cours de ces dernières années car elle présente les avantages suivantes : l'abondance dans la nature et la non-pollution. La production de l'énergie électrique est la transformation directe de l'énergie solaire (rayons lumineux) en énergie électrique. La base principale de cette transformation est la cellule solaire ou précisément les semi conducteurs qui constituent cette cellule.

Les performances de la cellule peuvent être améliorées par l'optimisation des paramètres physiques internes pour assurer un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension au circuit ouvert élevés.

L'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques exige l'amélioration des procédures (mécanismes) de production des cellules et en particulier le bon choix des matériaux et de la structure de la cellule.

Une réponse essentielle pour limiter les pertes et améliorer le rendement des cellules photovoltaïques est connu du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants (hétérojonctions).

L'objectif principal de ce travail de recherche est de modéliser et d'optimiser (par simulation) une cellule solaire à base des matériaux InGaP/GaAs afin de minimiser l'épaisseur et donc d'améliorer la performance pour avoir un bon compromis entre le cout et la structure.

Dans cette optique, la thèse est divisée en quatre chapitres :

INTRODUCTION GENERALE

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les semi conducteurs en basant sur les matériaux III-V et leurs propriétés. Ce chapitre est consacré aux différents modèles physiques et équations fondamentales dans les semi-conducteurs à résoudre pendant la simulation de la cellule solaire.

Dans le deuxième chapitre, nous avons concerné à une étude du rayonnement solaire, les constituants d'une cellule solaire et le principe de conversion.

Le troisième chapitre, consacré à la description et l'application du logiciel de simulation Atlas SILVACO-TCAD.

Le quatrième chapitre décrit la partie de simulation de la structure étudiée : Une description détaillée des conditions et des différentes structures des cellules étudiées et les résultats essentiels aboutis de cette étude.

I.1. Introduction

Dans le domaine photovoltaïque, l'un des buts importants des chercheurs est l'amélioration du rendement des cellules solaires. La cellule solaire est l'élément essentiel qui assure la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'interaction entre la lumière et le semi-conducteur dans une cellule solaire s'accompagne par différents phénomènes physiques tel que la génération et la recombinaison. L'une des technique permettant d'améliorer le rendement d'une cellule solaire consiste à faire augmenter le nombre des jonctions constituant la celle où chaque jonction est dédiée à exploiter une certaine partie spécifique du spectre solaire. Les matériaux les plus utilisés pour de telles applications sont les éléments semi-conducteurs des groupes III-V.

Dans ce chapitre on va entamer les fondamentales des semi conducteurs.

I.2. Définition de semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont désignés par des semi-conducteurs composés. Ce sont des matériaux formés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V du tableau de la classification périodique de Mendeliev (figure I-1). Ainsi, de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés.

	3A	13	4A	14	5A	15	6A	16
	5	B	6	C	7	N	8	O
		10.811 Boron		12.0107 Carbon		14.0067 Nitrogen		15.9994 Oxygen
		13	Al	14	Si	15	P	16
		26.9815 Aluminium		28.0855 Silicon		30.9738 Phosphorus		32.065 Sulfur
2B	12							
30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34
	65.409 Zinc		69.723 Gallium		72.64 Germanium		74.9216 Arsenic	
48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52
	112.411 Cadmium		114.818 Indium		118.710 Tin		121.760 Antimony	
80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84
	200.59 Mercury		204.383 Thallium		207.2 Lead		208.9804 Bismuth	
								84
								Po
								[209] Polonium

Figure (I-1) : Tableau périodique partielle [1].

I.3. Classification des Matériaux

Les matériaux peuvent être classés en trois types selon leurs propriétés électriques : conducteurs, isolants ou semi-conducteurs. Les cellules solaires sont construites à base des

matériaux semi-conducteurs. Cependant, ces matériaux peuvent agir en tant qu'isolants ou conducteurs [2]. La conductivité σ est un paramètre très important dans l'identification de type de matériau. La capacité d'un matériau à conduire l'électricité dépend de plusieurs facteurs ; parmi lesquels la structure atomique et l'énergie de bande interdite [3].

En se basant sur la conductivité électrique, les matériaux peuvent être classés comme c'est illustré dans la figure (I-2). D'après cette figure, on peut constater que les semi-conducteurs (SCs) se situent entre les métaux et les isolants; leur ρ varie de 10^{-8} à $10^3 \Omega\text{cm}$ (ou plus).

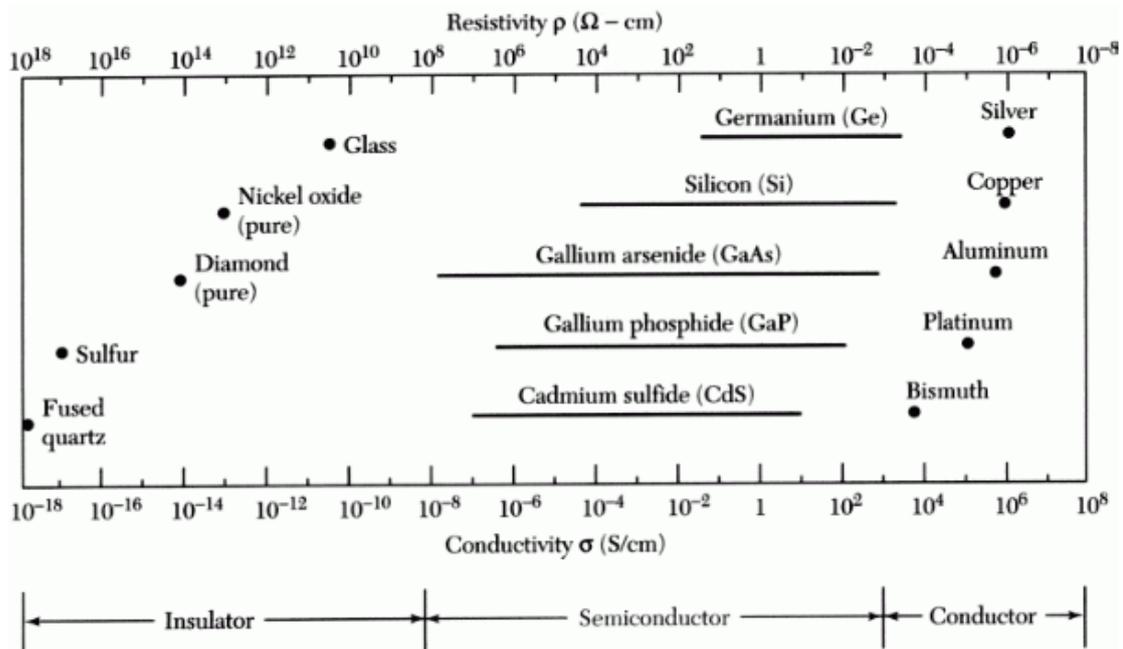


Figure (I-2) : Classification des matériaux par leur conductivité [4].

Les Semi-conducteurs peuvent se trouver en deux formes simple ou composé. Le silicium (Si) et le Germanium (Ge) sont deux exemples des semi-conducteurs simples. Ces deux semi-conducteurs appartiennent au groupe IV du tableau de Mendeleïev comme le montre la figure (I-1).

Les semi-conducteurs composés sont formés par des combinaisons d'éléments de groupe III et V respectivement comme le phosphure d'Aluminium (AlP), Nitride de Gallium (GaN), phosphure d'Indium (InP) ou arsénite de Gallium (GaAs) [3].

Il est possible d'obtenir des semi-conducteurs composés en combinant des éléments de groupe III ou V avec d'autres éléments d'un groupe différent (tableau (I-1)). Comme exemples, on note le phosphure de Gallium d'Indium ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$) et arsénite nitrogène d'Indium de Gallium ($\text{I}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}_{1-y}\text{As}_y$). Le x et y spécifie la fraction molaire des composés [5]. Les fabricants des composants semi-conducteurs font aussi des alliages semi-conducteurs en combinant des

éléments du groupe IIV, comme Oxide de Zinc (ZnO), tellure de Cadmium (CdTe), Sulfite de Mercure (HgS) avec les éléments de groupe III ou V [3].

Tableau (I-1) : Alliage de quelque matériaux III-V et II-VI.

Colonne	Semi-conducteur
IV	Ge, Si
Binaire III-V	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb.
Ternaire	$Al_xGa_{1-x}As, GaAs_yP_{1-y}$
Quaternaire	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
Binaire II-VI	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
Ternaire	$Cd_xHg_{1-x}Te$

I.4. La structure atomique

Les éléments du tableau périodique sont arrangés selon leur nombre de protons, neutrons, et électrons. Selon la théorie de Niels Bohr, les électrons d'un atome gravitent sur des orbites autour de noyau. L'orbite la plus proche au noyau peut avoir un maximum de deux électrons, alors que toutes les autres orbites ont un maximum de huit électrons. Les orbites les plus proches au noyau sont les premières à être remplies. Les éléments du groupe IV, comme le germanium Ge, ont quatre électrons dans la couche extérieure (couche de valence) de leur atome.

Dans la Figure (I-3), les atomes de semi-conducteurs partagent leurs quatre électrons de la bande de valence pour remplir cette couche extérieure avec le nombre maximal requis d'électrons.

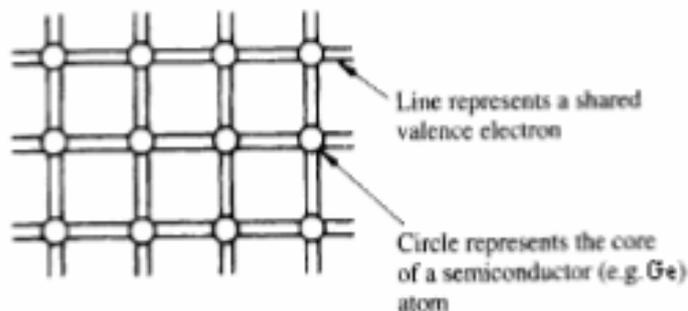


Figure (I-3) : Modèle de bande [6].

Chaque atome est capable de partager ses quatre électrons de la couche extérieure avec quatre atomes voisins. Chaque paire d'électrons partagée permet de former une liaison

covalente. Donc les atomes tendent à remplir leurs couches de valence pour atteindre la stabilité atomique. Par exemple les éléments de groupe III du tableau périodique ont trois électrons libres dans leur couche extérieure. La combinaison de ces éléments sera avec des éléments de groupe V. Ces derniers reçoivent trois électrons pour remplir leur couche extérieure. Par conséquent un semi-conducteur composé est produit à travers les liaisons covalentes [2] [5].

Le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé dans le domaine photovoltaïque. Le silicium possède 14 protons et 14 neutrons dans leur noyau. Les 14 électrons sont distribués dans des trois orbites : deux électrons dans la première orbite, huit électrons dans la deuxième orbite et quatre électrons dans l'orbite extérieure.

Quand les atomes de silicium sont liés, les électrons de l'orbite extérieure forment des liaisons covalentes. Par conséquent, le silicium forme des liaisons avec d'autres atomes de silicium. [2].

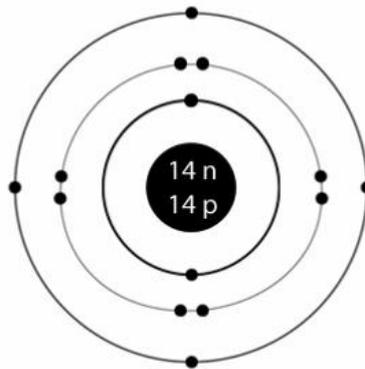


Figure (I-4) : Structure atomique d'un atome de silicium [7].

I.5. La bande d'énergie

Les bandes d'énergie sont des concepts fondamentaux de la physique de semi-conducteurs. Un électron d'un atome isolé est caractérisé par des niveaux d'énergie permis, alors que leur comportement sera différent dans un réseau cristallin périodique [8].

Ces bandes d'énergies sont, la bande de valence, la bande de conduction et la bande interdite. La spécificité de ces bandes est qu'il permet aux électrons de circuler librement dans toute la maille cristalline et par la suite de générer des courants de conduction [8].

Quand un électron est dans la bande de valence, une liaison covalente apparaît. Un électron nécessite une certaine énergie pour se déplacer de la bande de valence à la bande de conduction, cette énergie doit être supérieure à l'énergie de la bande interdite (énergie de gap).

L'énergie de gap est l'énergie minimum nécessaire pour qu'un électron saute de la bande de valence vers la bande de conduction [3].

La figure (I-5) montre le diagramme de bande pour les conducteurs, les isolants, et les semi-conducteurs. Dans le cas de conducteur, l'énergie de gap est faible, ou non existante, alors, que dans le cas des isolants l'énergie de gap est élevé.

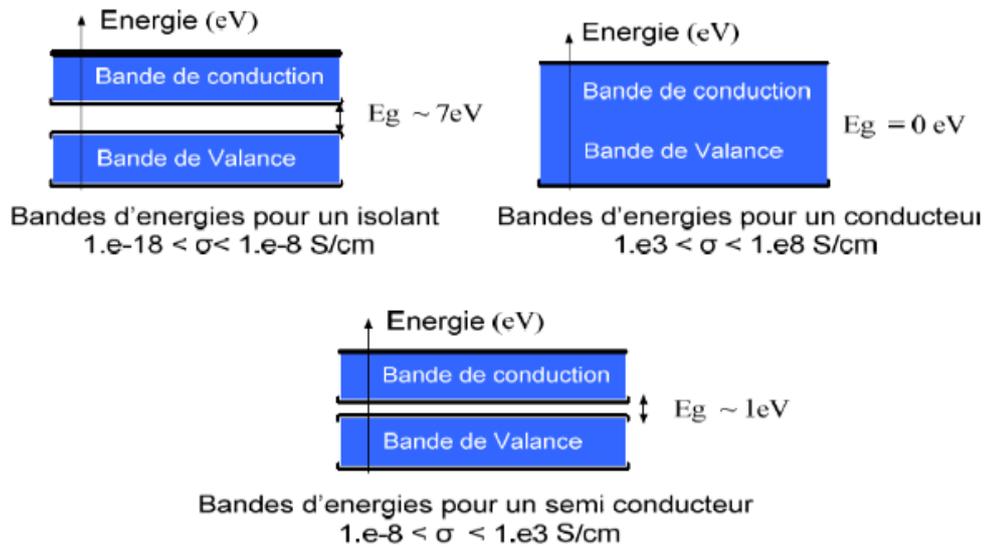


Figure (I-5) : Bandes d'énergie dans différents types de matériaux [9].

Les semi-conducteurs ont une énergie de gap qui dépend du type de matériaux et de la température. Elle est donnée par l'équation de Varshni suivante [5] :

$$Eg = Eg_{-300K} + \alpha \left[\frac{(300K)^2}{300K + \beta} - \frac{T^2}{T + \beta} \right] \tag{I-1}$$

Où Eg_{-300K} est l'énergie de gap du matériau à 300 K. α et β sont des valeurs spécifiques pour chaque semi conducteur [10]. Le tableau (I-2) montre l'énergie de gap de quelques matériaux semi-conducteurs.

Tableau (I-2) : Energie de gap des semi-conducteurs [11].

Matériau	Energie de gap (eV) à 300K
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.9
InGaP	1.42

I.6. Type des semi-conducteurs :

I.6.1. Semi-conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau semi-conducteur pure (idéal) ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique [12] et qui est caractérisé par une concentration des électrons est égale à la concentration des trous [13]. Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est très proche du milieu de la bande interdite à la température ordinaire. La concentration intrinsèque des porteurs de charge est donnée par : [14]

$$n_i^2 = n \cdot p = N_C \cdot N_V \cdot \exp - \frac{E_g}{KT} \quad (\text{I-2})$$

- n : concentration des électrons.
- p : concentration des trous.
- N_C : Densité d'état dans la bande de conduction.
- N_V : Densité d'état dans la bande de valence.
- k : constante de Boltzmann.
- T : la temperature [k].

Le niveau de Fermi (E_{Fi}) d'un semi-conducteur intrinsèque est obtenu en faisant : $n = p$, par conséquent [14] :

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{KT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right) \quad (\text{I-3})$$

I.6.2. Semi-conducteur extrinsèque :

On peut modifier de façon considérable la concentration de porteurs de charge d'un semi-conducteur intrinsèque en lui ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisis et que l'on appelle impuretés ou dopants. On obtient alors un semi-conducteur extrinsèque ou dopé [15].

Selon la nature des atomes introduits, soit le nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous et le semi-conducteur est appelé de type n, soit le nombre de trous devient très supérieur à celui des électrons et le semi-conducteur est appelé de type p [15].

I.6.2.1. Semi-conducteur dopé n :

Les atomes de silicium ou de germanium par exemple se cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à 4 atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant 2 électrons

pour chaque liaison. Si on introduit un atome ayant 5 électrons de valence (phosphore, arsenic ou antimoine), cet atome prend la place d'un atome du cristal : 4 des électrons de l'impureté participeront aux 4 liaisons avec les 4 atomes voisins du cristal, le 5^{ème} électron restera célibataire. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur (E_d) qui se situe juste en dessous de la bande de conduction. L'écart entre ce niveau et la bande de conduction étant faible, un électron d'un niveau donneur peut facilement passer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique [16]. A température ambiante, presque toutes les impuretés sont ionisées et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera [12] :

$$n = n_0 + N_d \tag{I.4}$$

Où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

1.6.2.2. Semi-conducteur dopé p :

Si on introduit un atome d'impureté trivalent (bore, aluminium ou gallium), cet atome en se plaçant dans le réseau ne peut saturer que 3 liaisons sur 4. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur (E_a). Au zéro absolu, ces niveaux accepteurs sont vides ; lorsqu'on augmente la température, ils peuvent être occupés par des électrons provenant de la bande de valence [16].

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$p = p_0 + N_a \tag{I-5}$$

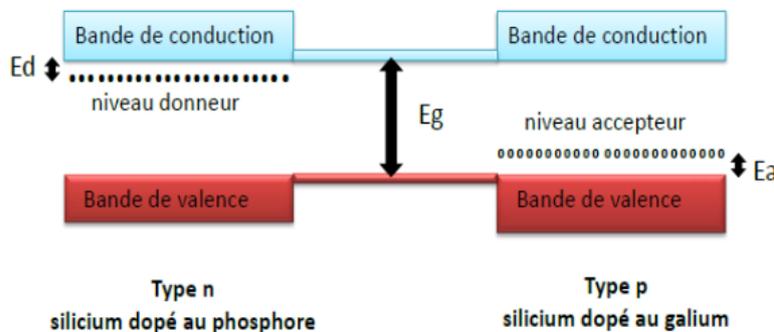


Figure (I-6) : Type de semi-conducteurs extrinsèque au zéro absolu.

I.7. Gap direct et gap indirect

L'énergie de gap est l'énergie minimum nécessaire pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Il existe deux types de semi-conducteurs, un semi-conducteur à gap direct et un semi-conducteur à gap indirect [3].

La notion de gap peut être illustrée par la relation de dispersion comme illustré dans la figure (I.7). E_C signifie le bas de la bande de conduction, E_V est le haut de la bande de valence alors que (k) est le vecteur d'onde associé à un électron [17].

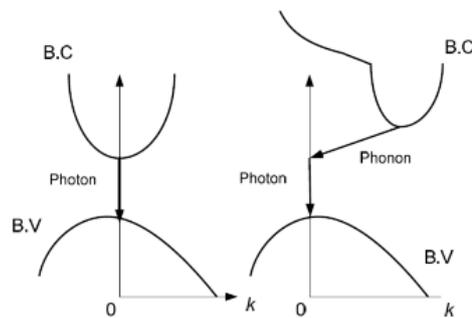


Figure (I-7) : Différence entre une bande interdite directe et indirecte d'un semi-conducteur [18]

Si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction coïncident dans le même point de l'espace de vecteurs d'onde k , le semi-conducteur a un gap direct.

Par contre, lorsque la bande de valence et la bande de conduction ont un vecteur d'onde k différent, dans ce cas le semi-conducteur a un gap indirect [19].

Dans un semi-conducteur à gap indirect, l'excitation d'un électron, de la bande de valence vers la bande de conduction, nécessite un photon avec création d'un phonon. Le phonon est une mode de vibration du réseau cristallin.

Généralement, les semi-conducteurs à gap direct sont les matériaux de choix pour la réalisation des dispositifs optoélectroniques. Le silicium est un semi-conducteur à gap indirect. Par contre l'Arséniure de Gallium est un semi-conducteur à gap direct [19].

I.8. Niveau de Fermi

Le niveau de Fermi est défini comme étant la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E par un électron à la température T . Cette probabilité est exprimée par la fonction de Fermi suivante [20] [21].

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/KT}} \quad (\text{I-6})$$

- E : la fonction d'énergie d'électron.
- E_f : le niveau de Fermi [eV].
- K: la constante de Boltzmann 8.617×10^{-5} [eV.K⁻¹].
- T: la température en Kelvin.

A l'équilibre, dans un semi-conducteur intrinsèque, le niveau de Fermi se situe entre la bande de valence et la bande de conduction. Il dépend du dopage du semi-conducteur. Dans un semi-conducteur dopé n, le niveau de Fermi est proche de la bande conduction car le matériau a une concentration élevée des électrons. Alors que dans un semi-conducteur dopé p, le niveau de Fermi est proche de la bande de valence, car le matériau a une concentration élevée des trous [11] [22].

I.9. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs

Les équations de base décrivant le comportement des porteurs de charges dans les matériaux semi-conducteurs sous l'influence d'un champ électrique et / ou de la lumière sont : l'équation de Poisson, les équations de continuité, et les équations de transport [23].

I.9.1. Equation de Poisson

L'équation de Poisson relie le potentiel électrostatique à la densité locale de charge. Elle est donnée par l'équation suivante [24]:

$$\Delta(\varepsilon \Delta \varphi) = -\rho \quad (\text{I-7})$$

- φ : est le potentiel électrostatique,
- ε : est la permittivité locale, et
- ρ : est la densité locale de charge.

Cette densité ρ est la somme de contributions de toutes les charges fixes et mobiles, contenant les électrons, les trous, et les impuretés ionisés.

$$\rho = -q[n - p + N_A^- - N_D^+ + \sum N_t] \quad (\text{I-8})$$

Avec :

- $q=1.6 \cdot 10^{-19}$ Cb : La charge élémentaire.
- p, n : Densités d'électrons et de trous libres.
- N_A^-, N_D^+ : Densités d'atomes donneurs et accepteurs ionisés.

- $\sum N_t$: La somme de pièges dans un centre profond ; elle est généralement négligeable.

Donc l'équation 7 s'écrit comme :

$$\overrightarrow{div} \varepsilon \overrightarrow{grad} \varphi = q[n - p + N_A^- - N_D^+ + \sum N_t] \quad (I-9)$$

I.9.2. Equations de continuité

Les équations de continuité donnent la variation des concentrations des porteurs à chaque instant. Cette variation des concentrations des trous ou des électrons est due à :

- La création de paires électron-trou,
- Les générations-recombinaisons internes, et à
- La présence des courants de conduction ou diffusion.

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont décrites comme suit [25] [26] [27] :

$$\partial n / \partial t = 1/q \text{div} \overrightarrow{J}_n + G_n - R_n \quad (I-10)$$

$$\partial p / \partial t = -1/q \text{div} \overrightarrow{J}_p + G_p - R_p \quad (I-11)$$

Où n et p sont la concentration des électrons et des trous respectivement, \overrightarrow{J}_n et \overrightarrow{J}_p sont les densités du courant des électrons et des trous, G_n et G_p sont les taux de génération pour les électrons et les trous, R_n et R_p sont les taux de recombinaison pour les électrons et trous, et q est la charge électrique d'électron.

I.9.3. Equations de transport

Généralement, dans les équations de la physique des semi-conducteurs, le champ magnétique extérieur est nul et la température est uniforme dans toute la structure. Sous l'action champ électrique, courant électrique appelé courant du champ ou courant de dérive (drift) apparait. Il est déterminé par le gradient des concentrations des porteurs de charge (courant de diffusion).

La densité de courant de dérive des électrons dans la bande de conduction est donnée par [25]:

$$\overrightarrow{J}_n = -q\mu_n n \nabla \phi_n \quad (I-12)$$

$$\overrightarrow{J}_p = -q\mu_p p \nabla \phi_p \quad (I-13)$$

Où μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous; ϕ_n et ϕ_p sont les niveaux de quasi-Fermi des électrons et des trous.

