

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira - Béjaïa

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Thème

Etude et analyse numérique des cellules solaires multi-jonctions
à base des matériaux (III-V) avec Atlas Silvaco.

Préparé par :

TAMAGUELT Ouali

BENLAKEHAL Yanis

Examiné par :

M^r BERRAH Smail

M^{lle} ACHOUR Lyakout

Dirigé par :

M^{me} S. IDJDARENE

M^{me} Ly. BENBAHOUCHE

Année universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENT

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

Nous tenons à remercier vivement nos promotrices :

Dr.BENBAHOUCHE Lynda de nous avoir reçus à l'université setif 1 et pour ses précieux conseils et pour le suivi qu'elle nous a assuré durant la conception et la rédaction de ce mémoire.

Dr. IDJDARENE Souad pour ses conseils et ses encouragements afin de réaliser ce mémoire.

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

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

Merci

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

A la mémoire de mon cher père

(BENLAKEHAL M'hand)

Ce travail est dédié à mon cher père, décédé n'y a pas longtemps, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études.

Pour le lourd sacrifice afin de voir sa famille unie et heureuse, il a donné sa belle vie. Pour tous les moments où tu n'as jamais épargné le moindre effort pour nous aider et nous encourager.

A ma chère mère

Pour les heurs pleins de bonheur et de tendresse. Pour les chaudes larmes qui hantent ma mémoire. Pour l'ampleur de tes sacrifices.

Pour toi ma chère yema qui mis l'avenir de ses enfants en premiers et les jouissances de la vie terrestre en dernier. Vous êtes ce que j'ai de plus cher au monde et je vous jure qu'aucun mot, ni expression ne saurait exprimer tout mon amour et toute ma gratitude. Merci de faire l'impossible pour moi.

A mes chers frères et sœurs

Et leurs enfants

Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour, pour donner du gout et du sens à notre vie de famille. Que ce travail vous témoigne de ma sincère affection.

A mes amis et en particulier mon binôme ouali et toute sa famille tamaguelt frères et sœurs, et notre ami bellagh jugourtha qui nous a vraiment aidé et soutenus, ce travail est dédié à tous les gens qui m'ont encouragé.

BENLAKEHAL.Yanis

DÉDICACE

En cette mémorable occasion de notre soutenance, Je tiens à dédier ce travail :

À Dieu

Pour m'avoir donné la force de persévérer et garder l'espoir pour mon avenir.

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Grace à vous mes parents j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité, votre soutien fut une lumière dans tout mon parcours.

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que vous avez déployés pour mon éducation et ma formation. Je vous aime mon père et ma mère et j'implore le tout-puissant pour qu'il vous accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mon cher frère et mes chères sœurs

Pour leur appui et leur encouragement, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

Dieu vous garde en bonne santé à mes côtés.

À mes chères grand-mères et mes très chères tantes

Pour leur soutien moral depuis mon enfance, avec leurs conseils et encouragements. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et réussite.

À mes oncles LOUNIS et NACER

Pour vos conseils et vos encouragements et le soutien moral et financière.

Que dieu le tout puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

À mon chère binôme YANIS et son père l'homme de valeur Monsieur M'hand BENLAKEHAL ainsi à toute sa famille.

Avec lequel j'ai partagé une longue amitié et ce travail, je vous souhaite plein de bonheur, réussite et une bonne santé.

À mes chers amis Ferhat IBALIDEN et Jugurtha BELLAGH.

Pour le soutien psychologique, merci d'être là dans les moments difficiles.

Et je dédie ce travail à tous mes amis qui me sont chers chacun par son nom.

Longue vie mes amis.

Ouali TAMAGUOLT

Sommaire

Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations	x
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Notions générales et fondamentales sur les matériaux semi-conducteurs III-V	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition de semi-conducteurs III-V	4
I.2.1. Composés binaires	5
I.2.2. Composés ternaires et quaternaires.....	5
I.3. Composants semi-conducteurs.....	6
I.3.1. Bandes d'énergie	6
I.3.2. Types de semi-conducteurs	7
I.4. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs.....	9
I.4.1. Equation de poisson	9
I.4.2. Equation de continuité	9
I.4.3. Equation de transport	10
I.5. Génération et recombinaison des paires électron-trou	11
I.5.1. Génération