Les concentrations des électrons et des trous sont donnée par les relations suivantes :

$$n = n_{ie} \exp \left[\frac{-q(\psi - \phi_n)}{KT_L} \right] \quad (\text{I-14})$$

$$p = n_{ie} \exp \left[\frac{-q(\psi - \phi_p)}{KT_L} \right] \quad (\text{I-15})$$

Où n_{ie} est la densité effective intrinsèque. En remplaçant n et p dans les équations de densité de courant, on obtient :

$$J_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi - \mu_n n (KT_L \nabla (\ln n_{ie})) \quad (\text{I-16})$$

$$J_p = -qD_p \nabla p - qn\mu_p \nabla \psi - \mu_p p (KT_L \nabla (\ln n_{ie})) \quad (\text{I-17})$$

D_n et D_p : Coefficients d'Einstein dont l'expression :

$$D_n = (KT/q) \quad (\text{I-18})$$

$$D_p = (KT/q) \quad (\text{I-19})$$

I.10. Absorption et génération optique :

I.10.1. Absorption optique :

Le phénomène d'absorption qui se produit dépend dans un matériau semi-conducteur d'une cellule photovoltaïque de l'énergie (fréquence) de la lumière (photon) incidente. L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de la bande interdite E_g du matériau constituant la cellule [28]. Les photons de faibles énergies, ($h\nu < E_g$), passent à travers le semi-conducteur, n'apportant alors aucune contribution à la conversion photovoltaïque. Le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle. Si, l'énergie des photons est élevée ($h\nu \geq E_g$), l'absorption augmente. En outre, l'énergie au-dessus de E_g n'augmente pas l'absorption au-dessus de son seuil. Cet excès est perdu sous forme de chaleur [28].

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie des photons correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation [29] :

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{I-20})$$

- ν : Fréquence de la radiation.

- λ : Longueur d'onde de la radiation en μm .
- c : Vitesse de la lumière.
- E_p : Énergie du photon en eV.
- h : Constante de Planck.

L'absorption d'une radiation lumineuse dans un semi-conducteur est décrite par la loi de Lambert-Bouguer [29] :

$$I(x) = I(1 - R) \exp(-\alpha x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (\text{I-21})$$

- x : Profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur.
- R : Coefficient de réflexion représente la part de l'énergie lumineuse incidente I , réfléchi à la surface du matériau.
- α : Coefficient d'absorption, traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur. Il change selon le matériau.

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer. Ce phénomène, appelé mode d'absorption intrinsèque ou fondamentale, prédomine dans les cellules solaire [29].

10.2. Génération optique des porteurs :

La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé [30]. Dans un semi-conducteur homogène, l'intensité de radiation incidente diminue dans le matériau, en vertu d'une loi exponentielle. Le taux d'absorption des photons dans le semi-conducteur (en $\text{photons.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$) s'exprime par [29] :

$$\beta = -\frac{\partial \Phi(x, \lambda)}{\partial x} = \alpha \Phi(x, \lambda) \quad (\text{I-22})$$

- $\Phi(x)$: étant le flux de photons à la profondeur x la surface (en $\text{photons.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
- α : coefficient d'absorption en cm^{-1}

En tenant compte du rendement quantique $\gamma(\lambda)$, rapport entre le nombre de paire électron-trou créées et le nombre de photons absorbés, le taux de génération dans le volume (en porteurs libres. $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$), à la distance x de la face éclairée du matériau, s'écrit [29] :

$$g(x, \lambda) = \beta \gamma(\lambda) = \alpha(\lambda) \gamma(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(0, \lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] \quad (\text{I-23})$$

- $\Phi(0, \lambda)$: flux de photons incidents.

Pour la totalité du spectre solaire qui éclaire une cellule photovoltaïque, en admettant que le rendement quantique $\gamma(\lambda)$ est égal à 1, le taux de génération devient alors [29] :

$$G(x) = \int_0^\infty \frac{\lambda S(\lambda)}{hc} (1 - R(\lambda)) \alpha(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)x) d\lambda \quad (I-24)$$

- $S(\lambda)$: répartition spectrale du rayonnement solaire incident ($W.cm^{-2}.\mu m^{-1}$).

I. 11. La Recombinaison

La recombinaison est définie comme le mécanisme inverse de la génération. Elle engage une perte d'énergie ; les porteurs en excès disparaissent en rétablissant leur équilibre thermodynamique.

Un semi-conducteur ayant subi une perturbation reconstitue son équilibre thermodynamique à travers plusieurs mécanismes possibles :

- Recombinaison superficielle.
- La recombinaison radiative ou " Bande à Bande ",
- La recombinaison indirecte ou assistée (par piège),
- La recombinaison Auger.

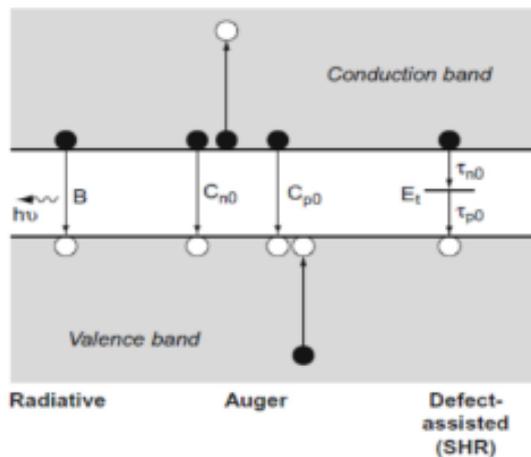


Figure (I-8) : Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur [31].

I.11.1. Recombinaison en surface :

Les nombreux défauts qui caractérisent la surface d'un semi-conducteur (polissage pour les cristaux, attaque chimique, revêtement par des couches minces d'autres structures) perturbent sa structure cristalline. Quand on éclaire le matériau, la recombinaison superficielle provoque une concentration des porteurs minoritaires en excès, moins importante en surface que dans le

volume. Alors les porteurs photo-générés diffusent vers la surface donnant naissance à un courant de fuite par diffusion [32].

I.11.2. Recombinaison bande à bande (radiative) :

C'est le mécanisme inverse de l'absorption optique : l'énergie de la paire électron-trou est libérée sous forme de photons. Ce type de recombinaison est dominant dans les semi-conducteurs purs, dotés d'une structure de bande à transitions directes [33]. Le taux de recombinaisons radiatives, R_{rad} , dépend de la concentration des électrons n et des trous p libre [18] :

$$R_R = \beta_r(n'p' - n_i^2) \approx \beta_r n'p' \approx \beta_r(n + \Delta n)(p + \Delta p) \quad (I-25)$$

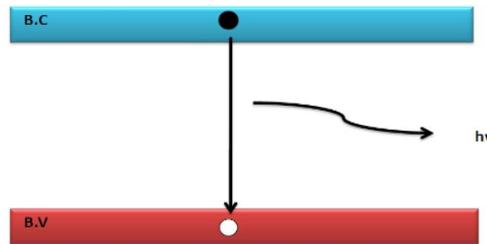


Figure (I-9) : Recombinaison radiative.

I.11.3. Recombinaison SRH :

La présence inévitable des impuretés et imperfections cristallines dans les semi-conducteurs causent l'apparition d'états électroniques permis dans le gap. Ces défauts peuvent jouer le rôle de pièges à électrons (ou à trou) qui piègent momentanément les électrons (les trous) avant de les renvoyer vers la bande de conduction (la bande de valence) ce qui influence la conductivité du semi-conducteur (figure I.10). Ils peuvent aussi jouer le rôle de centres de recombinaison des paires électron-trous par la capture d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence et provoquant ensuite la recombinaison des deux. Les recombinaisons multi-phonons en volume via les défauts ou recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH) s'effectuent par un mécanisme à deux étapes par (i) la relaxation d'un électron libre de la bande de conduction vers le niveau de défaut puis (ii) vers la bande de valence où il s'annule avec un trou (ou la relaxation de l'électron et du trou vers le défaut suivie par la recombinaison des deux) [35].

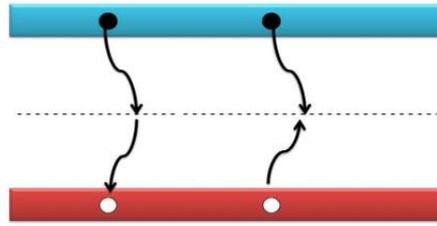


Figure (I-10) : Recombinaison SRH.

Le taux de ces recombinaisons SRH par unité de volume via un centre de concentration N_t localisé au niveau E_t dans le gap avec une section de capture des électrons σ_n et des trous σ_p est donné par [36] :

$$R_{SRH}^{volume} = \frac{n'p' - n_i^2}{\tau_{p0}(n' + n_1) + \tau_{n0}(p' + p_1)} \quad (I-26)$$

n et p sont les concentrations de porteurs à équilibre. n' et p' sont les concentrations de porteurs hors équilibre :

$$n' = n + \Delta n \text{ et } p' = p + \Delta p \quad (I-27)$$

Les quantités statistiques n_1 et p_1 sont définies par [36]:

$$n_1 = n_i e^{\frac{E_t - E_{Fi}}{KT}} \text{ et } p_1 = n_i e^{-\frac{E_t - E_{Fi}}{KT}} \quad (I-28)$$

E_{Fi} le niveau intrinsèque de Fermi localisé presque au milieu du gap.

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_t} \text{ et } \tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t} \quad (I-29)$$

La durée de vie SRH peut donc s'écrire sous la forme suivant [36] :

$$\tau_{SRH} = \frac{\Delta n}{R_{SRH}} = \frac{\tau_n(p + p_1 + \Delta n) + \tau_p(n + n_1 + \Delta n)}{(n + p + \Delta n)} \quad (I-30)$$

I.11.4. Recombinaison en volume de type Auger :

On a une recombinaison Auger lorsque l'énergie de l'électron qui retombe dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à :

- Un autre électron libre qui sera transféré à un niveau supérieur dans la bande de conduction.
- Un trou sur un niveau profond de la bande de valence.

Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est donné par la relation [18] :

$$R = (c_n n + c_p p)(pn - n_i^2) \tag{I-31}$$

Où c_n et c_p sont les coefficients d'Auger.

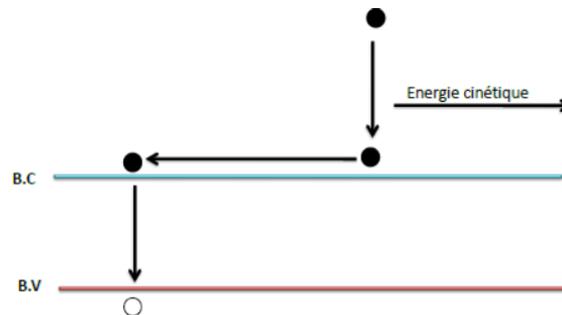


Figure (I-11) : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.

Le tableau (I-3) donne les valeurs de ces coefficients d'Auger pour Si, GaAs et InP [31].

Tableau (I-3) : Le coefficient de la recombinaison radiative B et les coefficients de capture des trous et des électrons Auger.

matériau	$B \cdot \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$	$C_{n0} \cdot \text{cm}^6 \text{s}^{-1}$	$C_{p0} \cdot \text{cm}^6 \text{s}^{-1}$
Si	1.8×10^{-15}	2.8×10^{-31}	0.99×10^{-31}
GaAs	7.2×10^{-10}	10^{-30}	-
InP	6.25×10^{-10}	9×10^{-31}	-

I.12. Multi-jonction

I.12.1. Jonction PN à l'équilibre

L'implémentation réussite d'une jonction PN est essentielle dans l'électronique moderne et les dispositifs à semi-conducteurs, y compris le transistor à jonction bipolaire (BJT), le transistor à effet de champ de structure métal-oxyde-semi-conducteur (MOSFET), le redresseur, diode Zener, et les dispositifs photovoltaïques.

Une jonction PN est formée pour contrôler efficacement les caractéristiques électriques d'un matériau [4]. Elle est constituée de deux régions semi-conducteurs respectivement dopées P et N qui forment une jonction PN qui ne laisse passer le courant que dans un sens [9].

Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N provoque la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la

région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes.

Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [37].

La force qui maintient l'équilibre sans aucune force externe est la barrière de potentiel intégré V_{bi} . Cette barrière maintient l'équilibre en séparant les électrons porteurs majoritaires dans la région n et les électrons porteurs minoritaire dans la région P. De même, il sépare les trous porteurs majoritaires dans la région P et les trous porteurs minoritaires dans la région N. La représentation mathématique de cette tension est :

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{(N_a \cdot N_d)}{n_i^2} \tag{I-10}$$

Où : N_a est la concentration d'accepteur (cm^{-3}), N_d la concentration de donneur (cm^{-3}), et q est la charge élémentaire (C).

La largeur de la région de déplétion (W) est également liée au niveau de dopage des deux régions. Elle peut être calculée en utilisant l'équation (I-11).

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \tag{I-11}$$

Les valeurs typiques de la largeur de la région de déplétion sont de 0.1 à 10 μm .

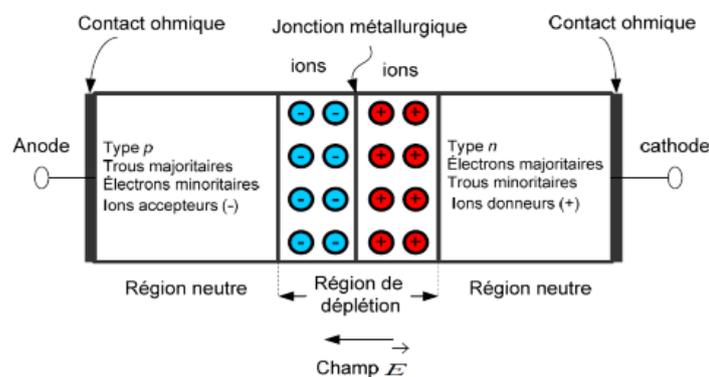


Figure (I-12) : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre [3.17].

I.12.2. Hétérojonction

Les jonctions constituées par la mise en contact de deux régions différemment dopées d'un même semi-conducteur sont appelées homo-jonctions. Au contraire, les jonctions réalisées

par la juxtaposition de deux matériaux différents sont appelées hétérojonctions [38]. La réalisation d'hétérojonction s'effectue par la croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit être notamment assez proche). Selon les matériaux utilisés pour les semi-conducteurs, on peut distinguer deux types d'hétérojonctions.

Le schéma de la figure (I.13) donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour deux types d'hétérojonction.

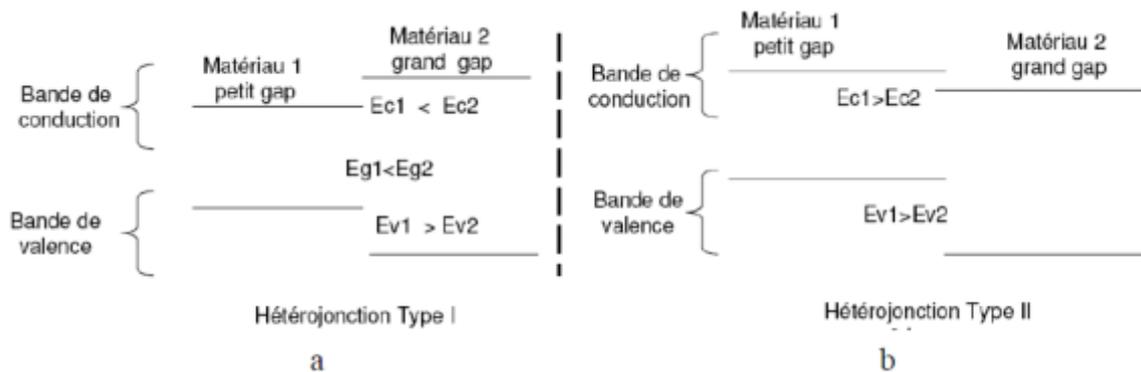


Figure (I-13) : Diagrammes schématique montrant deux types différents d'hétérojonction.

Pour l'hétérojonction de type I (figure (I.13.a)), les décalages de la bande de conduction et de la bande de valence agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petite bande interdite. Une énergie est donc nécessaire pour faire déplacer les porteurs du matériau de petite bande interdite au matériau de grande bande interdite. Les hétérojonctions (GaAs-AlGaAs, InP-InGaAs, Si-SiGe) sont des hétérojonctions de type I. Les hétérojonctions de type II (figure (I.13.b)) dites à bande interdite décalée favorisent le déplacement d'un seul type de porteurs.

Selon le type de dopage utilisé pour les semi-conducteurs, deux hétérojonctions se distinguent :

- Les hétérojonctions iso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont de même type de dopage [39], les porteurs qui diffusent dans la zone de charge d'espace sont majoritaires, donc le courant total est celui des porteurs majoritaires [38], et
- Les hétérojonctions aniso-types, pour lesquelles les deux semi-conducteurs sont dopés différemment [39], les porteurs qui sont émis thermiquement à l'interface d'un semi-conducteur, deviennent dans l'autre des porteurs minoritaires [38].

I.13. Structure cristalline des matériaux utilisés

La plupart des semi-conducteurs III-V cristallisent en un réseau Zinc-blende ; ce dernier est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées imbriqués, l'un d'éléments de la colonne III et l'autre d'éléments de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale (Figure (I.14)).

Tableau (I-4) : Extrait du tableau périodique des éléments [40].

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

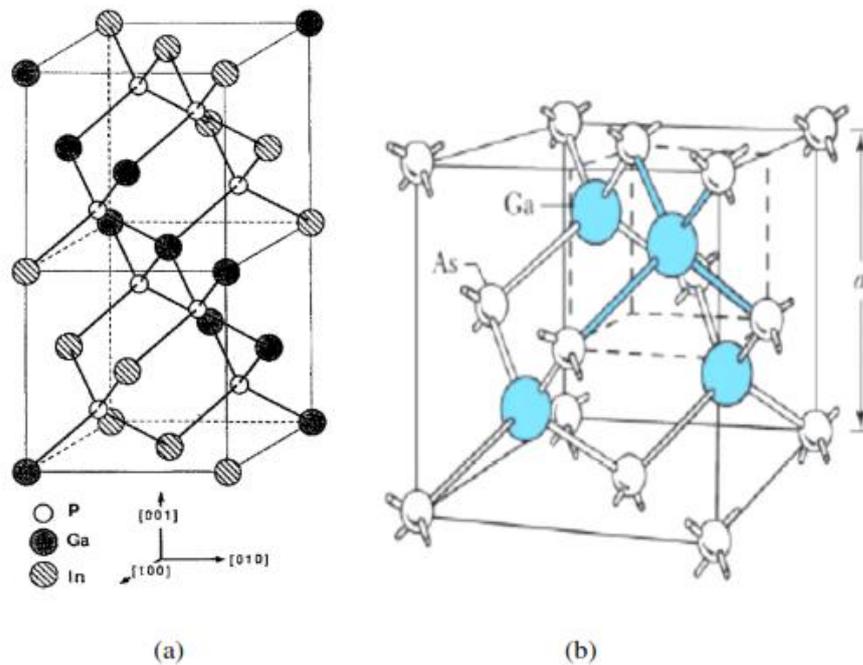


Figure (I-14) : Structure cristalline des deux matériaux utilisés (a) InGaP [41], (b) GaAs [42].

I.13.1. Le matériau GaAs

L'arséniure de gallium est un matériau à gap direct, composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V. Il est utilisé dans un large domaine d'application en électronique (LEDs infrarouge, Laser, Fibre optique et cellules solaires). En comparaison avec le Si, il possède un

fort coefficient d'absorption (90% des photons sont absorbés dans une épaisseur de $3\mu\text{m}$) [45], une forte mobilité des électrons [43]-[44], une forte résistance à la radiation solaire, ainsi qu'une forte stabilité à température élevée et peut être facilement transformé en semi-conducteur ternaire. D'un autre côté, le Si a quelques avantages par rapport au GaAs : Il est moins cher, il se fabrique sur des grandes plaquettes (jusqu'à 12 pouces) et la durée de vie des porteurs minoritaires est plus longue qu'avec le GaAs [44].

Le GaAs est connu comme le matériau le plus adapté à la conversion photovoltaïque, grâce à sa bande interdite directe, de valeur 1.42eV, qui s'adapte bien au le spectre solaire. La valeur de sa bande interdite est proche de la valeur idéale d'une cellule solaire mono-jonction (1.4 eV pour le spectre solaire AM1.5G (1.6 eV AM0)) [46].

La première cellule solaire fabriquée à base du semi-conducteur GaAs avait un rendement de 3%. Elle fut développée en Russie en 1960 dans l'institut technologique de physique PTI (Physico Technical Institute). Le rendement de la cellule GaAs a subi une forte évolution avec l'introduction de la couche fenêtre, en utilisant le matériau AlGaAs. Ce dernier permet de minimiser la recombinaison au niveau de la surface de la cellule GaAs et de rendre la cellule solaire très sensible aux photons de forte énergie.

I.13.2. Le matériau GaInP

Le $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ est un matériau ternaire, composé à partir des deux semi-conducteurs binaires : GaP ($x=1$, $E_g=2.26$ eV) et InP ($x=0$, $E_g=1.344$ eV). Il a un gap direct pour une fraction molaire du Gallium inférieure à 0.74 et un gap indirect sinon. Il forme une bonne interface avec le matériau GaAs pour $x = 0.516$. En lui ajoutant l'Aluminium, on obtient l'alliage AlInGaP qui possède un gap variant entre 1.43 et 2.2 eV et qui maintient toujours une bonne interface avec le GaAs. Ceci donne plusieurs combinaisons dans la conception des cellules solaires monolithiques. En plus, pour la réalisation des couches fenêtres, le matériau GaInP a des propriétés excellentes par rapport au matériau AlGaAs [47,48]. Il ne présente pas de défauts liés à l'incorporation de l'oxygène lors de sa croissance et il possède une faible vitesse de recombinaison à la surface. Avec la possibilité d'utiliser le Ge comme une couche substrat pour la cellule tandem GaInP/GaAs, l'addition d'une troisième cellule devient possible.

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une notion générale sur les matériaux semiconducteurs, ainsi que les propriétés générales des composés binaires (III-V) et ternaires destinés pour la conception des systèmes multijonctions à base des absorbeurs InGaP/GaAs.

Nous avons aussi rappelé les phénomènes essentiels dont le fonctionnement de la cellule solaire fait appel qui sont la génération et la recombinaison.

Référence du chapitre I

- [1] Periodic table of elements, 21 March 2007, <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/student-science-tech/>
- [2] Jamie E. VanDyke, «Modeling Laser Effects on Multi-Junction Solar Cells Using Silvaco Atlas Software for Spacecraft Power Beaming Applications», mémoire de master, Juin 2010.
- [3] B. Garcia Jr., «Indium Gallium Nitride Multijunction Solar Cell Simulation Using Silvaco Atlas», mémoire de master, Juin 2007.
- [4] J. Lavery, «Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco», Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.
- [5] B. Sullivan, «The Effect of Temperature on the Optimization of Photovoltaic Cells Using Silvaco Atlas Modeling», thèse de master, Septembre 2010.
- [6] A. Bali, «Etude Comparative entre les Cellules Solaires de Type P+-AlGaAs/ P-GaAs/NGaAs Et Une Autre De Type N+-AlGaAs/N-GaAs/P-GaAs», Mémoire de magister, 2013.
- [7] Silicon atomic structure, 13 March 2007, http://www.micromountain.com/sci_diagrams/at_struct/at_struct_pages/silicon_lab_none.htm
- [8] I. Mallem, «Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO», mémoire de magister, 2014.
- [9] Luc LASNE, «Physique et technologie des composants de puissance», université de Bordeaux 1, 2003.
- [10] T. Prutski, P. Diaz-Arencibia, R. A. Brito-Orta, A. Mintairov, T. Kosel, and J. Merz, «Luminescence anisotropy of InGaP layers grown by liquid phase epitaxy», J. Appl. Phys. 37, pp. 1563-1568, Mai 2004.
- [11] R. F. Pierret, «Semiconductor Device Fundamentals», Addison-Wesley Publishing, Reading, Massachusetts, 199.
- [12] N. Benhmed Benabdllah, «Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe», mémoire Magister, Université abou bekr Belkaid.

- [13] Hélène Perrin, Farouk Vallette, Gabriel Vasilescu, “ Comportement des porteurs de charge dans les matériaux semi-conducteurs : visualisation à l’aide d’une application Java”,CETISIS'2005, Nancy, 25-27 octobre 2005.
- [14] A. Ricaud, “Convertisseurs photovoltaïques”,à Nov-07 - Comprese.doc.
- [15] O. Bonnaud, “Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs”, Université de Rennes 1, 2003.
- [16] A. Allaoui, “Simulation des caracterstiques électrique des cellules solaires en GaAs”, mémoire Magister, Université de Becher ,2008/2009.
- [17] K. Djriouat, « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs», mémoire de magistère.
- [18] 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.
- [19] M. Belarbi, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités.», thèse de doctorat, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem, 2016.
- [20] Y. Marouf, « Modélisation des cellules solaires en InGaN En utilisant Atlas Silvaco », mémoire de magister, Juin 2013.
- [21] S.M. Sze, and Kwok K. Ng, «Physics of semiconductor devices», J. Wiley and Sons, 2007.
- [22] Jeffrey B. Lavery, «Quantum Tunneling Model of a P-N Junction in Silvaco», United States Navy B.S./ B.A., University of San Diego, 2003.
- [23] S. Selberher, «Analysis and simulation of semi conductor devices», Wien, New York: Springer-Verlag, 1984. (s.d.).
- [24] Almosni S. Growth, «structural and electro-optical properties of GaP/Si and GaAsPN/GaP single junctions for lattice matched tandem solar cells on silicon». PhD thesis. European University of Brittany; 2015.
- [25] ATLAS User’s Manual: Device Simulation Software. Santa Clara, CA: SILVACO International, 2012.
- [26] Nelson, J., 2003. «The Physic of Solar Cells”. Imperial College Press, London, pp. 81–117.

- [27] M.R. Pinto, Conor S. Rafferty and Robert W. Dutton, «PSCES2-Poisson and continuity equation solver», Stanford Electronics Laboratory Technical Report, Stanford University (1984).
- [28] L. Zighed, “ Etude de l'influence de nouveaux films antiréfléchissants sur la conversion photovoltaïque”, These doctorat, Université de Mentori Constantine. 2007.
- [29] M. Orgeret, “les piles solaires le composant et ses applications”, Masson,, paris, 1985.
- [30] M. Benaïcha, “ Etude des matériaux semiconducteur III-V Application à la conversion photovoltaïque”, mémoire Magister, Université de Batna ,2007.
- [31] A. Mc. Evoy, T. Markvart and L. Castaner, “ Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications, Second Edition ”, Elsevier Ltd, 2012, ISBN: 978-0-123859334-1.
- [32] S. Madougou, “ Détermination des paramètres électriques d'une photopile bifaciale au silicium en régime statique sous éclairage multispectral constant et sous l'effet d'un champ magnétique”, thèse doctorat, Université Cheikha Anta diop de DaKar, 2004.h
- [33] B. Equer , “Energie solaire photovoltaïque”, Ellipses éditions marketing, volume 1, 1993
- [35] T. Desrues, “développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction silicium et contacts en face arrière”, these doctorat , Lyon : Insa de Lyon , 2009.
- [36] Y. Sayad, “Interaction Laser-Semiconducteur : Contribution à l'étude de la technique LBIC - application au silicium photovoltaïque”, Thèse Doctorat, Université Constantine, 2009.
- [37] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, Etude de la jonction PN d'un semiconducteur à l'équilibre thermodynamique”, Journal of Electron Devices, Vol. 5, pp.122-126 © JED [ISSN: 1682 -3427] 2007.
- [38] S. Khelifi, Modélisation d'une Cellule Solaire Ga_{1-x}Al_xAs(n)-GaAs(i)-GaAs(p)”, Mémoire magistère, Universitaire de Béchar. 2003.
- [39] A. Hamroun, Transistor bipolaire à hétérojonction (HBT) AlGa_N/Ga_N : Modélisation et simulation des performances”, Mémoire magistère, Université Abou bekr belkaid Telemcen. 2011.
- [40] J. M. Olson, D. J. Friedman and S. Kurtz, “High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells”, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, 2003.
- [41] Peter S. Zory Jr., Paul F. Liao, Paul K, “Quantum Well Lasers”, Academic Press. 1993.

- [42] S. M. Sze and M. K. Lee, “Semiconductor Devices, Physics and Technology”, 3rd edition
john wiley & sons, 2012.
- [43] Brozel MR, Stillman GE, “ Properties fo Gallium Arsenides ”, 3rd edition, Institution of
Electrical Engineers, 1996.
- [44] A. R. Jha, “ Solar cell Technology and applications ”, Taylor & Francis Group, p.26, 2010,
ISBN 978-1-4200-8177-0,
- [45] M. Green, “ Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications”,
University of New South Wales, 1998.
- [46] M. Green, “Solar Cells: operating Principles, Technology, and System application”, Chap.1
Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1-12, 1982.
- [47] D. Ahmari, M. Fresina, Q. Hartmann, P. Barlage, M. Feng, G. Stillman, “ InGaP/GaAs
Heterojunctions bipolar transistor grown on a semi-insulating InGaP buffer layer ”, IEEE
Electron Device Letters, Vol. 18, N°.11,pp.559-561, 1997.
- [48] W. Lour, J. Tsai, L. Laih, W. Liu, “ Influence of channel doping-profile on camel-gate field-
effect transistor ”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.43, pp. 871-876, 1996.

II.1. Introduction

L'électricité photovoltaïque est une source incontournable pour l'avenir, et des efforts considérables se font pour rendre cet apport d'énergie plus performant. Ce chapitre est consacré à une étude générale pour mettre en évidence la cellule solaire et présenté quelques bases et notions indispensables dans la conversion photovoltaïque.

II.2. Spectre solaire

Le soleil se comporte comme un corps noir dont la surface est à la température d'environ 5800K. A la traversée de l'atmosphère, la lumière est absorbée et dispersée en particulier par les composants atmosphériques importants tels que le CO₂ et la vapeur d'eau (H₂O), de sorte que le spectre atteignant la surface de la terre soit atténué et changé dans la forme. Une mesure pour le spectre solaire est l'air Mass (noté AM). Elle est définie comme suit :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (\text{II.1})$$

Où θ est l'angle entre le soleil et le zénith. Le spectre standard pour la latitude tempérée est AM1.5 qui correspond à l'angle de 48 du vertical [1].

AM 1.5G donne une irradiance de 970 w/m², mais a été arrondi à 1 kW/m². L'intensité

I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce a la formule empirique suivante.

$$I_D = 1.33(0.7^{AM})^{0.678} \quad (\text{II.2})$$

Avec I_D en kW/m

Il est clair, d'après ce qui précède, que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et de proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques et de l'altitude du lieu.

La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire : les ensoleillements moyens sur l'année peuvent atteindre $7\text{kW/m}^2/\text{jour}$ dans le nord de l'Australie et au Botswana. En Europe occidentale, la puissance se situe autour de $3\text{kW/m}^2/\text{jour}$ pour les pays comme l'Espagne, à moins de $1\text{kW/m}^2/\text{jour}$ pour le sud de la Suède. La France est soumise à une moyenne annuelle comprise entre 1.5 et $3.1\text{kW/m}^2/\text{jour}$ selon les régions [2].

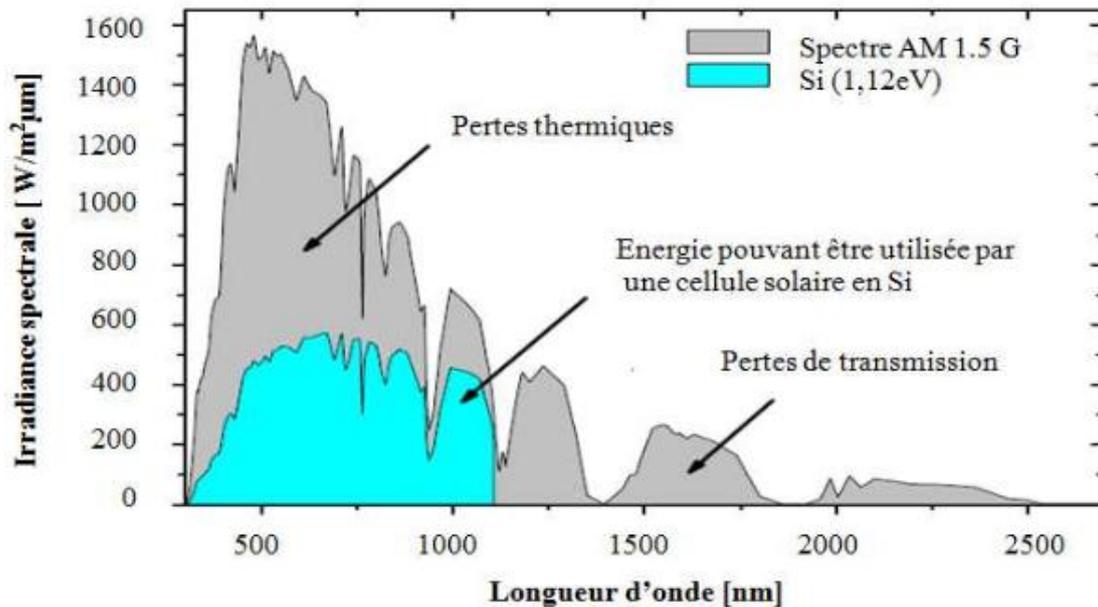


Figure II.1 : Spectre d'émission solaire [3].

II.3. Principe de la conversion Photoélectrique

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. [4]

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur

l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h \cdot c / \lambda \quad (\text{II -3})$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [5]

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale

disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650-670nm.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un. Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau,...). De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Quessier [6]. Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ 1.4eV. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs PV terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec 1.12eV. Ainsi, le maximum théorique pour une simple jonction Si est d'environ 29%.

II.4 La cellule solaire

II.4.1 Définition

La cellule solaire est un composant qui convertit la lumière incidente provenant du soleil en électricité. Elle fournit la source d'énergie de longue durée la plus importante pour les satellites et les véhicules spatiaux. Elle a été aussi implantée avec succès dans plusieurs applications terrestre à échelle réduite. Son importance ne cesse pas de croître surtout depuis que le monde s'est mis à l'évidence qu'il doit développer d'autres ressources d'énergie autres que les ressources conventionnelles. Le meilleur candidat pour cette fonction est le soleil [7].

II.4.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, ou encore photopile, est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

La figure (II.3) montre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque avec les principales régions (Emetteur, Zone de Charge d'Espace et Base) dans lesquelles les photons incidents peuvent créer des porteurs libres. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant la région de leur création. Dans les zones électriquement neutres (p) et (n), les porteurs minoritaires générés par les photons diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) sont propulsés par le champ électrique \vec{E} vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs de charges contribuent donc au courant de la cellule photovoltaïque par leurs diffusions, cette composante est appelée courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p, donnant naissance à un courant de génération [8].

Il convient donc de noter que la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible si et seulement si trois phénomènes physiques de base ont lieu quasi simultanément :

L'absorption d'un maximum de photons possible ;

La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres ;

La collecte sans perte de ces derniers vers un circuit électrique extérieur.

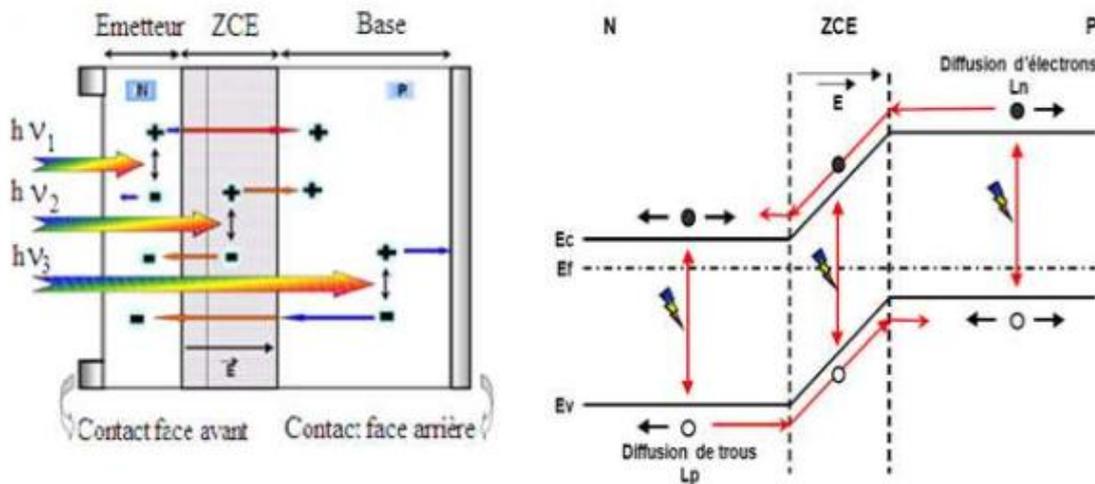


Figure II.2 : Structure et diagramme de bande d'une cellule Photovoltaïque sous éclairement.

Le premier phénomène est l'absorption optique de photons par un matériau semiconducteur approprié dans la partie la plus intense du spectre solaire [2] (figure II.3). Si l'on prend un semiconducteur à grand gap, l'absorption sera limitée aux petites longueurs d'onde, dans l'ultra-violet, alors que la partie la plus importante du spectre solaire se situe dans le visible et le proche infrarouge. Pour absorber un maximum de photons, il faudrait donc un semiconducteur possédant un petit gap. Mais alors la tension de sortie, proportionnelle au gap, et donc la puissance de la photopile ($P = I \cdot V$), seraient trop faibles pour exploiter cette pile. La valeur optimale du gap du matériau utilisé comme absorbeur se situe vers 1,5 eV.

Le second, c'est la séparation rapide des électrons et des trous avant leur recombinaison.

Quant au troisième, c'est l'entraînement des électrons et des trous vers les électrodes collectrices (collecte des porteurs).

I.4.4. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{CELL} + (I_{CC} \times R_{Serie})}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{CELL} + (I_{CELL} \times R_{Serie})}{R_{Shunt}} \quad (II-4)$$

Où $V_T = \frac{(K \times T)}{e}$ représente le potentiel thermodynamique, I_{sat} , le courant de saturation de la jonction, K , la constante de Boltzman ($1.381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin), T , la température de la cellule en Kelvin, e , la charge d'un électron, n , le facteur de non idéalité de la jonction, I_{CELL} , le courant fourni par la cellule, V_{CELL} , la tension aux bornes de la cellule, I_{CC} , le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit, R_{shunt} , la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement, R_{serie} , la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions. La Figure (II-4) représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent déduit de l'équation (II-4). [9]

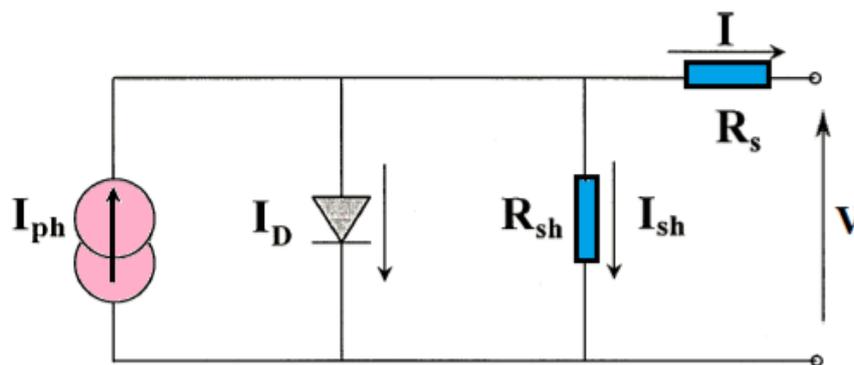


Figure II-3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

II.4.5. Paramètres essentiels caractérisant les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion η , une tension à circuit ouvert V_{co} , un courant de court-circuit I_{cc} et un facteur de forme FF. Les

caractéristiques courant-tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres, Ces caractéristiques permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

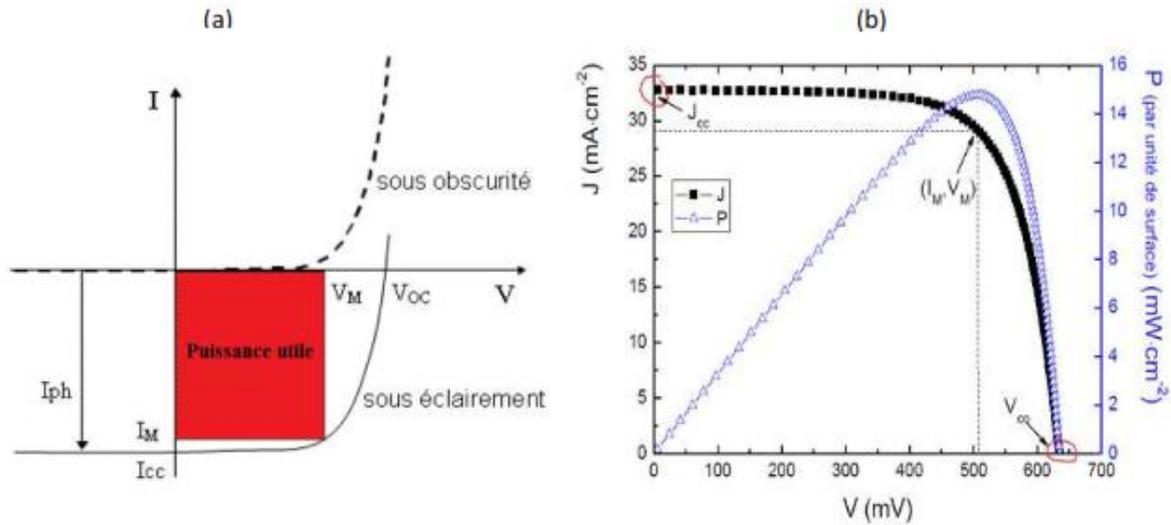


Figure II-4 : (a) Caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque sous éclairement et dans l'obscurité. (b) Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V).

a) Courant de court-circuit

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au photocourant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photocourant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de pair électron trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p , donné par la relation :

$$I_{ph} = q \cdot G \cdot (L_n + L_p) \tag{II-5}$$

b) Tension de circuit ouvert

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photocourant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{co} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q}\right) \cdot \ln \left[\left(\frac{I_{cc}}{I_0}\right) + 1\right] \quad (\text{II-6})$$

c) La puissance caractéristique d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (figure II-6) est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I \quad (\text{II-7})$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

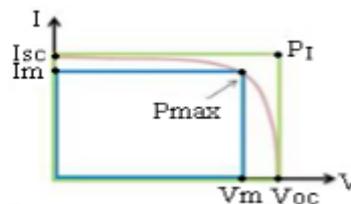


Figure II-5 : Puissance maximum d'une cellule PV.

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_I correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (figure II-8) :

$$P_I = P_{\max \text{ idéale}} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (\text{II-8})$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum $V_{(P_{\max})}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de même que le courant fourni $I_{(P_{\max})}$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

$$P_{\max} = V_m \cdot I_m \quad (\text{II-9})$$

d) Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée P_{\max} et la puissance idéale P_I . Le facteur de forme FF (en angl. File Factor) correspond au rapport [10 ,11]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-10})$$

e) Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o qui est normalisée à 100 mW cm^{-2} pour un spectre de AM1.5. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_o [12] :

$$\eta_m = \frac{V_m \cdot I_m}{P_o} = FF \cdot \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_o} \quad (\text{II-11})$$

II.5 Architecture de la cellule photovoltaïque

Les premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Mais leur architecture a ensuite évolué. En effet, trois grandes avancées

technologiques ont permis l'augmentation de leur rendement. Il s'agit de la texturation de surface, l'usage d'une couche antireflet et le champ de contact arrière.

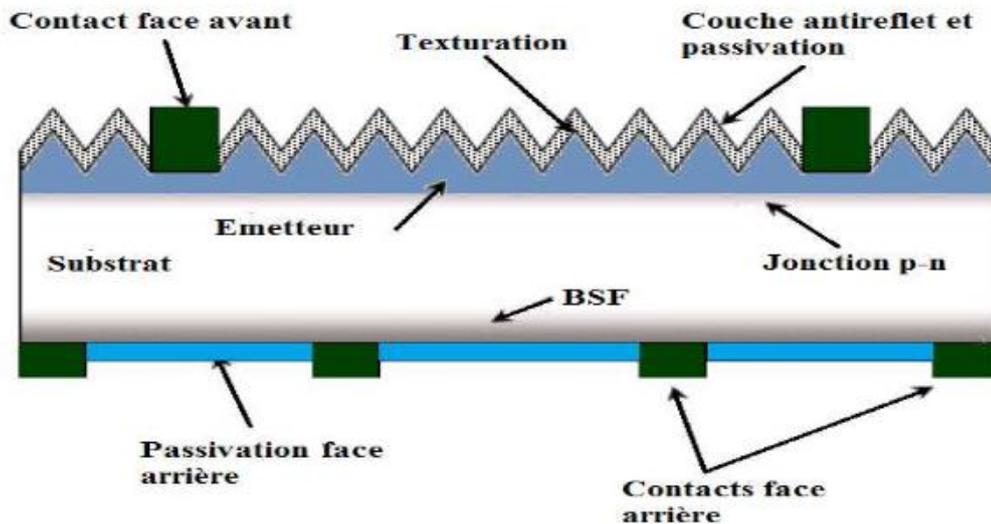


Figure II.6 : Composition d'une cellule photovoltaïque.

II.5.1. Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur la face avant et sur la face arrière de la cellule solaire. Ils créent une barrière de potentiel « barrière de Schottky » [13]. Le contact supérieur couvre la surface de cellule solaire d'un pourcentage de 2–8%. Ce contact a un rôle de minimiser l'ombrage et éviter la recombinaison. Alors que le contact inférieur couvre la partie inférieure de la surface de la cellule.

Les contacts ont un rôle de collecter des porteurs majoritaires et minoritaires et de prévenir la recombinaison et permettre aux rayons lumineux de pénétrer à l'intérieur de la cellule solaire. [14]

Le choix de type de métal a un rôle important dans la collecte de maximum de courant. En plus les contacts métalliques donnant des contacts ohmiques, sont choisis afin d'avoir des résistances de contact plus faibles [15] car la forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement [16] [17].

Parmi les métaux utilisés pour les contacts ohmiques des cellules solaires sont : Li, Na, K, Fe, Ni, Al, Cu, Ag, Au, Pt [18].

Les doigts de métallisation doit être moins larges pour diminuer le taux d'ombrage. Cela entraîne à un courant élevé mais des résistances série seront augmentées [15].

II.5.2. La couche fenêtre

La couche fenêtre est une couche conductrice. Elle permet aux électrons de circuler vers les contacts électriques sans augmenter la résistance des cellules en série.

Pour que les rayons lumineux puissent pénétrer (dans les couches de la cellule solaire photovoltaïque, il faut utiliser des matériaux semi-conducteurs dont l'énergie de gap est importante pour être transparent à la lumière [19]. La couche fenêtre doit avoir une fraction molaire moins élevée pour diminuer le problème d'oxydation [14] comme le Silicium et le Sélénium [22].

II.5.3. Emetteur et base

Les couches émetteur et base sont des couches fines à base de semi-conducteur. La région de type n dans une cellule n-p est nommé émetteur. La région de type p- est nommée la base" (Bates 7) [14]. Pour minimiser l'absorption dans l'émetteur, Il faut que leur épaisseur doive être très fine par rapport à l'épaisseur de la base pour assurer la collecte des porteurs [15].

Le dopage de l'émetteur doit être de l'ordre de 10^{18} cm^{-3} alors que celui de la base doit être plus faible [15]. Le dopage de la base a un rôle important dans l'augmentation du rendement de la cellule solaire. Le faible dopage augmente la durée de la vie des porteurs minoritaires, par contre il augmente le courant de l'obscurité et donc diminue la performance de la cellule.

II.5.4. La surface arrière BSF

Le champ électrique à surface arrière BSF (Back Surface Field) est une couche mince fortement dopée. Elle est localisée sur la face arrière de la cellule solaire et permet de passiver la

face arrière de la cellule. Elle est dopée (p+ ou n+) avec le même type de dopage que le substrat [16]. Et donc une barrière de potentiel est créée à cause de la différence de la concentration de dopage entre la couche BSF et le substrat [15] [17].

Le BSF a deux contributions à la structure de la cellule. D'une part, l'ajout de la couche BSF permet de partager la tension entre les jonctions n-p et p-p+, cela diminue le courant de l'obscurité dans la cellule. D'autre part le champ électrique intégré dans la jonction p-p+ reflète les porteurs minoritaires, par conséquent elle permet d'augmenter la tension de court-circuit de la cellule solaire, de minimiser les recombinaisons et donc collecter des porteurs majoritaires. Plusieurs travaux de recherches se sont intéressés à l'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche BSF pour des raisons commerciales [14] [15] [17].

Les semi-conducteurs sélectionnés pour la réalisation de cette couche doivent avoir.

- Un paramètre de maille proche du paramètre de maille de la base.
- Un gap élevé, supérieur à celui de la base.
- un dopage élevé, de l'ordre de 10^{18} cm^{-3}
- Une bonne transparence aux photons destinés à la cellule inférieure (Bottom cell), si cette couche est appliquée dans une structure Tandem.

II.5.5. Couche antireflet

Pour réduire la réflexion de la lumière à moins de 5% sur la face avant de la surface de la cellule solaire, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti Reflective Coating CAR) [16]. L'opération de réfléchir des rayons lumineux de la couche anti-réfléchissante est basé sur le principe d'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces [20]. Pour des cellules photovoltaïques à haut rendement, il est préférable d'utiliser une double couche antireflet (avec deux diélectriques différents) [17].

Donc, sans la couche antireflet, la cellule solaire reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente arrivant sur la surface de cellule solaire. [16]

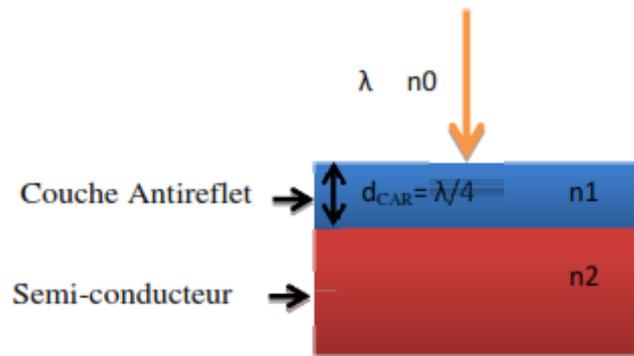


Figure II.7 : couche antireflet d'une cellule photovoltaïque.

Les matériaux utilisés pour la fabrication de la couche anti reflets doivent être soumis aux conditions suivantes :

- Réflexion minimale de la lumière ; Elle permet une réflexion minimale de la lumière.
- Etre transparent pour la gamme de lumière absorbée par les sous-cellules solaires en tandem.
- Etre adhérent au contact.

Le tableau ci-après montre les matériaux utilisés comme des couches antireflets et leurs indices de réfraction [21].

Tableau (II.1) : Indice de réfraction de quelques matériaux.

Matériau	N
MgF ₂	1.38
CeF ₃	1.65
ZrO ₂	2.10
TiO ₂	2.62
Al ₂ O ₃	1.76
ZnS	2.36

II.6. Générations de cellules solaires

Les cellules solaires sont classées en trois générations à base de l'ordre de leur importance. Les cellules solaires de première génération constituent la plus grande part de la production commerciale, soit 89,7% en 2007. De puis plusieurs années, différentes études de recherches visant à améliorer le rendement des cellules photovoltaïques ont été effectués simultanément sur l'ensemble des trois générations.

II.6.1. Première génération

Elles sont à grande surface, à haute qualité et des dispositifs formés des cellules solaires simple jonction de la première génération. La réduction des coûts de production de cette technologie est annulée en raison des coûts de main-d'œuvre élevée, et les coûts des matériaux surtout pour le silicium. Cette tendance se poursuit tant que l'industrie photovoltaïque est en expansion. Bien qu'il dispose d'une large partie d'absorption spectrale, les photons de haute énergie à la fin du bleu et violet du spectre sont gaspillés sous forme de chaleur [22].

La production de cellules solaires à haut rendement avec une efficacité énergétique de conversion élevée sont ainsi favorisées à condition de ne pas augmenter la complexité de la cellule solaire. La limite théorique de l'efficacité des cellules solaires à simples jonction de silicium est de 33%.

II.6.2. Deuxième génération

Pour résoudre ces problèmes de besoins énergétiques et les coûts de production des cellules solaires, nous présentons la deuxième génération. La technologie des piles en couche mince a été imminente. Une réduction importante des coûts des matériaux est possible dans cette technologie. Ils ont aussi l'avantage d'augmenter la taille de l'unité.

Au fil du temps, les cellules solaires de deuxième génération sont attendues pour combler le fossé entre eux et les cellules de première génération par rapport au rendement de conversion énergétique. Avec l'augmentation de la dominance de cette technologie, le coût des

matériaux constitutifs augmente également pour le couvercle supérieur et d'autres encapsulations pour lui donner une plus longue durée de vie. Les matériaux généralement utilisés dans la technologie en couche mince sont principalement le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre et d'indium CuInSe_2 (CIS), le diséléniure de cuivre d'indium et de gallium Cu(InGa)Se_2 (CIGS). Ces matériaux réduisent la masse, et par conséquent le coût de substrat formant le support pour le verre et la céramique. Non seulement ils réduisent les coûts mais également promettent une très haute efficacité de conversion d'énergie. Ce profile fait une tendance vers le changement de la première génération vers la deuxième génération.

Mais la commercialisation de cette technologie s'est avérée être difficile [23].

II.6.3. Troisième génération

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération des cellules solaires [23]. La piètre performance électrique de la technologie en couche mince en maintenant de faibles coûts de production de cette technologie, les technologies de non semi-conducteurs (y compris les cellules à base de polymères).

Le progrès constant de l'évolution de l'industrie photovoltaïque est le résultat de l'augmentation de l'automatisation de la production de cellules solaires à couches minces avec une plus grande efficacité et des coûts réduits. La nécessité des découvertes révolutionnaires dans l'industrie photovoltaïque est parfois interrompue par des progrès dans les matériaux photovoltaïques et les technologies de fabrication pour l'amélioration de la compétitivité des coûts et de l'expansion du marché du photovoltaïque. En brisant les anciennes limites de l'efficacité et du coût en apportant les innovations par l'exploitation de nouvelles compréhensions de la physique et de la science des matériaux deviendront une révolution [24].

II.7. Les Cellules solaires multi-jonctions

II.7.1. Aperçu sur les Cellules solaires multi-jonctions

Comme son nom l'indique, une cellule multi-jonction est une combinaison de plusieurs simples jonctions montées en série. Ces cellules, qui sont à base de matériaux semiconducteurs (III-V), ont été mise au point depuis les années 60 [25]. Le premier dispositif de la multijonction a été exploité, au début de 1980, pour convertir de l'énergie solaire en électricité avec un rendement de 16%. En 1994, US National Renewable Energy Laboratory (NREL) a atteint un record de conversion avec un rendement de 30% [26]. Actuellement, l'avancement technologique permet la réalisation des cellules solaires avec des rendements très élevés de l'ordre de 42.3% [30]. Cependant, ces cellules restent peu connues face à leur coût de fabrication qui est très élevé, mais comme leur domaine de prédilection est le domaine spatial, le marché est moins sensible au coût qu'à la performance.

L'un des grands avantages de telles cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multijonctions actuellement avoisine les 30% pour un spectre AM0. Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres. Ils se frottent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités. Les progrès dans le domaine de l'énergie photovoltaïque se font à travers plusieurs technologies et sont incessants depuis 1970.

II.7.2. Utilité des cellules multijonctions

Le développement des cellules solaires multijonctions a été initié afin d'obtenir des rendements plus élevés non seulement dans l'état initial, mais, plus en particulier dans l'état

stabilisé. Ceci est obtenu par la réduction des deux principales causes de perte résultantes de la non absorption des photons d'énergie $h\nu < E_g$ et les pertes thermique associées à la thermalisation des photo-porteurs chauds créés par les photons d'énergie $h\nu > E_g$.

Dans cette approche, l'empilement de plusieurs simples jonctions ayant différents gap assure l'absorption efficace de différente partie du spectre solaire. En plus, l'utilisation des semiconducteurs (III-V), ainsi que leurs alliages, est plus adéquate pour certaines raisons à savoir : leur gap direct et sa valeur qui est proche de la valeur optimum. Ainsi, ils sont plus résistifs au rayonnement cosmique et aux températures de fonctionnement en orbites ($\sim 50^\circ\text{C}$).

II.7.3. Structure et principe de base des Cellules solaires multijonctions

II.7.3.1. Structure multijonction

Le concept des cellules solaire multijonction est simple, plusieurs cellules avec différents gaps sont empilées l'une sur l'autre de manière que ces sous-cellules allant en bas à une plus petite bande interdite que la précédente. Deux paramètres majeurs doivent être maîtrisés dans ce type de structure. Le premier est la réalisation, entre chacune des jonctions, d'une région conductrice avec contact ohmique de part et d'autre, transparente à la gamme spectrale exploitée par les cellules sous-jacentes. Ces liaisons sont assurées par des diodes Tunnel. Le deuxième paramètre à maîtriser est l'accord du photocourant. En effet, vu que les tensions de circuit ouvert V_{CO} s'ajoutent, les courants de court-circuit I_{CC} doivent être ajustés, car le plus faible d'entre eux impose sa valeur au courant résultant. Ainsi les gaps et les épaisseurs des cellules supérieures doivent être ajustés pour que ces dernières n'absorbe ni trop ni moins de rayonnement.

II.7.3.2. Principe de base

Les cellules photovoltaïques à haut rendement utilisent des matériaux avec des bandes interdites qui couvrent tout le spectre solaire. Les cellules solaires multijonctions comprennent des sous-cellules à simple jonction superposées l'une sur l'autre de sorte que le rayonnement incident interagisse avec les cellules de gaps décroissant. Les cellules supérieures, à grands gaps,

absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous-jacentes de gap plus petits. Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie [27].

L'une des limitations fondamentales des cellules solaires multijonctions est la difficulté de trouver des matériaux de bandes interdites optimales permettant une grande efficacité grâce à sa faible densité des défauts.

Les alliages des groupes III-V du tableau périodique sont des bons éléments pour la fabrication de ces cellules. Ces matériaux sont en général des semi-conducteurs directs avec un coefficient d'absorption élevé et leurs bandes d'énergie interdites une grande partie du spectre solaire. Leurs structures complexes peuvent être déposées avec une très haute qualité cristalline par des techniques de croissance [28].

II.7.3.3. La jonction tunnel

La jonction tunnel est due au dopage excessif (p^+/n^+) du semi-conducteur pour déplacer les niveaux de Fermi vers la bande de valence ou vers la bande de conduction. Par conséquent des trous sont apparus dans la bande de valence de la jonction P et des électrons dans la bande de conduction de la jonction n. Donc la largeur de la zone de déplétion est diminuée par la concentration du dopage qui affecte l'effet de la jonction tunnel.

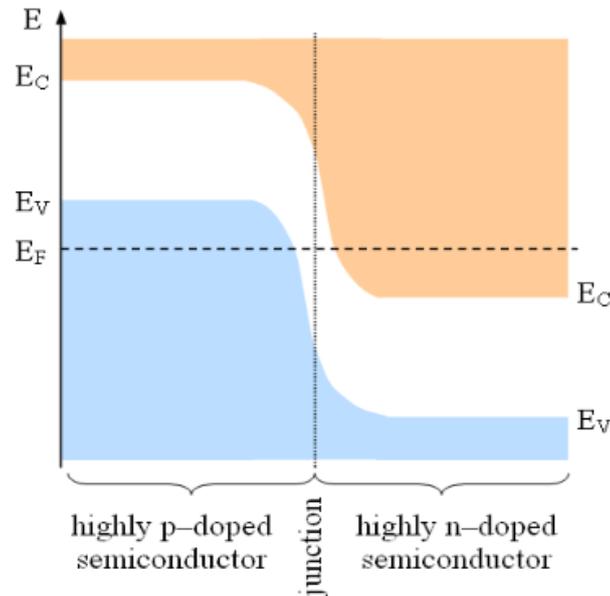


Figure II-8 : Diagramme de bande de dopage de la jonction tunnel [29].

II.7.3.4. Critères de choix de la jonction tunnel

En 1958, l'auteur L. Esaki a découvert que la concentration de dopage des impuretés peut être augmentée de 1 à 1000 pour 10^7 atomes de semi-conducteurs [30]. Ce dopage crée une résistance négative. La zone de déplétion se rétrécit à cause de la concentration élevée du semi-conducteur permettant aux électrons de traverser un tunnel à travers la barrière sans changer leur énergie.

De façon générale, le choix de la jonction tunnel et son utilisation entre les cellules (supérieure et inférieure) doit satisfaire les critères suivants :

- Les matériaux semi-conducteurs utilisés pour de telle jonction doivent posséder les mêmes constantes de réseau (maille).
- L'épitaxie de la cellule supérieure exige que la cellule inférieure doive supporter une température élevée. Mais l'augmentation de la température entraîne une diffusion du dopants et donc la diminution du courant de crête de la JT (courant de pic).
- La jonction doit assurer un contact ohmique entre les deux cellules en tandem.
- Il faut qu'elle assure un passage des photons vers la cellule inférieure.

- L'épaisseur de la jonction ne doit pas dépasser 10nm pour minimiser l'absorption par cette jonction tunnel [31].
- Il faut que l'énergie de gap du tunnel doive être supérieure à celle de la cellule supérieure. Mais le courant tunnel va diminuer avec l'augmentation du gap.

II.7.3.5. Avantage de l'utilisation de la jonction tunnel

Pour permettre une conduction électrique dans les deux sens entre les deux cellules InGaP et GaAs, on introduit une jonction tunnel d'épaisseur (entre la base et l'émetteur) de l'ordre de 8nm.. Cette dernière assure la circulation du courant électrique dans la cellule en tandem et une résistance de connexion faible entre le BSF de la cellule supérieur (InGaP) et la fenêtre de la cellule inférieur (GaAs) [29] [32]. Par conséquent, si un rayon lumineux frappe une cellule solaire, la tension fournie par la cellule supérieure sera inversé [33].

II.7.4. Cellule solaire à Multijonctions

Les cellules solaires à multijonctions peuvent augmenter le rendement de la cellule en introduisant un autre semi-conducteur capable de réduire une partie des pertes par thermalisation ou par transmission. Dans cette approche trois configurations existent : les cellules solaires monolithiques, les cellules solaires mécaniquement empilées (Mechanically stacked) et le système multi-spectral. Dans le présent travail on s'intéresse aux cellules solaires monolithiques.

II.7.4.1. Système Multi-spectrale

Cette approche est considérée comme l'approche la plus simple dans sa conception, elle conception. Elle est basée sur la décomposition du spectre solaire par des prismes ou miroirs dichroïques, envoyant chacun une partie du spectre solaire sur la cellule correspondant à la bande interdite (Figure II.16). L'utilisation des miroirs permet ainsi une meilleure adaptation du spectre solaire au système de cellules utilisées, la connections des cellules étant indépendante. Le contrôle de la fréquence de la lumière se fait à l'aide de filtres sélectifs. L'alignement,

l'efficacité des miroirs, le câblage individuel de chaque cellule rend cette approche indésirable, notamment lorsque la puissance électrique délivrée augmente [34].

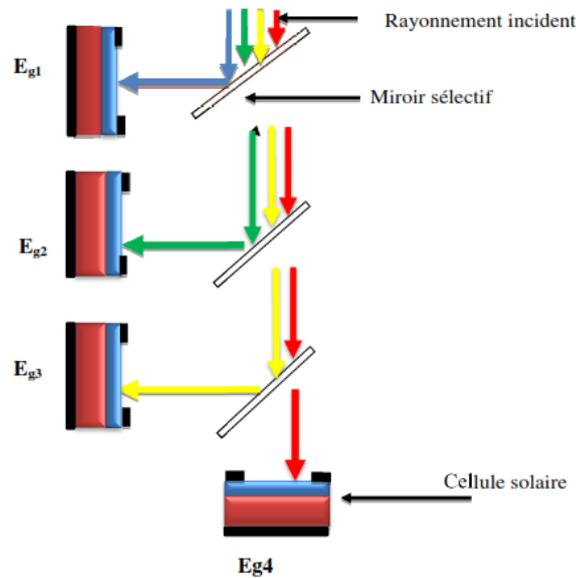


Figure II.9 : Association de plusieurs cellules solaires pour une conversion multispectrale (Dichroicmirror or Filter Reflector).

II.7.4.2. Système à empilement mécanique (mechanically stacked MSC)

Dans cette approche, Les cellules sont placées sur le même trajet optique mais sont indépendantes les unes des autres. Pour séparer les cellules, on utilise une matière adhésive qui assure une bonne isolation électrique ainsi qu'un bon couplage optique et thermique entre les couches [35]. Chaque cellule devient électriquement isolée des autres (Figure II.17).

Ce type de cellule n'exige aucune condition sur les matériaux semi-conducteurs la constituant (paramètre de maille). Mais la connexion et l'isolation électrique entre les couches ajoutent une étape supplémentaire à sa technique de fabrication (interconnexions électriques, le couplage optique et l'emboitage de la cellule) et augmente les pertes d'ombre, ce qui diminue le rendement d'où l'utilité de la cellule monolithique.

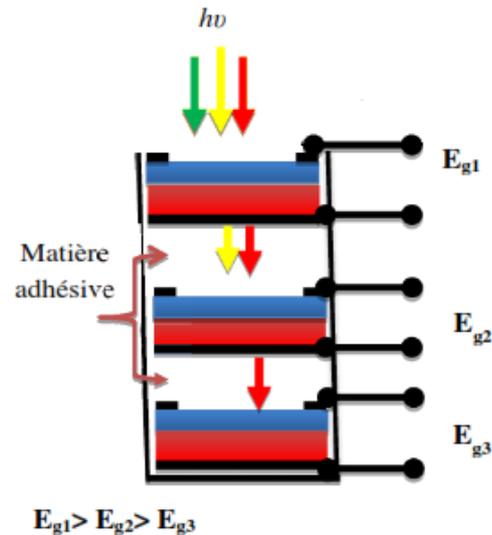


Figure II.10 : Empilement mécanique des cellules solaires, schéma de principe.

II.7.4.3. Cellule monolithique (Tandem, Cascade ou Multicolore MC, Two-terminal Series-connected)

Le concept de la cellule solaire monolithique est basé sur l'empilement de plusieurs cellules en série et sur le même trajet optique avec un ordre décroissant des différents gaps (Figure II-18-a), où chaque cellule joue le rôle d'un filtre pour la cellule suivante. Ce système peut être représenté par des diodes en série où l'émetteur de la première diode est connecté à la base de la seconde (Figure II-17-b). On utilise dans ce type de configuration la même polarité des cellules. Les limitations rencontrées avec cette approche sont : les paramètres de maille très proches entre les couches de la cellule (croissance par épitaxie), la croissance de toutes les couches sur un seul substrat et la réalisation d'une jonction tunnel de haute qualité (pour assurer une bonne connexion électrique entre les couches). La cellule tandem doit être parcourue par le même courant (current- matching) car les performances de toute la cellule tandem sont limitées par la cellule qui débite le moins de courant. En plus de la condition imposée sur l'égalité du courant, le choix du gap de chaque cellule doit être précis pour avoir un maximum de rendement [36].

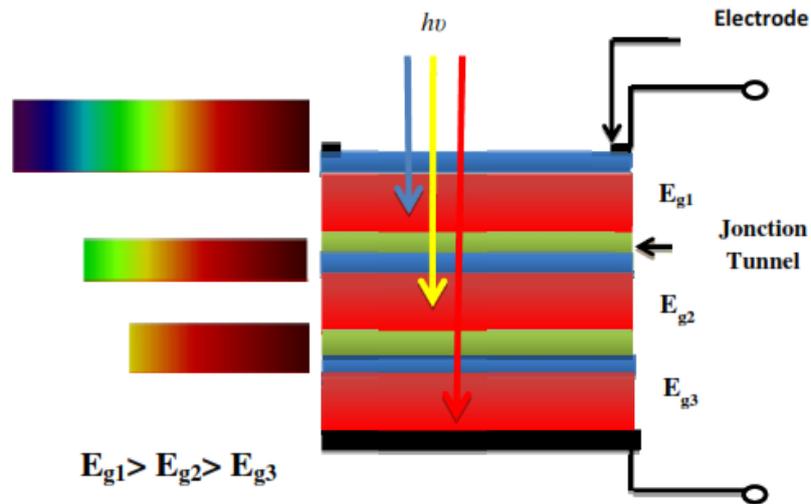


Figure II-11 : a) Schéma synoptique d'une cellule solaire monolithique.

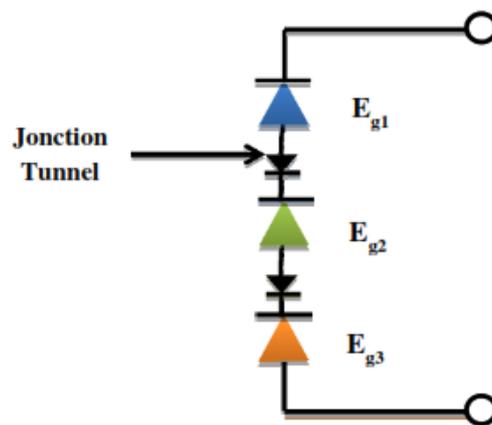


Figure II-11 : b) Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire tandem avec interconnexion des diodes Tunnel.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude décrivant le principe de fonctionnement de la cellule solaire à partir de son absorption du spectre solaire jusqu'à la production d'électricité. Nous avons décrit dans ce chapitre les composants du spectre solaire et le principe de fonctionnement de la cellule solaire, nous avons ensuite fait une modélisation de la cellule et nous avons fini ce chapitre par les cellules solaires multi-jonctions.

Références du chapitre II

- [1] M. Hepp, “Light Trapping in Quantum Well Solar cells Grown on Patterned substrate”, Master of Science in semiconductor, university of London, 1998.
- [2] N. Oleksiy, “ Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités”, Thèse de doctorat, Institut nationale des sciences appliquées, Lyon, 2005.
- [3] M. Ouddah, “Etude du silicium poreux destine aux cellules solaires”, Thèse de magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [4] F.E.T. Technologies, “Le photovoltaïque,” 1921, pp. 1-10.
- [5] Emery, K. *et al*; Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, Page(s): 1275 – 1278, 13-17 May 1996.
- [6] William Shockley and Hans J. Queisser “Detailed balance limit of efficiency of P-N junction solar cells,” J. APPL. PHYS. 32, 510;DOI:10.1063/1.1736034,(1961).
- [7] G. A. Gow, C. D. Maning, “Development of photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies”, IEE Proc. Electr. Power Appl, Vol 146, No 2, 1999.
- [8] A. Bouloufa, “Etude et Caractérisation des Semiconducteurs Ternaires et Quaternaires $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ par Spectroscopie Photoacoustique”, Thèse de doctorat d’Etat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2007.
- [9] Zaouk, D.; Zaatari, Y.; Khoury, A.; Llinares, C.; Charles, J.-P.; Bechara, J.; Ajaka, M.; « Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure » ,Environment and Solar, Page(s):93 – 95, 2000 Mediterranean Conference for 16-17 Nov. 2000.
- [10] Stéphane Petibon “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques” ; Thèse de Doctorat de l’Université de Toulouse (2009).
- [11] K.G. Deepa, R. Jayakrishnan, K.P. Vi-Jayakumar, C.S. Kartha, V. Ganesan, Sol. Energy 83, 964-968 (2009).

- [12] A. Antony, "Preparation and characterisation of certain II-VI, I-III-VI semiconductor thin films and transparent conducting oxides", Thèse Doct., Cochin Univ. of Science and Technology, India p. 17 (2004)
- [13] A. Mahfoud, « Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement », thèse de doctorat, université de Sétif 1, 2015.
- [14] Jamie E. VanDyke, «Modeling Laser Effects on Multi-Junction Solar Cells Using Silvaco Atlas Software for Spacecraft Power Beaming Applications», mémoire de master, Juin 2010.
- [15] M. Belarbi, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités.», thèse de doctorat, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem, 2016.
- [16] Y. Marouf, « Modélisation des cellules solaires en InGaN En utilisant Atlas Silvaco », mémoire de magister, Juin 2013.
- [17] B.Lakehal, « Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky », mémoire de magister, 2009.
- [18] S.M. Sze, and Kwok K. Ng, «Physics of semiconductor devices», J. Wiley and Sons, 2007.
- [19] Khelifi et A. Belghachi, « Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d'une Cellule Solaire GaAs », Rev. Energ. Ren. Vol.7 (2004)13-21
- [20] I. Mallem, «Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO», mémoire de magister, 2014.
- [21] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/antiref.html#c2>.
- [22] G. Gourdin, "Solar cell technology (current state of the art)", 2007.
- [23] M. A. Green, "3rd generation PV solar cells for 2020 and beyond", vol 14, 2010.
- [24] T. Key, "Solar Photovoltaics: Expanding electric generation options", 2008.
- [25] M. Wolf, "Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters", Proc. Inst. Radio Engineers, vol 48, 1960, p. 1246.
- [26] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of photovoltaic science and engineering", 2003.
- [27] B. Burnett, "The basic physics and design of III-V multijunction solar cells", 2002.

- [28] M. Yamaguchi, “Present status of R&D super-high-efficiency III-V compound solar cells in Japan”, 17th Photovoltaic European Conference, 2001.
- [29] Jeffrey B. Lavery, «Quantum Tunneling Model of aP-N Junction in Silvaco», United States Navy B.S./ B.A., University of San Diego, 2003.
- [30] L. Esaki, «New phenomenon in narrow Germanium p-n junction», Phys. Rev, Vol.109, pp.603-604, 1958.
- [31] J. M. Olson, D.J. Friedman and S. Kurtz, «High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells», Handbook of photovoltaics Science and Engineering. John Wiley and Sons, 2003.
- [32] M. Babar, E. A. Al-Ammar & N. H Malik, «Numerical simulation model of multijunction solar cell», Journal of Energy Technologies and Policy (2012), 2(7), 44-53.
- [33] F. Nemmar, «Etude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques a base de matériaux organiques, »—thèse de doctorat, 2013.
- [34] A. Luque and S. Hegedus, “ Handbook of Photovoltaic Science and Engineering ”, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2003.
- [35] A. Mc. Evoy, T. Markvart and L. Castaner, “ Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications, Second Edition ”, Elsevier Ltd, 2012, ISBN: 978-0-123859334-1.
- [36] P.T. Landsber and V. Badescu, “ Solar energy conversion: list of efficiencies and some theoretical considerations. I Theoretical considerations, II Results ”, Progress in Quantum Electronics, Vol. 22(4), pp. 231-255. 1998.

Dans ce chapitre, nous présentons une description relativement détaillée sur le logiciel de simulation SILVACO- ATLAS. Le logiciel SILVACO comprend une gamme large d'étude intégrale dans l'élaboration et la caractérisation des cellules solaires. Nous, nous allons appliquer la partie SILVACO-ATLAS pour générer les résultats des caractéristiques électriques de la cellule solaire multi-jonction proposée.

III.1. Introduction

SILVACO (SiliconValley Corporation) est une société Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs.

Historiquement la compagnie a été fondée en 1984 par Dr. Ivan Pesic pour répondre aux besoins des designers de circuits intégrés (IC, integrated circuits) analogiques pour des modèles SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) de plus en plus précises et linéaires.

L'entrée de SILVACO dans la technologie **TCAD** a eu lieu en 1989, et elle a été basée sur une recherche du Département des Dispositifs Physiques de l'Université de Stanford, ainsi apparaissent dans SILVACO « Athena » comme simulateur des processus et « Atlas » comme simulateur des dispositifs (2D et 3D).

SILVACO n'a pas été conçu pour répondre à un seul composant semi-conducteur. En incluant des modèles plus généraux de la physique des semi-conducteurs, il permet des simulations plus étendues en balayant toute une gamme de composants électroniques.[III.1]

III.2. Présentation d'Atlas

La capacité à simuler avec précision un dispositif semi-conducteur est cruciale pour l'industrie et milieux de recherche. L'outil de simulation ATLAS est spécialement conçu pour la modélisation 2D et 3D de composants basés sur la physique des semi conducteurs, en incluant les propriétés électriques, optiques et thermiques. Il possède une bibliothèque regroupant des matériaux prédéfinis comme il permet à l'utilisateur de définir d'autres matériaux propre à leur choix. [III.2]

Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime (DC), (AC), transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, et des données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous en deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure définie par l'utilisateur ou par le programme.

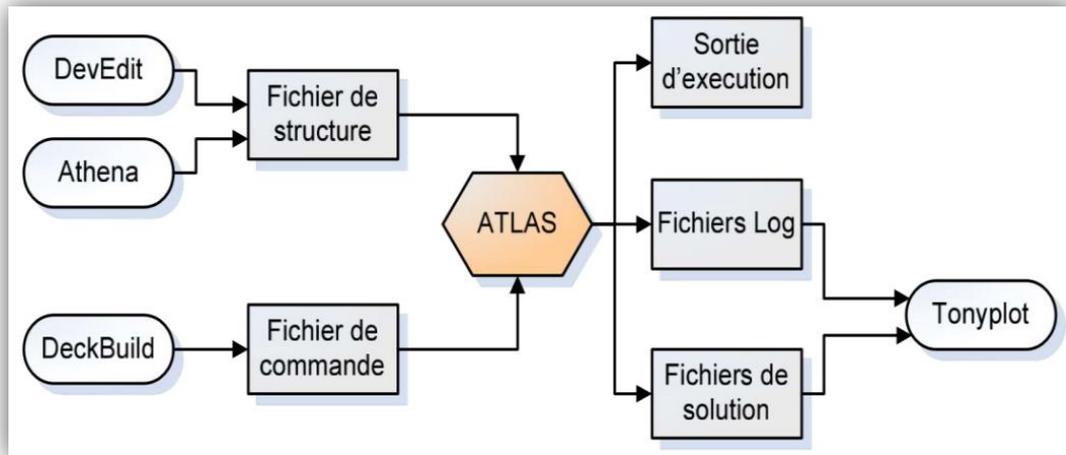


Figure (III.1) : Atlas entrées et sorties [III.2].

Le schéma de la Figure IV.1 représente les différents types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas ». La plupart des simulations réalisées sous « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier texte contenant les commandes pour que Atlas s'exécute (représenté par « Fichier de commande »). Le second fichier est un « Fichier de structure » contenant la structure du dispositif qui va être simulée définie dans « Athena » ou « DevEdit ». A la sortie « d'Atlas », nous avons trois types de fichiers. Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier « log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique). [III.4]

Le troisième fichier de sortie est le « Fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions en un point donné du dispositif (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation «TonyPlot».

III.2.1. DeckBuild

DeckBuild est un environnement d'exécution graphique interactive, pour le développement de procédé et les dispositifs de simulation des entrées de plate-formes. Il se compose d'une fenêtre pour la création de la plate-forme d'entrée et une fenêtre pour la sortie du simulateur et le contrôle et un ensemble de fenêtres pop-up pour chaque simulateur qui fournissent le langage complet et le support d'exécution (voir la Figure (III.2)) [III.5].

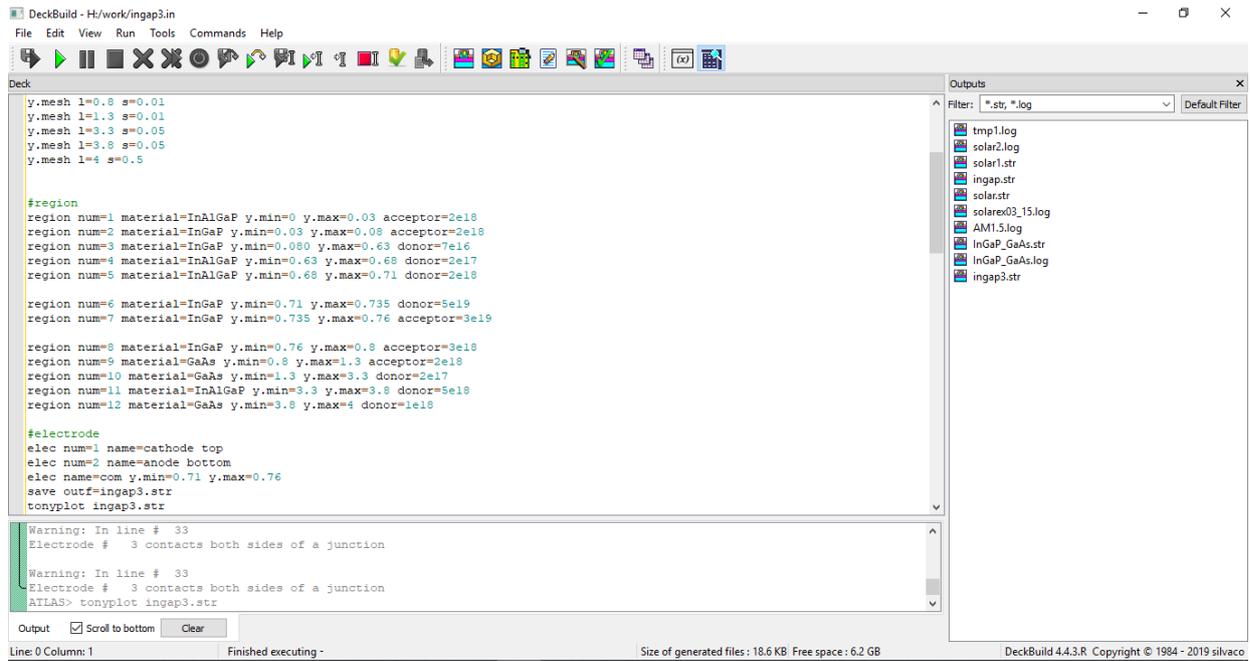


Figure (III.2) : Menu de commandes de DeckBuild.

III.2.2. TonyPlot

TonyPlot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF, Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l’analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). TONYPLOT peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DECKBUILD, VWF ou SPDB [III.6].

III.3. Ordres de commandes d’Atlas

Après la présentation de l’outil de simulation « d’Atlas » de SILVACO TCAD, sa composition interne et son fonctionnement nous allons maintenant présenter l’ordre des commandes propres à la logique de programmation « d’Atlas ». Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (Tableau III.1). Si l’ordre n’est pas respecté, un message d’erreur apparaît et le programme ne s’exécute pas d’une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l’ordre idoine, le simulateur ne les prend pas en compte. [III.7]

Groupe		Commandes
1. Spécification de la structure	—————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Spécification des modèles des matériaux	—————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Sélection de la méthode	—————	METHOD
4. Spécification des solutions	—————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Analyse des résultats	—————	EXTRACT TONYPLOT

Tableau (III.1) : Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe.

Les commandes fondamentales sont :

- ❖ **MESH** : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.
- ❖ **REGION** : c'est une instruction qui définit une région dans une structure.
- ❖ **ELECTRODE** : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une structure.
- ❖ **DOPING** : indique le type et le profil de dopage.
- ❖ **MATERIAL** : associe des paramètres physiques aux matériaux utilisés dans la simulation par exemple : affinité électronique, énergie de gap, la fonction de la densité des états, les vitesses de saturation, les durées de vie des porteurs minoritaires, etc (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standards)
- ❖ **MODELS** : Cette instruction permet de faire appel aux modèles physiques existants dans le logiciel, nous pouvons citer comme exemples les modèles de recombinaison Shockley Read Hall (SRH), Auger et les modèles concernant les statistiques des porteurs de Boltzmann, Fermi, etc ...
- ❖ **CONTACT** : indique les attributs physiques d'une électrode : anode, cathode, drain, etc...
- ❖ **INTERFACE** : indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/isolant, comme exemple, la vitesse de recombinaison en surface et la densité de charge à l'interface.
- ❖ **METHOD** : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes. Les méthodes numériques qui peuvent être spécifiées par cette instruction incluent des méthodes telles que celles de Gummel et de Newton.
- ❖ **LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauveées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en

majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée, qu'elle soit C.C., transitoire ou C.A., générée par la commande SOLVE est sauvée après la commande LOG (donc les informations sauvées sont de type électrique et elles sont, par exemple, en fonction de la tension de polarisation ou de la source de lumière). Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

- ❖ **SOLVE** : ordonne à Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- ❖ **LOAD** : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conditions initiales à d'autres points de polarisation.
- ❖ **SAVE** : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- ❖ **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou solution.
- ❖ **TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » de post processus graphique des donnés. Elle permet de présenter les solutions trouvées pendant la simulation sous forme de graphe.

Une autre commande importante est BEAM, sa position est au niveau 4 des groupes de commande. BEAM indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière (mono ou multi-spectrale) collimatée. Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la commande SOLVE, dans ce cas le module Luminous est activé. Donc BEAM est utilisé pour simuler des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

III.4. Spécification de la structure

Silvaco Atlas reçoit les fichiers d'entrée qui contient les programmes de simulation de DeckBuilt. Atlas est appelé à exécuter ces derniers par la commande suivante : go atlas
Le format des commandes d'Atlas est le suivant [63]:

< STATEMENT><PARAMETER>=<VALUE>

Exemple : material mat=InGaP nc300=1.30e20

III.4.1 Mesh

Le maillage adopté dans notre travail est bidimensionnel. Par conséquent on définit seulement les paramètres x et y. Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales espacées entre elles [III.4]. La Figure (III.3), indique un maillage d'une structure.

Le format général pour définir le maillage est :

X.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

Y.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

```
x.mesh l=0 s=0.25
x.mesh l=1 s=0.25
y.mesh l=0.03 s=0.1
y.mesh l=0.08 s=0.01
y.mesh l=0.63 s=0.01
y.mesh l=0.68 s=0.01
y.mesh l=0.71 s=0.01
y.mesh l=0.735 s=0.01
y.mesh l=0.76 s=0.01
y.mesh l=0.8 s=0.01
y.mesh l=1.3 s=0.01
y.mesh l=3.3 s=0.05
y.mesh l=3.8 s=0.05
y.mesh l=4 s=0.5
```

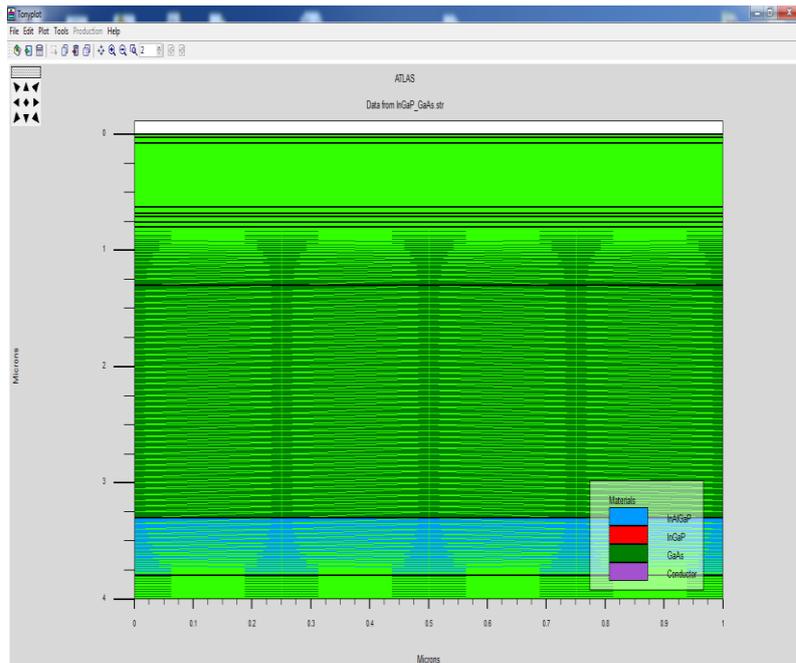


Figure (III.3) : Atlas mesh.

Le maillage joue un rôle important pour l’obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d’exécution et l’exactitude des résultats [III.8].

III.4.2 Régions

La déclaration de la région est utilisée pour séparer l’instruction du maillage initial en blocs distincts et définit les paramètres matériels initiaux qui peuvent être désignés plus tard par des numéros de région. Tous les domaines maillés d’une structure doivent être assignés à une région et les régions doivent être ordonnées de la plus basse vers la plus élevée. Par exemple, la région 5 ne peut pas être définie avant la région 4 [III.9].

```
#region
region num=1 material=InAlGaP y.min=0 y.max=0.03
region num=2 material=InGaP y.min=0.03 y.max=0.08
region num=3 material=InGaP y.min=0.080 y.max=0.63
region num=4 material=InAlGaP y.min=0.63 y.max=0.68
region num=5 material=InAlGaP y.min=0.68 y.max=0.71

region num=6 material=InGaP y.min=0.71 y.max=0.735
region num=7 material=InGaP y.min=0.735 y.max=0.76

region num=8 material=InGaP y.min=0.76 y.max=0.8
region num=9 material=GaAs y.min=0.8 y.max=1.3
region num=10 material=GaAs y.min=1.3 y.max=3.3
region num=11 material=InAlGaP y.min=3.3 y.max=3.8
region num=12 material=GaAs y.min=3.8 y.max=4
```

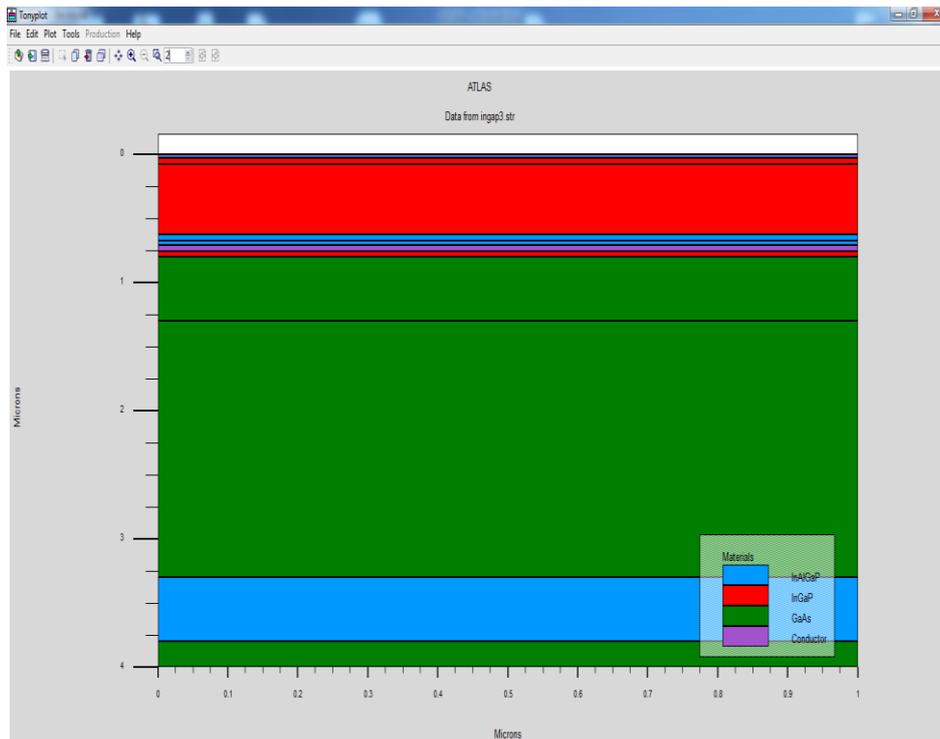


Figure (III.4) : Régions créées dans la cellule solaire tandem à base de InGaP/GaAs.

III.4.3 Electrodes

La prochaine spécification de la structure correspond aux électrodes (Figure III.5). Typiquement dans notre simulation, il n’y a que deux électrodes, l’anode et la cathode [III.10]. Le nombre d’électrodes qu’on peut définir avec Silvaco Atlas peut aller jusqu’à **50**. Le format pour définir les régions est le suivant :

ELECTRODE NAME=<electrode name><position parameters>

Sur la figure la commande « Electrode » est utilisée pour définir l’anode et la cathode.

Electrode num=1 name=cathode top

Electrode num=2 name=anode bottom

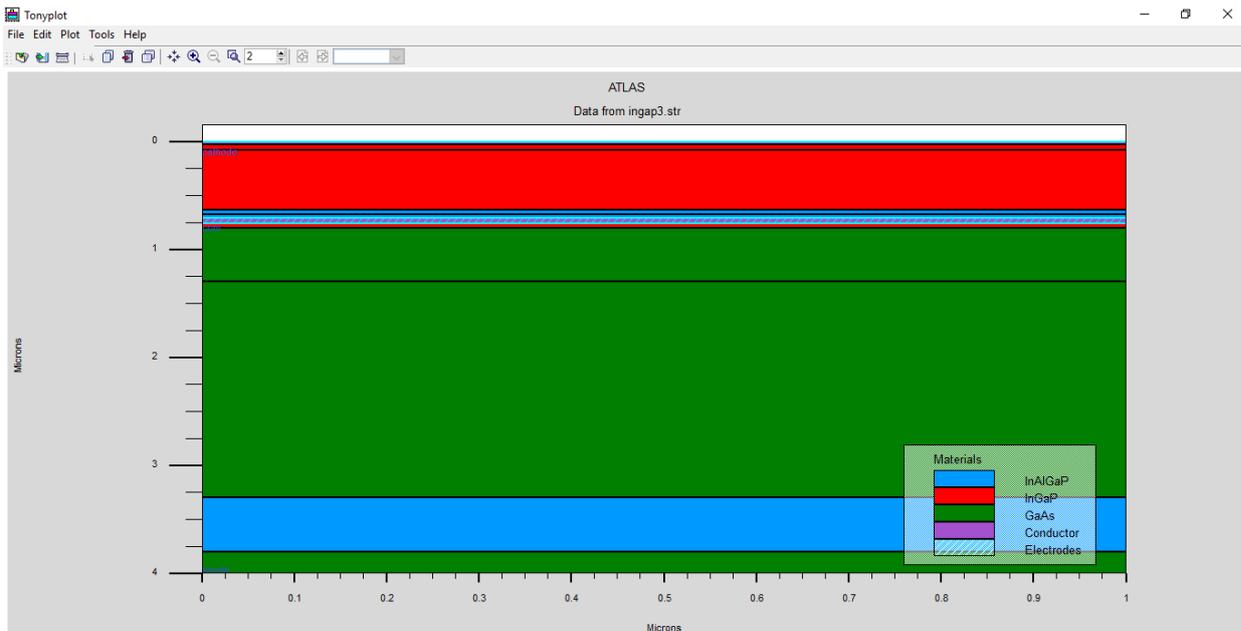


Figure (III.5) : Atlas dopage.

III.4.4 Doping

La dernière spécification de la structure est le dopage. Le format pour définir le dopage est le suivant [III.10]:

DOPING<distribution type><dopant_type><position parameters>

```
#region
region num=1 material=InAlGaP y.min=0 y.max=0.03 acceptor=2e18
region num=2 material=InGaP y.min=0.03 y.max=0.08 acceptor=2e18
region num=3 material=InGaP y.min=0.080 y.max=0.63 donor=7e16
region num=4 material=InAlGaP y.min=0.63 y.max=0.68 donor=2e17
region num=5 material=InAlGaP y.min=0.68 y.max=0.71 donor=2e18

region num=6 material=InGaP y.min=0.71 y.max=0.735 donor=5e19
region num=7 material=InGaP y.min=0.735 y.max=0.76 acceptor=3e19

region num=8 material=InGaP y.min=0.76 y.max=0.8 acceptor=3e18
region num=9 material=GaAs y.min=0.8 y.max=1.3 acceptor=2e18
region num=10 material=GaAs y.min=1.3 y.max=3.3 donor=2e17
region num=11 material=InAlGaP y.min=3.3 y.max=3.8 donor=5e18
region num=12 material=GaAs y.min=3.8 y.max=4 donor=1e18
```

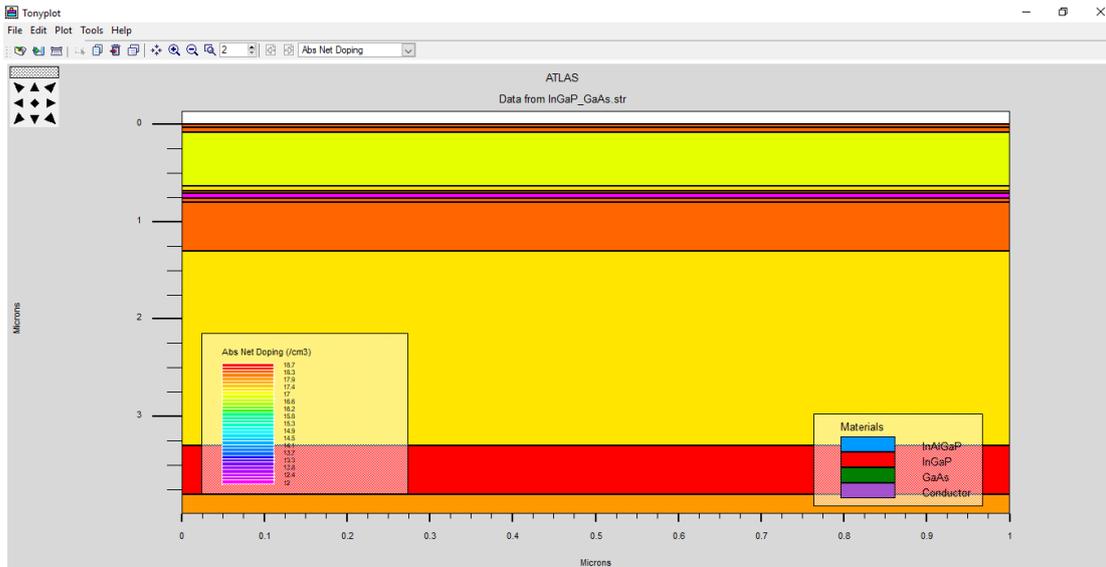


Figure (III.6) : Atlas dopage.

III.5 Spécification des modèles des matériaux

Après avoir défini la spécification de la structure, l'étape prochaine est la spécification des modèles des matériaux qui est divisé en : matériau, modèles, contact et interface.

III.5.1 Matériau

Le format d'Atlas pour définir le matériau est le suivant :

MATERIAL <localization><material_définition>

Exemple pour la commande Material:

material mat=InAlGaP mun=2150 mup=141 nc300=1.20e20 nv300=1.28e19

Divers autres paramètres peuvent être définis comme commande MATERIAL. Des exemples de ces paramètres sont le gap à la température ambiante **EG300**, la mobilité d'électrons **MUN**, la durée de vie de recombinaison des électrons **TAUN0** et des trous **TAUPO**, densité des états dans la bande de conduction à température ambiante **NC300**, entre autres.

III.5.2 Models

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, recombinaison, statistiques des transporteurs, l'ionisation d'impact, et de tunnels. La syntaxe de la commande Model est la suivante:

MODELS <model flag><general parameter><model dependent parameters>

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles.

MODELS CONMOB FLDMOB SRH

CONMOB est le modèle de la concentration dépendante. **FLDMOB** est le modèle de dépendance du champ électrique. **SRH** est le modèle de Shockley-Read-Hall. [III.3]

III.5.3 Beam

Lorsque l'illumination est importante pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il y'a la possibilité d'utiliser un certain nombre de sources de lumière et d'ajuster leurs localisation, orientation et intensité.

Le spectre de la lumière peut être décrit dans tous les détails nécessaires [III.12]. Polarisation, réflectivité et lancer le tracé de rayons est aussi parmi les caractéristiques du simulateur.

III.5.4 Contact

Contact détermine les attributs de l'électrode [III.10]. La syntaxe de contact est comme suit:

CONTACT NUMBER=<n> |NAME=<ename>|ALL

Ce qui suit est un exemple de la commande Contact.

CONTACT NAME=anode current

III.6 Sélection de la méthode numérique

Après la spécification du modèle des matériaux, le choix de la méthode numérique doit être spécifié. La seule commande qui s'applique pour la sélection de la méthode numérique est Method.

Il existe plusieurs méthodes numériques pour calculer des solutions aux problèmes des dispositifs à semiconducteur. Trois types de techniques de solution sont utilisés dans le simulateur Silvaco Atlas:

- ✓ Découplée (Gummel)
- ✓ Entièrement couplé (NEWTON)
- ✓ BLOC

La méthode Gummel résout pour chaque inconnues en gardant tous les autres inconnus constants. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y est une solution stable. La méthode de Newton résout toutes les inconnues simultanément. La méthode BLOC résout quelques équations avec la méthode Gummel et les autres avec la méthode NEWTON. [III.4]

Le Procédé Gummel est utilisé pour un système d'équations qui sont faiblement couplées et lorsqu'il ya convergence linéaire. Procédé NEWTON est utilisé lorsque les équations sont fortement couplées avec convergence quadratique.

III.7 Spécification des solutions

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de solution. La spécification de solution se décompose des commandes suivantes log, solve, load, et save.

III.7.1 Log

LOG enregistre toutes les caractéristiques du terminal dans un fichier. Toute donnée de type DC, transitoire, ou AC générée par la commande SOLVE après une commande LOG est enregistré.

La commande suivante montre un exemple de la commande LOG:

```
log outf=InGaP_GaAs.log
```

L'exemple enregistre les informations de courant-tension dans le fichier **InGaP_GaAs.log**.

III.7.2 Solve

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une Solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

III.7.3 Load et save

La commande LOAD entre les solutions précédentes à partir de fichiers comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE entre toutes les informations d'un point de nœud dans un fichier de sortie.

Ce qui suit sont des exemples des instructions LOAD et SAVE.

```
SAVE OUTF=SOL.STR
```

Dans ce cas, les informations sont enregistrées dans le fichier SOL.STR après une commande SOLVE. Puis, dans une simulation différente, SOL.STR peut être chargé comme suit:

```
LOAD INFILE=SOL.STR
```

III.8 Analyse des résultats

Une fois qu'une solution a été trouvée pour un problème de dispositif semi-conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement avec l'instruction TONYPLOT. En outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec la commande EXTRACT, comme le montre la Figure [III.7].

Dans l'exemple ci-dessous, l'instruction EXTRACT obtient la caractéristique courant/tension d'une cellule solaire [III.3]. Ces informations sont enregistrées dans le fichier InGaP_GaAs.dat. Ensuite, TonyPlot trace le graphe reliant les informations contenues dans le fichier InGaP_GaAs.dat. La Figure (III.7) montre la courbe de l'échantillon IV tracée par TonyPlot.

```
extract name="iv" curve(v."anode", i."cathode"*1e08*1e03) outfile="InGaP_GaAs.dat"  
tonyplot InGaP_GaAs.dat  
tonyplot InGaP_GaAs.log
```

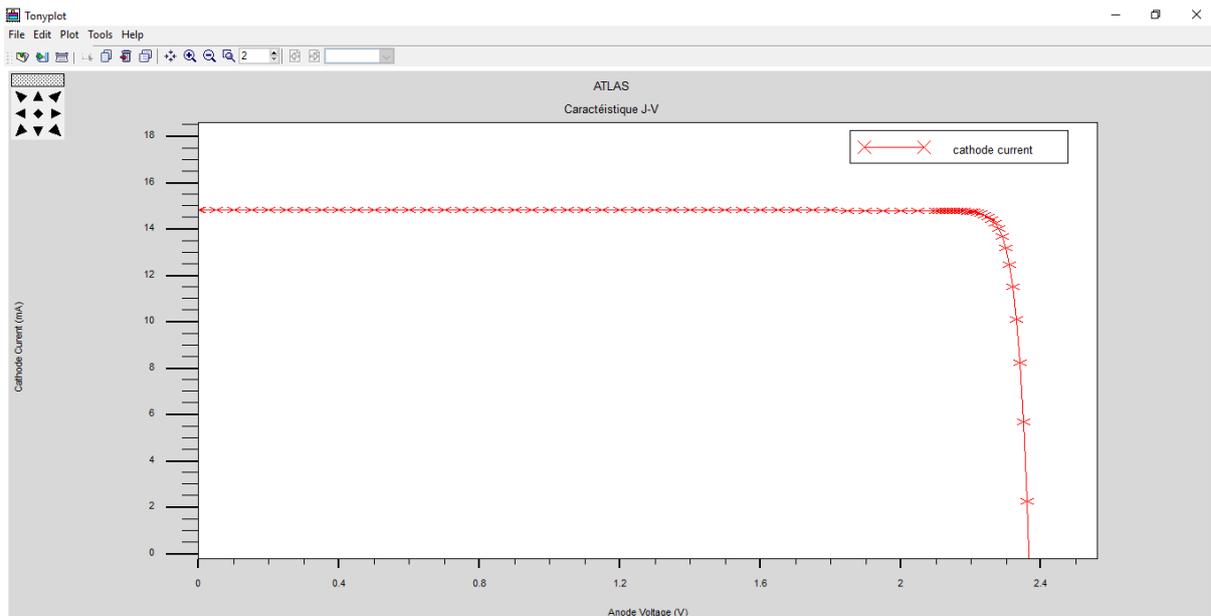


Figure (III.7) : Caractéristique IV

III.9. Organigramme de simulation

En vue d'intensifier la compréhension, à contribuer à développer davantage de part et d'autre et pour éviter toutes répétitions et confusion inutiles, l'organigramme de la Figure (III.8) permet de présenter le programme de simulation d'une cellule solaire qui contient des sections principales structurées.

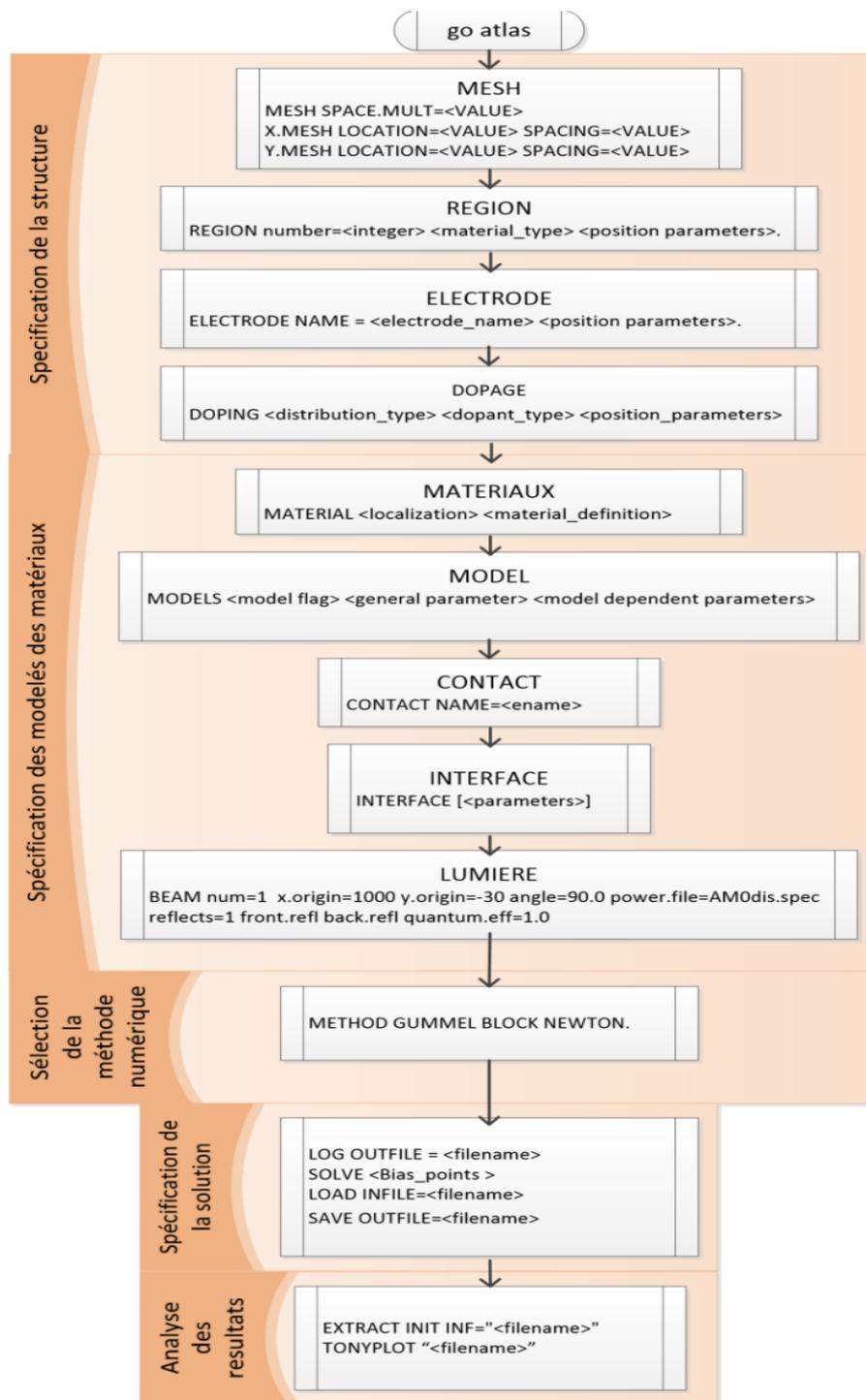


Figure (III.8) : Organigramme des étapes de construction d'un modèle sur ATLAS.

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la présentation du logiciel de simulation des caractéristiques électriques «Atlas» de la société SILVACO, que nous allons utiliser principalement pour modéliser et optimiser la cellule solaire tendem InGaP/GaAs.

Un organigramme contenant les principales sections structurées du programme de simulation d'une cellule solaire est donné en fin de ce chapitre.

Références du chapitre III

- [III.1] D. Bradley P, Advanced ThermoPhotovoltaic Cells Modeling, Optimized for Use in Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGS) for Mars and Deep Space Missions”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2004.
- [III.2] ATLAS User’s Manuel, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2011.
- [III.3] B.Garcia, Jr, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas” , Thesis Naval postgraduateschool Monterey California. 2007.
- [III.4] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [III.5] TonyPlot User’s Manual, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2012.
- [III.6] DeckBuild User’s Manual, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2013.
- [III.7] D. Vasileska, G. Stephen M, Computational Electronics”, Department of Electrical Engineering, Arizona State University. 2006.
- [III.8] S. MOSTEFA K, Etude et Simulation de Cellules Photovoltaïques a Couches Minces à Base de CIS et CIGS”, Mémoire magistère, Université Abou Bakr Belkid- Tlemcen. 2012.
- [III.9] J. Lavery, Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.
- [III.10] D. Wassila Née KAZI-TANI, Modelisation des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux et Appliqués”, Thèse Doctorat, Université Abou Bakr Belkid- Tlemcen. 2011.
- [III.11] G, Adam. R, modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.

[III.12] P. Michalopoulos, A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2002.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons la structure à hétérojonction, la modélisation, et les résultats de simulations de la cellule solaire (photovoltaïque) proposée dans le cadre ce projet du programme de Maitrise. Cette cellule est basée sur des matériaux semi-conducteurs composés, l'InGaP et le GaAs, présentant des propriétés intéressantes pour le domaine des cellules solaires. Ce sont des semi-conducteurs directs et dont l'énergie de la bande interdite (énergie de gap) peut être ajustée pour des besoins spécifiques tel que l'amélioration du rendement de la cellule photovoltaïque.

La modélisation et la simulation de la cellule solaire ont été effectuées en utilisant l'outil simulation physique Atlas de l'outil TCAD Silvaco. L'optimisation des paramètres de performances de la cellule est obtenue en faisant varier les différents paramètres (dimensions, positions et dopages) de l'hétéro-structure composant la cellule pour atteindre les meilleurs résultats possibles. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux et graphes avec des interprétations.

IV.2. Choix de la structure InGaP/ GaAs

Sous un spectre solaire AM1.5, le choix des matériaux semi-conducteurs utilisés joue un rôle très important pour l'obtention des rendements élevés. Ce choix dépend principalement de l'énergie de la bande interdite (gap). L'énergie de gap optimale des cellules solaires à mono jonction donnant de bon rendement ne dépasse pas 1.4 eV comme le GaAs. La société américaine Alta Devices atteint un rendement de 28.8% pour une cellule mono jonction GaAs. Dans le présent travail, l'empilement d'une autre jonction, InGaP, permet l'augmentation du rendement de la cellule solaire. Les jonctions utilisées en tandem doivent posséder des gaps descendants (1.75 à 1.8 eV pour la cellule supérieure et 1.1eV pour la cellule inférieure). Le rendement est amélioré à plus de 30% en utilisant une cellule à double jonction à base de matériau InGaP/GaAs sans concentration. L'utilisation des hétérojonctions permet l'absorption d'une grande partie de spectre ce qui mène à l'augmentation de l'intensité du courant généré par la cellule.

IV.3. Structure de la cellule et méthode d'optimisation

Les matériaux utilisés pour la cellule solaire proposée dans ce travail sont des semi-conducteurs composés directs. La cellule est une structure à hétérojonction d'InGaP et de GaAs. Elle constituée de deux cellules : une cellule supérieure dite « top » et une cellule inférieure dite « bottom ». Les deux cellules sont interconnectées par une jonction tunnel InGaP/InGaP.

Les paramètres technologiques et géométriques utilisés pour optimiser les performances de la cellule sont ceux des jonctions d'InGaP et de GaAs, et plus précisément, les émetteurs et les bases de ces deux jonctions. Les paramètres utilisés sont : l'épaisseur, BSF, Fenêtre.

La méthode adoptée pour arriver à une solution optimisée consiste à faire fixer l'un des paramètres et faire varier les autres sur une plage de valeurs jusqu'à l'obtention du rendement optimale. Les résultats de simulation nous a permis d'obtenir une structure à multi jonctions qui donne un rendement optimale à une température 300K. Les tableaux ci-après montrent les meilleurs résultats de chaque essai.

Les paramètres de la cellule optimisée sont illustrés dans la figure suivante :

Anode				
0.030 μm	Fenêtre	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	$\text{P}=2\text{e}18\text{cm}^{-3}$	} La cellule InGaP (top) avec double couche BSF
0.050 μm	Emetteur	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$\text{P}=2\text{e}18\text{cm}^{-3}$	
0.550 μm	Base	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$n=7\text{e}16\text{cm}^{-3}$	
0.050 μm	BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	$n=2\text{e}17\text{cm}^{-3}$	
0.030 μm	BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	$n=2\text{e}18\text{cm}^{-3}$	
0.025 μm	Diode tunnel	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$n=5\text{e}19\text{cm}^{-3}$	} Diode Tunnel
0.025 μm	Diode tunnel	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$\text{P}=3\text{e}19\text{cm}^{-3}$	
0.050 μm	Fenêtre	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$\text{P}=3\text{e}18\text{cm}^{-3}$	} La cellule GaAs (Bottom)
0.500 μm	Emetteur	GaAs	$\text{P}=2\text{e}18\text{cm}^{-3}$	
2.000 μm	Base	GaAs	$n=2\text{e}17\text{cm}^{-3}$	
0.500 μm	BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	$n=5\text{e}18\text{cm}^{-3}$	
0.200 μm	Substrat	GaAs	$n=1\text{e}18\text{cm}^{-3}$	
Cathode				

Figure IV.1: Schéma de la cellule monolithique Tandem GaInP / GaAs avec ses paramètres technologiques.

IV.5. Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation des matériaux InGaP et GaAs utilisées dans notre travail est défini dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Paramètres majeurs pour le réseau ternaire $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ et quaternaire $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$ correspondant aux matériaux GaAs utilisés dans cette conception [1].

Material	GaAs	InGaP	InAlGaP
Band gap E_g (eV) @300 K	1.42	1.9	2.3
Lattice constant a (Å)	5.65	5.65	5.65
Permittivity (ϵ_s/ϵ_0)	13.1	11.6	11.7
Affinity (eV)	4.07	4.16	4.2
Heavy e ⁻ effective mass (m_e^*/m_0)	0.063	3	2.85
Heavy h ⁺ effective mass (m_h^*/m_0)	0.5	0.64	0.64
e ⁻ mobility μ_{n} ($\text{cm}^2/\text{V} \times \text{s}$)	8800	1945	2150
h ⁺ mobility μ_{p} ($\text{cm}^2/\text{V} \times \text{s}$)	400	141	141
e ⁻ density of states N_C (cm^{-3})	4.7e+17	1.30e+20	1.20e+20
h ⁺ density of states N_V (cm^{-3})	7.0e+18	1.28e+19	1.28e+19
Lifetime (el) (s)	1.00e-09	1.00e-09	1.00e-09
Lifetime (ho) (s)	2.00e-08	1.00e-09	1.00e-09
n_i (per cc)	2.12e+06	7.43e+04	1
V_{satn} (cm/s)	7.70e+06	1.00e+06	1.00e+06
V_{satp} (cm/s)	7.70e+06	1.00e+06	1.00e+06

IV.6. Circuit équivalent de la cellule simulé InGaP/GaAs

La cellule solaire à hétérojonction est composée de deux (multi jonction) diodes (jonction p-n) connectées entre eux par des jonctions p-n polarisée en inverse (jonction tunnel). Chaque jonction possède une énergie de gap inférieur de la jonction supérieur.

Pour une cellule de jonction p-n (épitaxie d'un matériau de type n sur un matériau de type P, la jonction tunnel est fait de matériau de type P sur un matériau de type n. Le dopage excessif de la jonction tunnel permet le déplacement des porteurs libres de la région p vers la région P⁺ et de la région n⁺ vers la région n. Il faut ajouter des électrodes à chaque jonction tunnel. L'anode est en or et sur haut de la cellule (à une surface qui ne dépasse pas de 8%). Alors que la cathode couvre la surface inférieure de la cellule [2].

La figure (IV.2) montre le circuit équivalent d'une cellule solaire à double jonctions (InGaP/GaAs) avec une jonction tunnel. La structure et maillage de cette cellule sous Tcad Silvaco sont donnés dans les figures (IV.3) et (IV.4) respectivement.

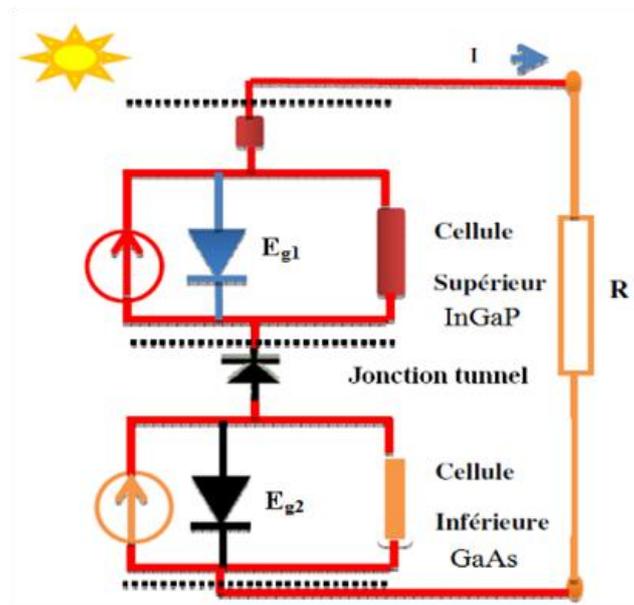


Figure IV.2 : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction (InGaP/GaAs).

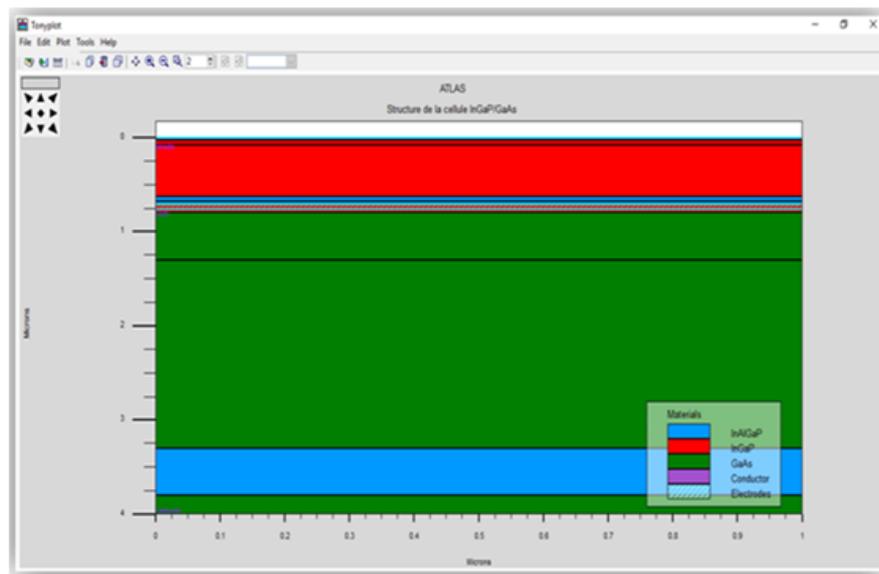


Figure IV.3 : Structure de la cellule InGaP/GaAs sous Tcad Silvaco.

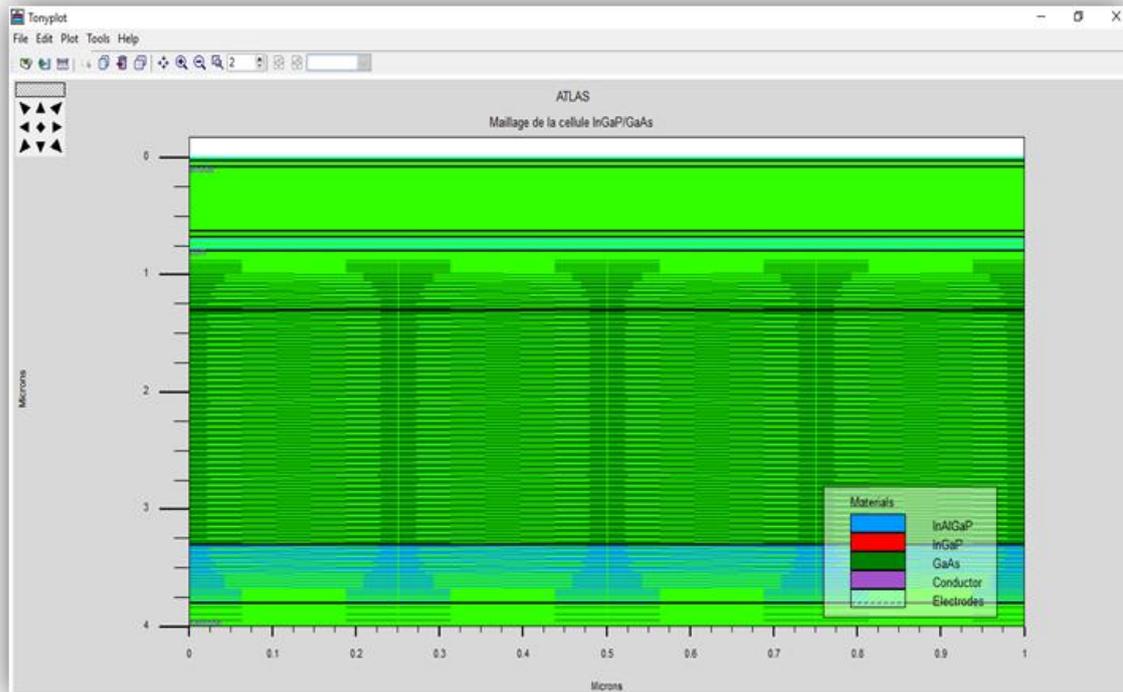


Figure IV.4 : Maillage de la cellule InGaP/GaAs

IV.7. Le spectre solaire

La cellule InGaP/GaAs optimisée est illuminée par un spectre solaire AM1.5 (figure (IV.5)), dont l'énergie est de $1000\text{W}/\text{cm}^2$, afin de simuler la caractéristique courant/tension (I-V) et par conséquent et de évaluer le rendement de la cellule.

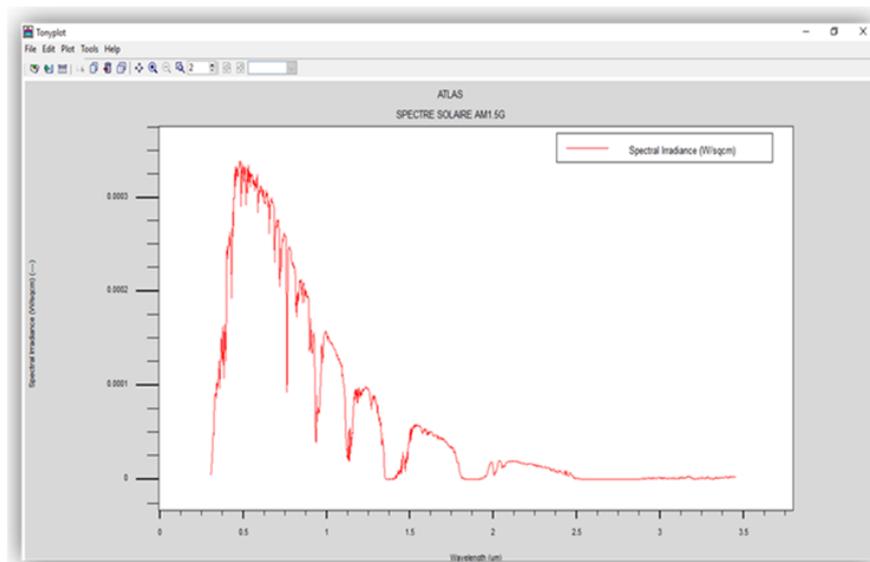


Figure IV.5 : Spectre solaire AM1.5G.

IV.8. Simulation de la cellule InGaP/GaAs

IV.8.1 Simulation de la cellule GaAs

La Figure (IV.6) schématise la structure de la cellule étudiée à base de GaAs ; la couche (InGaP) est utilisée comme une fenêtre optique placée en haut de la cellule, suivie par deux couches de (GaAs) qui servent comme un émetteur (type p) et une base (type n) et une couche de (InAlGaP) comme BSF (type n). Les paramètres des différentes couches sont présentés dans le Tableau (IV.1).

Fenêtre	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	P-type
Emetteur	GaAs	P-type
Base	GaAs	n-type
BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	n-type

Figure IV.6 : Structure de la cellule solaire GaAs.

IV. 8.1.1. Résultats et discussions

La figure IV.7 et le tableau (IV.2) présentent le schéma de la cellule modélisée dans environnement d'Atlas et les résultats de simulation obtenus. Le rendement de la cellule est de 27.28 %.

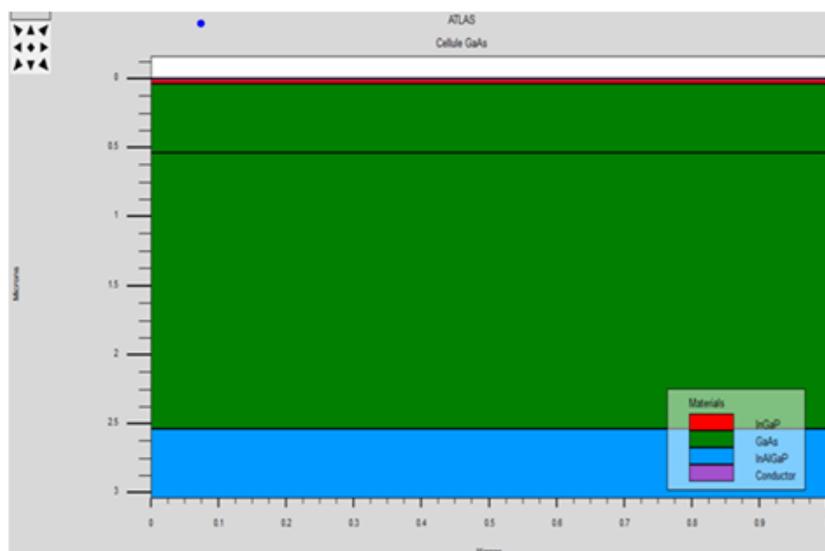


Figure IV.7 : Structure de la cellule solaire GaAs simulée.

Tableau IV.2 : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (InGaP) simulés sous éclairement AM1.5G.

	V_{co} (v)	J_{cc} (mA/cm ²)	P_m (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
Résultats	1.05	29.57	27.29	87.82	27.28

La caractéristique de la densité de courant-tension (J-V) de la cellule est obtenue en simulant la cellule sous l'environnement d'Aalas sous un éclairement AM1.5G. A partir de cette caractéristique, il ressort que la valeur de la tension V_{CO} est de 1.05 V, tandis que la valeur du courant J_{cc} est 29.57 mA/cm². La faible valeur de la tension V_{CO} dans cette cellule est due essentiellement à la faible énergie de gap de l'absorbeur GaAs (1.42 eV) par rapport à la grande énergie de gap de l'absorbeur InGaP (1.9 eV).

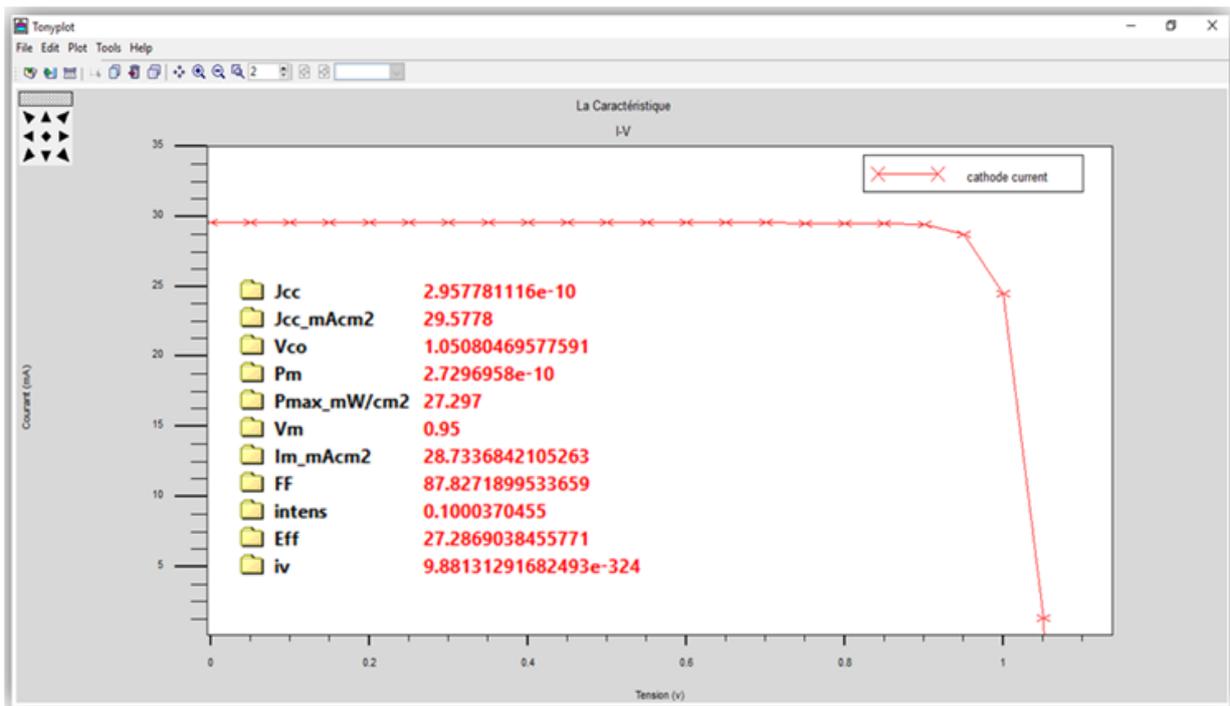


Figure IV.8 : Caractéristique I-V de la cellule solaire

IV.8.2. Simulation de la cellule solaire à base InGaP

La Figure (IV.9) schématise la structure de la cellule étudiée à base de InGaP ; la couche (InAlGaP) est utilisée comme une fenêtre optique placée en haut de la cellule, suivie par deux couches de (InGaP) qui servent comme un émetteur (type p) et une base (type n) et une

double couche de BSF (InAlGaP) pour minimiser la diffusion dans une large mesure. Les doubles couches BSF sont de type n-n+. Les paramètres physiques et géométriques utilisés dans la simulation sont donnés au Tableau (IV.1).

Fenêtre	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	P-type
Emetteur	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	P-type
Base	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	n-type
BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	n-type
BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$	n ⁺ -type

Figure IV.9 : Couches de cellules supérieures détaillées.

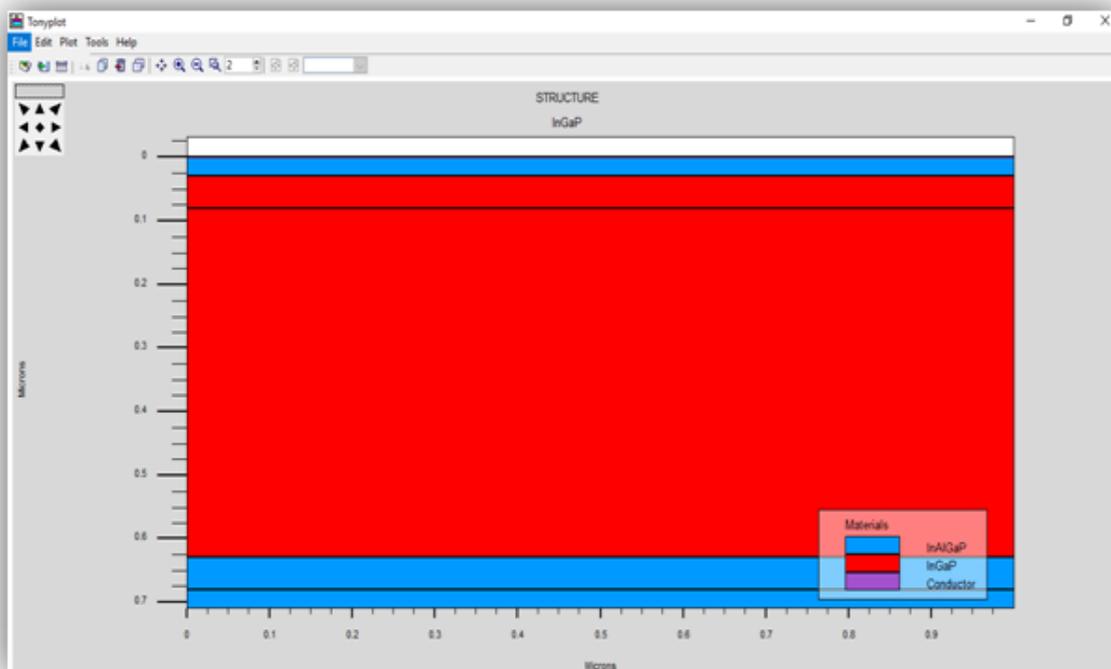


Figure IV.10 : Structure de la cellule solaire à base de InGaP.

IV.8.2.1. Résultats et discussions

Les résultats de la simulation de la cellule solaire à base de (InGaP) sont présentés dans le Tableau (IV.3).

Tableau IV.3 : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à base (InGaP) simulés sous éclairement AM1.5G.

	V_{co} (v)	J_{cc} (mA/cm ²)	Pm (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
Résultats	1.23	16.85	17.18	82.40	17.18

La Figure (IV.11) présente la caractéristique de la densité de courant-tension (J-V) de la cellule (InGaP) sous un éclairement AM1.5G pour. On peut y constater une forte augmentation de la tension V_{CO} (1.23 V) et une diminution du courant J_{CC} (16.85 mA/cm²). Ceci est dû principalement à la valeur élevée de l'énergie de gap de l'absorbeur InGaP (1.9 eV). Comme conséquence, le rendement de la cellule est gravement affecté, il passe de 17.18% à 27.28%. La détérioration du rendement est probablement due à la diminution de la gamme d'absorption du spectre solaire de la cellule InGaP à cause de son grand gap.

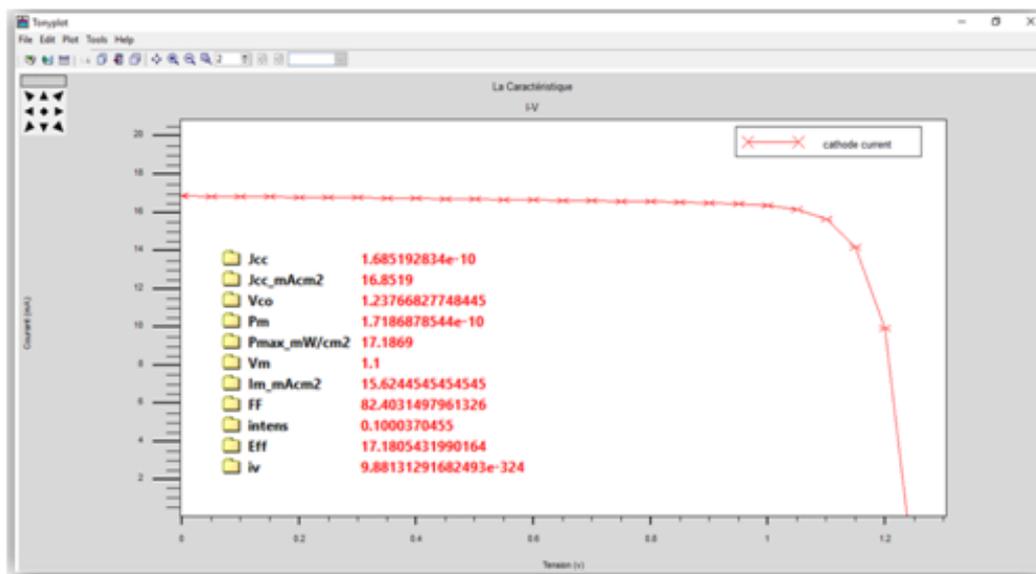


Figure IV.11 : Résultat de simulation Silvaco de caractéristique J-V de la cellule solaire.

IV.8.3. Cellule solaire à double jonctions : Structure Tandem (InGaP/GaAs)

IV.8.3.1. Présentation de la structure

La figure (IV.12) schématise la structure de cellule solaire Tandem à base de (InGaP/GaAs) étudiée en mettant la cellule (InGaP) au-dessus de la cellule (GaAs). Les résultats de simulation correspondants sont présentés dans le tableau (IV.4).

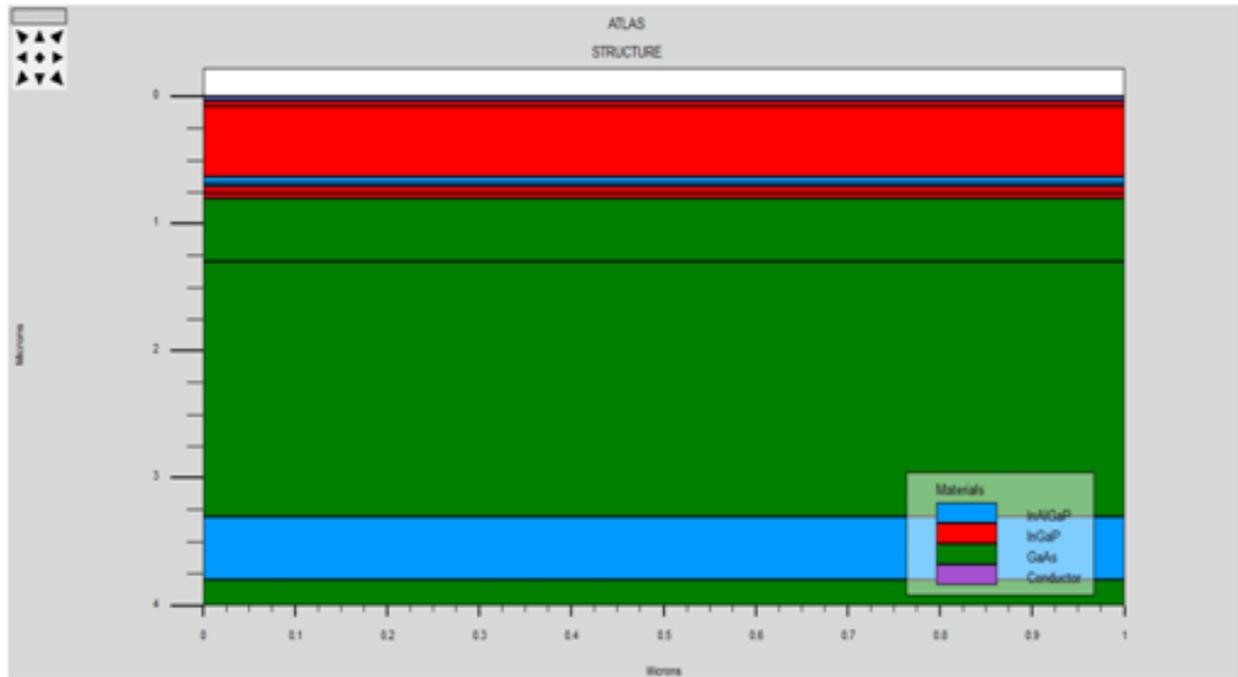


Figure IV.12 : Structure de la cellule solaire à double jonctions InGaP/GaAs.

Tableau (IV.4) : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire Tandem (InGaP/GaAs) simulée sous éclairement AM1.5G.

	<u>V_{co}</u> (v)	<u>J_{cc}</u> (mA/cm ²)	<u>P_m</u> (mw/cm ²)	<u>FF</u> (%)	<u>η</u> (%)
Résultats	2.28	14.86	30.16	88.85	30.15

La Figure (IV.13) présente la caractéristique densité de courant-tension (J-V) sous l'éclairement AM1.5G pour la cellule Tandem (InGaP/GaAs). Une importante augmentation de la tension V_{CO} (2.28 V) conduit à une amélioration du rendement de conversion (30.15%).

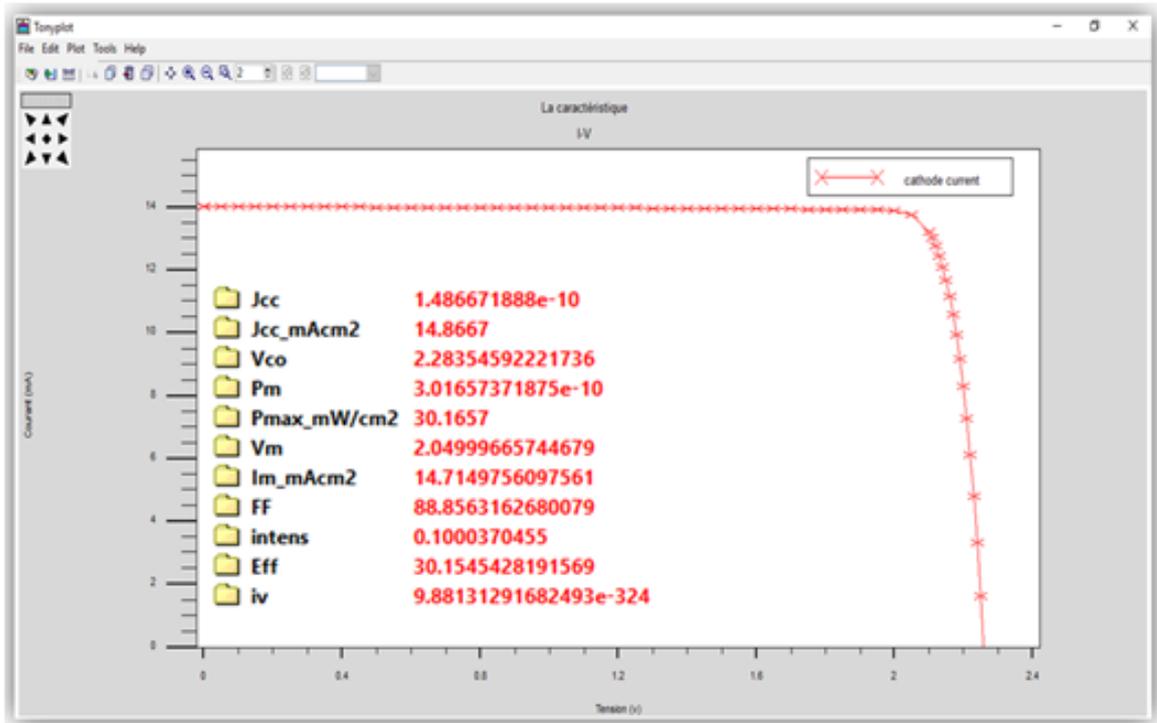


Figure IV.13 : Caractéristique (J-V) de la cellule InGaP/GaAs.

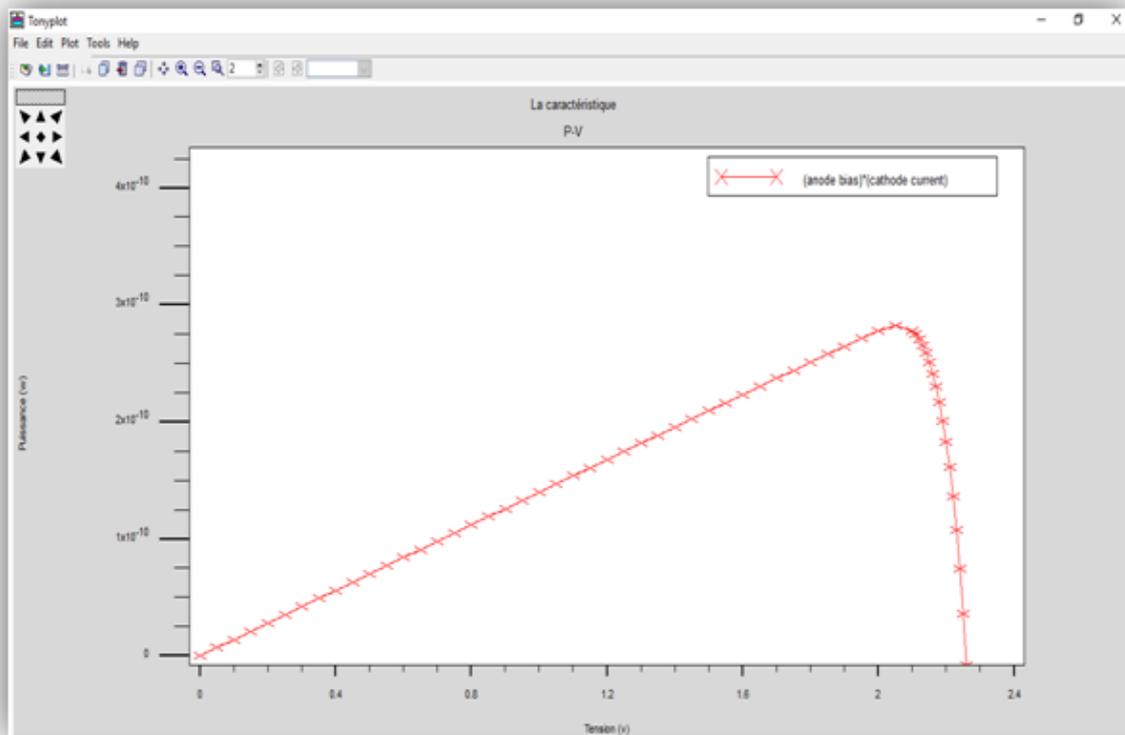


Figure IV.14 : Courbe de puissance P(v).

IV.9. L'effet de la jonction tunnel

La jonction tunnel est utilisée entre les deux cellules InGaP/GaAs pour assurer une connexion d'une faible résistance entre le BSF (type n) de la cellule InGaP et la fenêtre (type p) de la cellule GaAs. Une concentration élevée de dopage est utilisée pour compenser les donneurs et accepteurs dans la jonction et, par conséquent, faire augmenter la largeur de la zone de déplétion et réduire le courant tunnel.

Les résultats de la simulation de cette cellule solaire sans la jonction tunnel sont présentés dans le tableau (IV.5). On remarque qu'il y'a une nette diminution du rendement de la cellule, il passe 30.15 % à 13.4. Ceci indique que la jonction tunnel a un grand le rendement de la cellule. Dans la figure IV.16 on schématise la caractéristique courant-tension ($J-V$) de la cellule solaire InGaP/GaAs sans la jonction tunnel.

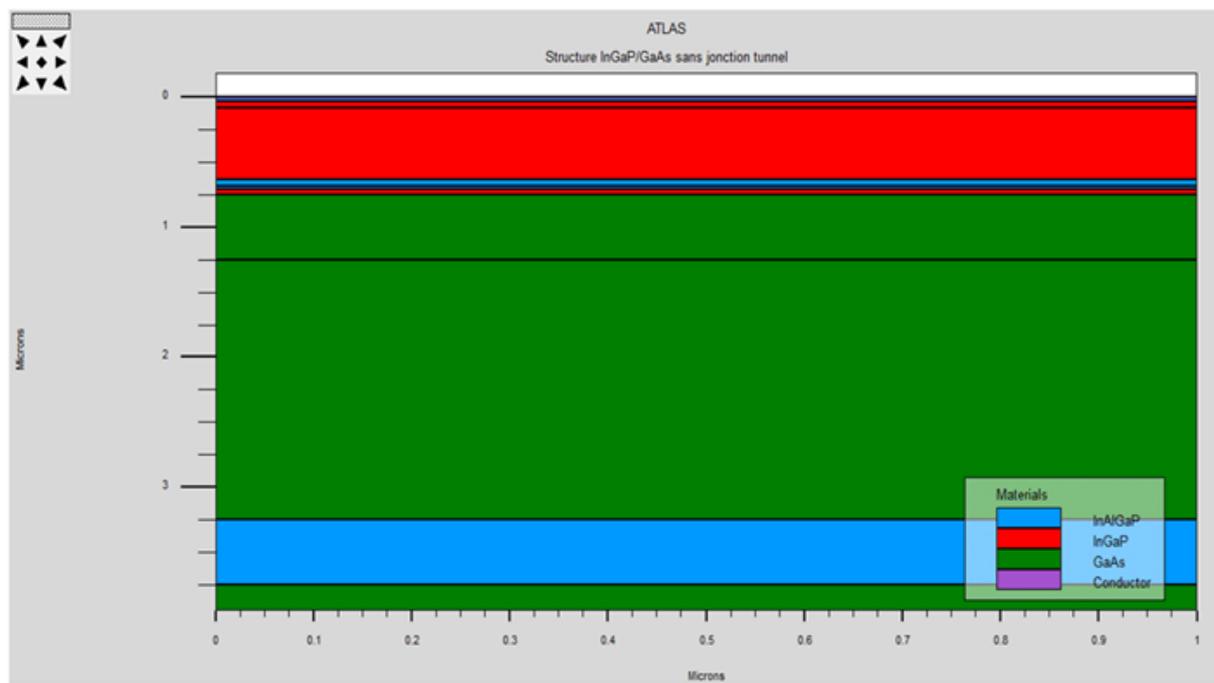


Figure IV.15 : Cellule solaire (InGaP/GaAs) sans la jonction tunnel.

Tableau (IV.5) : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire (InGaP/GaAs) sans jonction tunnel simulée sous éclairage AM1.5G.

	V_{co} (v)	J_{cc} (mA/cm ²)	P_m (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
Résultats	1.11	16.39	13.82	75.68	13.81

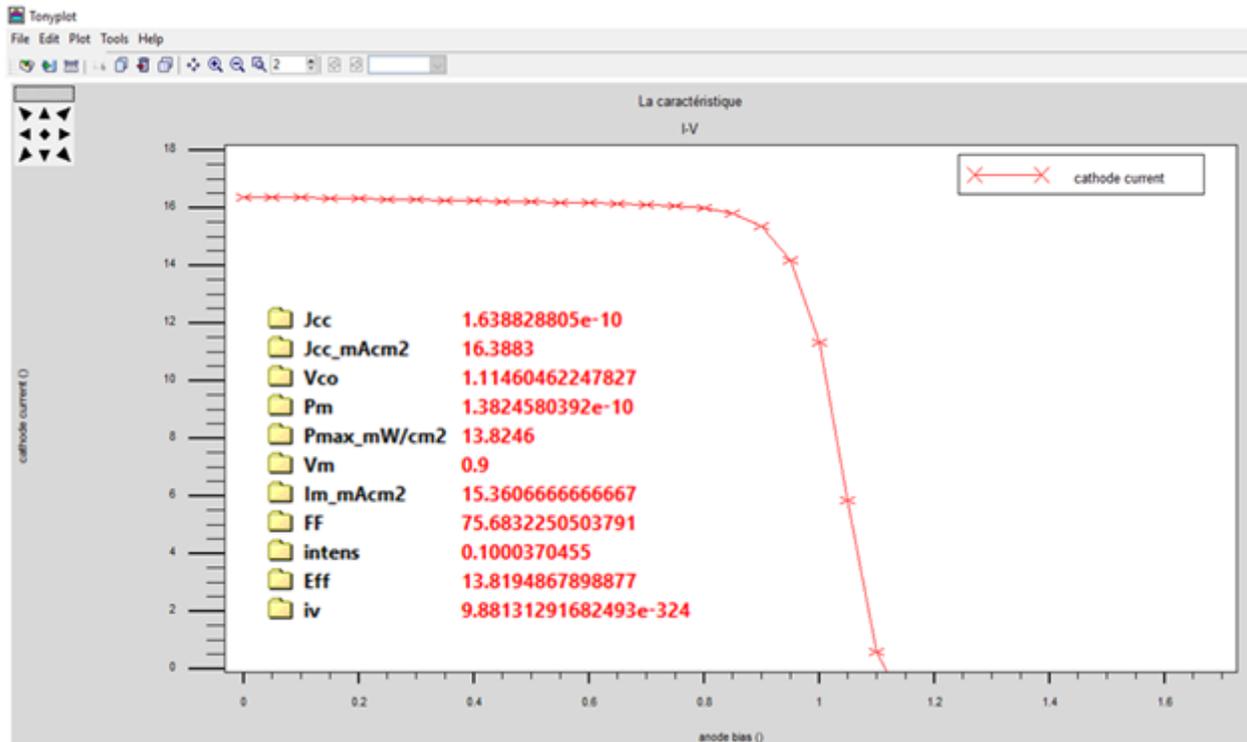


Figure IV.16 : Caractéristique J-V de la cellule solaire InGaP/GaAs sans la jonction tunnel.

IV.10. Comparaison entre les différentes jonctions tunnels

Les jonctions tunnel les plus utilisés dans les cellules à multi couches sont les jonctions tunnel à base des matériaux GaAs/GaAs, InGaP/GaAs et InGaP/InGaP. Le rendement optimal pour la cellule solaire InGaP/GaAs est obtenu en simulant la cellule pour différents types de jonction tunnel et en tenant compte de la concentration de chaque couche.

Les différents résultats de simulation sont indiqués dans des tableaux et des figures. La jonction tunnel est non linéaire dans le sens que le courant de la cellule dépend de la tension et de la température. La jonction tunnel de type InGaP/InGaP ne présente pas une résistance négative alors que celle de type GaAs/GaAs possède une résistance négative. Ceci implique que le mouvement des porteurs est plus rapide dans la jonction de type InGaP.

IV.10.1. Effet de la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel

La cellule solaire InGaP/GaAs simulée dans ce travail avec une jonction tunnel de type InGaP/InGaP. La caractéristique I-V est obtenue uniquement pour une variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de 0.008 à 0.050 μm . Les tableaux IV-6a, IV-6b et IV-7 montrent les variations du rendement (η), du facteur de forme (FF), du courant de court-circuit (J_{cc}) et de la tension de circuit ouvert (V_{co}).

➤ Jonction tunnel InGaP/InGaP

Les résultats de simulation Atlas de la cellule solaire correspondant à la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP/InGaP sont reportés dans le tableau (IV.6-a). Le maximum du rendement, 30.21%, est obtenu pour une épaisseur de 0.008 μm . Le rendement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la jonction tunnel. A noter que la simulation ne converge pour des épaisseurs dépassant 0.05 μm .

Tableau (IV.6-a) : Résultats de simulation Atlas du rendement de la cellule solaire correspondant à la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP/InGaP.

Type de jonction (InGaP/InGaP)				
Epaisseur (μm)	η (%)	FF (%)	Voc(V)	Jcc (mA)
0.008/0.008	30.21	88.85	2.28	14.89
0.010/0.010	30.21	88.84	2.28	14.89
0.015/0.015	30.20	88.84	2.28	14.89
0.017/0.017	30.19	88.84	2.28	14.88
0.019/0.019	30.18	88.84	2.28	14.88
0.023/0.023	30.16	88.85	2.28	14.87
0.025/0.025	30.15	88.85	2.28	14.86
0.050/0.050	30.09	88.87	2.28	

Tableau (IV.6-b) : Résultats de simulation Atlas du facteur de forme de la cellule solaire correspondant à la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP/InGaP.

Type de jonction (InGaP/InGaP)				
Epaisseur (μm)	Jcc (mA/cm^2)	Voc (v)	FF (%)	η (%)
0.008/0.010	14.90	2.28	88.84	30.21
0.008/0.015	14.89	2.28	88.83	30.21
0.008/0.020	14.89	2.28	88.83	30.20
0.008/0.025	14.88	2.28	88.84	30.19
0.008/0.030	14.88	2.28	88.84	30.18
0.008/0.040	14.86	2.28	88.85	30.15
0.008/0.050	14.88	2.28	88.84	30.18

➤ **Jonction tunnel GaAs/GaAs**

Les résultats de simulation Atlas de la cellule solaire correspondant à la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs/GaAs sont reportés dans le tableau (IV.6-b). Le maximum du rendement, 28.81%, est obtenu pour une épaisseur de 0.008 μm . Similairement au cas précédent, le rendement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la jonction tunnel.

Tableau (IV.7) : Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs/GaAs

Type de jonction (GaAs/GaAs)				
Epaisseur (μm)	Rendement η (%)	FF (%)	Voc(V)	Jcc (mA)
0.008/0.008	28.81	90.12	2.28	14.01
0.010/0.010	28.79	90.12	2.28	14.00
0.015/0.015	28.79	90.11	2.28	13.99
0.017/0.017	28.77	90.11	2.28	13.99
0.019/0.019	28.74	90.13	2.28	13.97
0.023/0.023	28.74	90.13	2.28	13.97
0.025/0.025	28.72	90.14	2.28	13.96
0.050/0.050	26.47	90.76	2.28	12.79

IV.11. Effet de la couche fenêtre sur le rendement de la cellule

Le choix de la couche fenêtre mince et fortement dopée ($2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$) «InAlGaP » est choisi en prenant en considération certains critères: énergie de gap supérieure à celle de l'émetteur InGaP et une faible vitesse de recombinaison de surface.

Dans un premier temps, la cellule solaire InGaP/GaAs est simulée sans la couche fenêtre et la caractéristique I-V obtenue est illustré dans la figure (IV-17-18). Les valeurs du courant de court circuit(J_{SC}), de la tension de circuit ouvert (V_{OC}), le facteur de forme (FF), et le rendement (η) sont respectivement : $J_{CC}= 14.65\text{mA}$, $V_{OC}= 1.09\text{V}$, $FF= 70.53\%$, et $\eta=11.35\%$.

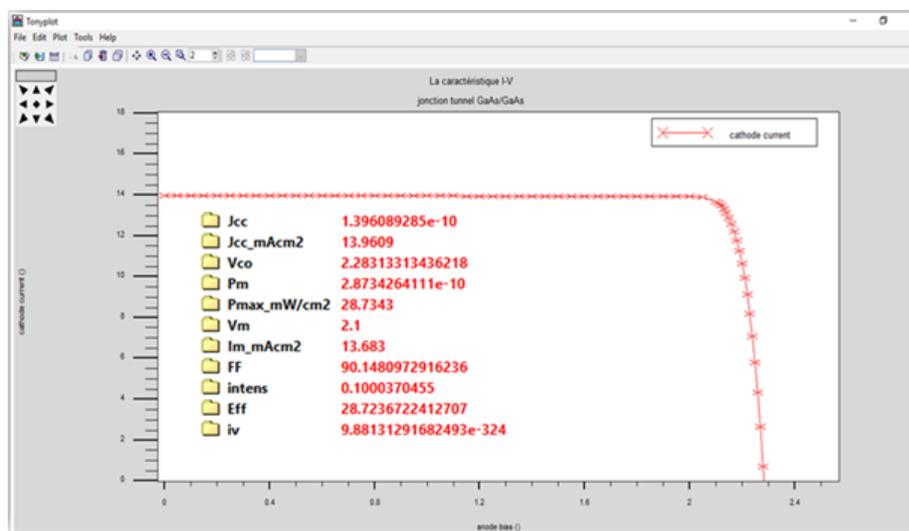


Figure IV.17 : Caractéristique (J-V) de la cellule GaAs/GaAs.

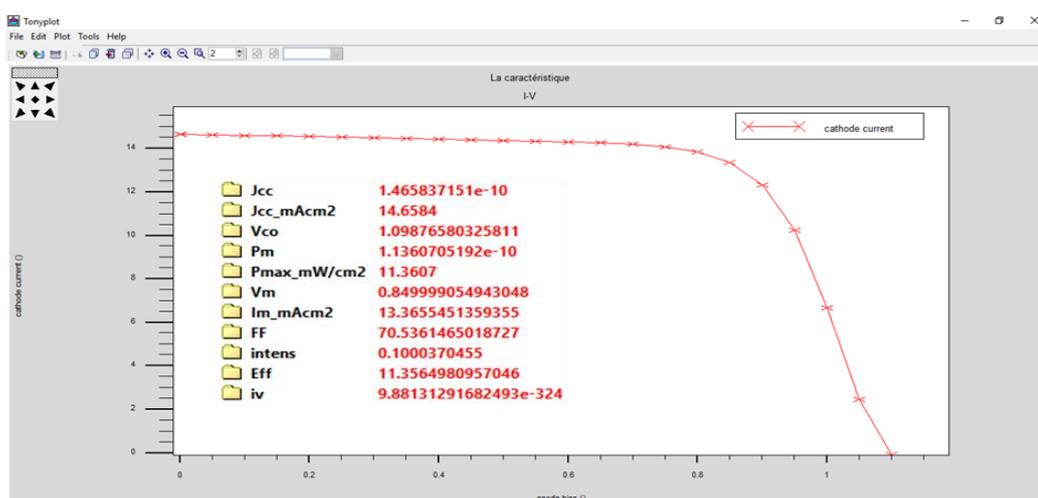


Figure IV.18 : Caractéristique J-V de la cellule InGaP/GaAs sans la couche fenêtre.

Dans un deuxième temps, la cellule InGaP/GaAs est simulée en introduisant la couche fenêtre InAlGaP (figure IV.19). On remarque une amélioration dans les caractéristiques I-V de la cellule : courant du court-circuit ($J_{CC}=14.86 \text{ mA/cm}^2$), tension de circuit ouvert ($V_{OC}=2.28 \text{ V}$), facteur de forme ($FF=88.85\%$) et le rendement ($\eta=30.15\%$).

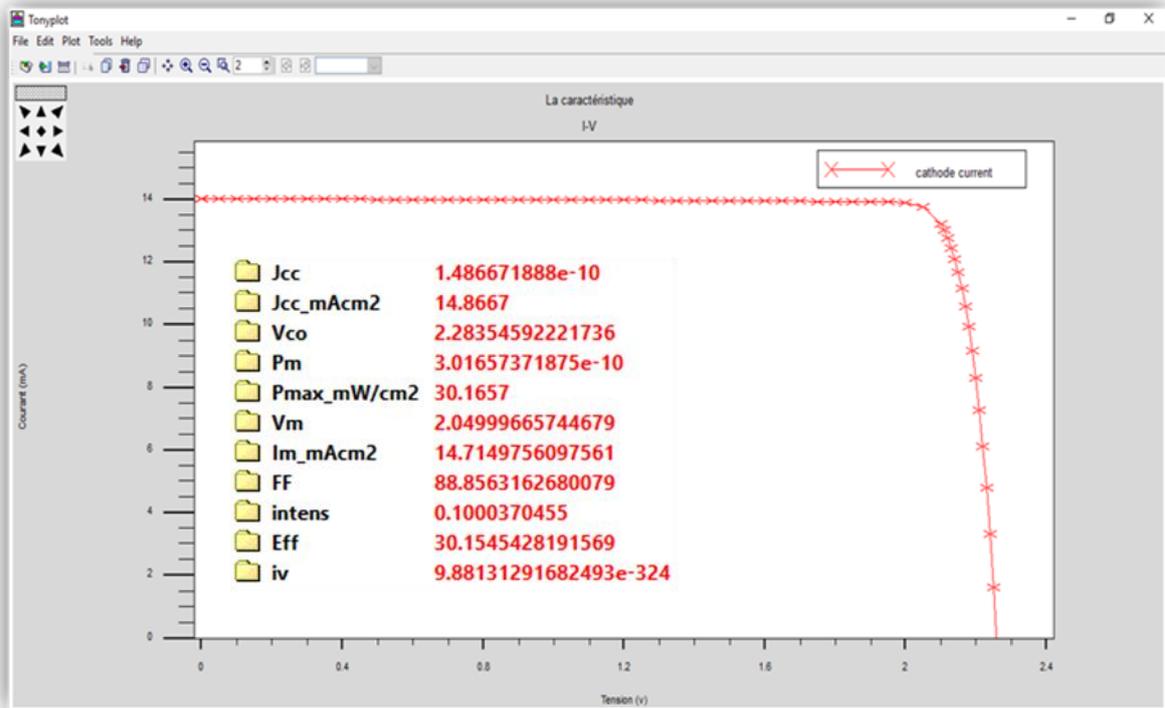


Figure IV.19 : Caractéristique J-V de la cellule solaire InGaP/GaAs avec la couche fenêtre.

A partir de ces résultats, on conclue que la couche fenêtre permet aux électrons de circuler vers les contacts électriques, sans affecter les résistances des cellules en série, ce qui augmente le rendement de la cellule. La couche fenêtre évite la recombinaison en surface et résout le problème du désaccord de maille.

IV.12. Effet du champ de la surface arrière (BSF)

Pour pouvoir déterminer l'effet de la couche BSF sur le rendement de la cellule solaire en tandem InGaP/GaAs, la cellule est simulé tout d'abord sans la couche BSF de la cellule InGaP. Le matériau utilisé pour la couche BSF de la cellule InGaP est deux couches InAlGaP avec une concentration de dopage $2.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et celui utilisé pour la cellule GaAs est l'InAlGaP avec une concentration de dopage $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Les caractéristiques I-V obtenue est illustrée dans la figures ci après

➤ Une seule couche BSF de la cellule InGaP

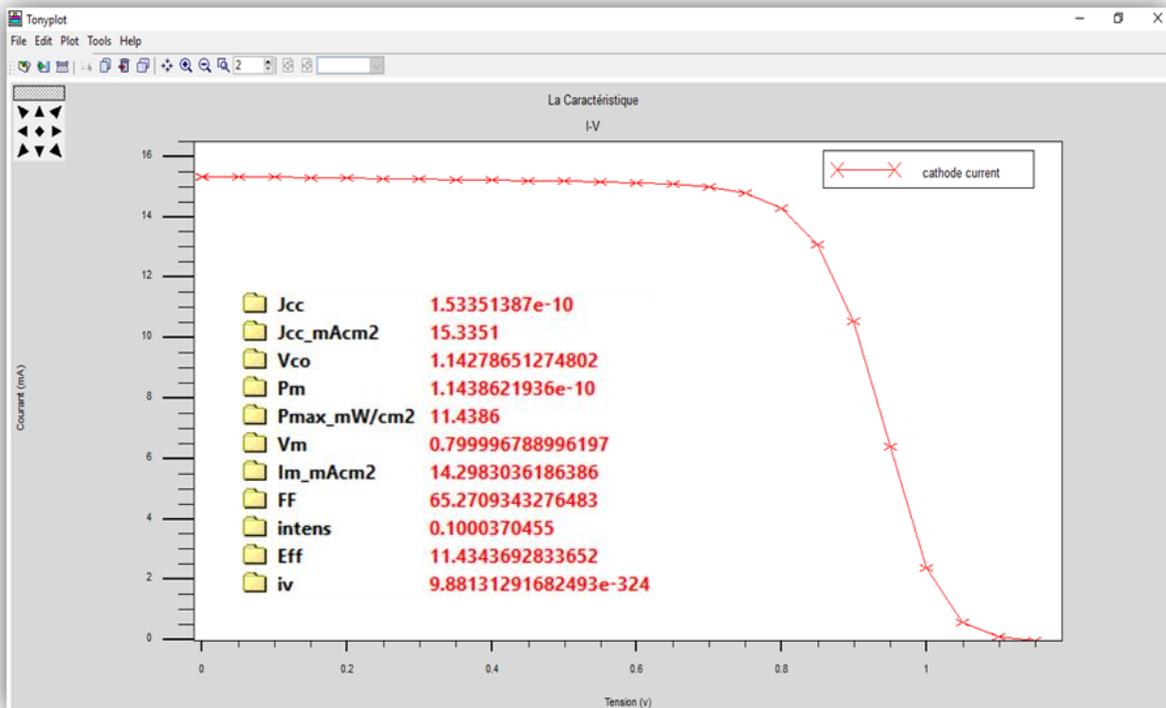


Figure IV-20 : Caractéristique J-V avec une seule couche BSF de la cellule InGaP.

De ces résultats, il on remarque que la couche BSF de la cellule solaire InGaP (Top) a un effet très important sur la tension de la cellule InGaP/GaAs. En fait, la minimisation des recombinaisons à la surface arrière induite par la couche BSF permet l'amélioration de la tension de la tension de la cellule.

IV.13. Variation des niveaux de dopage

IV.13.1. Concentration de dopage des bases

En prenant l'épaisseur pour lequel le rendement est optimal, les niveaux de dopage des bases des deux cellules (supérieure et inférieure) pour une température $T=300K$ sont variés pour évaluer leurs effets sur les performances de la cellule solaire. Dans une première étape, et le niveau de dopage de la base InGaP est varié tout en maintenant le niveau de dopage de la base GaAs à une valeur constante ($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

Tableau IV-8 : Résultats de variation de concentrations de dopage de base InGaP.

Dopage de base (cm ⁻³)	<u>J_{cc}</u> (mA/cm ²)	<u>V_{oc}</u> (v)	FF (%)	η (%)
InGaP				
1×10 ¹⁴	14.86	2.18	89.72	29.08
1×10 ¹⁵	14.86	2.18	89.72	29.13
3×10 ¹⁵	14.86	2.20	89.64	29.31
5×10 ¹⁵	14.86	2.21	89.44	29.42
7×10 ¹⁵	14.86	2.22	89.23	29.46
1×10 ¹⁶	14.86	2.23	89.42	29.65
3×10 ¹⁶	14.86	2.26	89.31	30.01
5×10 ¹⁶	14.86	2.27	89.06	30.10
7×10 ¹⁶	14.86	2.28	88.85	30.15

Pour un dopage de la base InGaP de $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, le niveau de dopage de la base GaAs est varié comme la montre le tableau suivant :

Tableau IV-9 : Résultats de variation de concentrations de dopage de base GaAs.

Dopage de base (cm ⁻³)	<u>J_{cc}</u> (mA/cm ²)	<u>V_{oc}</u> (v)	FF (%)	η (%)
GaAs				
1×10 ¹⁴	18.07	1.96	84.05	29.77
1×10 ¹⁵	18.07	2.01	84.27	30.68
4×10 ¹⁵	18.07	2.05	84.32	31.29
1×10 ¹⁶	18.08	2.08	83.79	31.53
4×10 ¹⁶	17.69	2.12	85.92	31.24
6×10 ¹⁶	16.86	2.14	86.05	31.18
9×10 ¹⁶	16.05	2.16	88.48	30.71
2×10 ¹⁷	14.86	2.28	88.85	30.15

IV.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'optimiser le rendement de la cellule solaire de type InGaP/GaAs. Nous avons varié les paramètres un par un en fixant les autres.

Nous avons présenté une simulation de la cellule solaire en tandem InGaP/GaAs en variant plusieurs paramètres pour voir leurs effets sur la performance de la cellule. Ces paramètres sont :

- Le type de matériau utilisé pour la jonction tunnel ;
- L'épaisseur de la jonction tunnel ;
- L'effet de la couche fenêtre ;
- L'effet de la couche BSF ;
- L'effet de la concentration de dopage de base ;

CONCLUSION GENERALE

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Les cellules solaires hétérojonction ont un grand potentiel pour être la technologie verte par excellence dans le futur. Cependant, leur coût de fabrication plus élevé doit être compensé par des rendements de conversion bien supérieurs.

L'objectif de notre travail était la simulation de la cellule double jonction à base de InGaP/GaAs, qui présente le plus grand rendement de conversion. Cependant l'étude de l'influence des divers paramètres qui gouvernent les performances des cellules ont été effectuées. Le principe de la cellule double jonction étant d'absorber plus de l'énergie dans une large gamme du spectre solaire, naturellement l'idée viendrait d'ajouter des photopiles supplémentaires pour augmenter encore plus le rendement quantique et de conversion.

La simulation électrique de la cellule solaire dans ses deux formes (simple et double jonctions) donne des meilleures performances, on peut les résumer comme suit :

- Cellule solaire à une seule jonction :
 - ✓ à base de l'absorbeur GaAs : le rendement $\eta = 27.28\%$.
 - ✓ à base de l'absorbeur InGaP : le rendement $\eta = 17.18\%$.
- Cellule à double jonctions, Tandem (InGaP/GaAs) : le rendement $\eta = 30.15\%$.

Nous avons constaté que les cellules double jonction permettent une production maximale d'énergie comparativement aux cellules solaires à une seule jonction. Ainsi que l'élargissement de la zone d'absorption du spectre de ces cellules conduit à une augmentation du rendement quantique. Il y a donc une augmentation d'absorption des photons incidents pour les longueurs d'ondes qui situées dans la gamme de UV/visible/NIR.

Ce travail de simulation ouvre la voie à plusieurs perspectives. Nous suggérons de :

- a) Effectuer une étude de la cellule multi-jonctions par un simulateur 3D,
- b) Fabriquer des cellules solaires double et/ou triples jonctions et comparer les rendements expérimentaux avec ceux obtenus par simulation,
- c) Effectuer une étude plus approfondie sur la possibilité de développer des cellules solaires double ou multi-jonctions en se basant les composés quaternaires CIGS, CZTS, CdTe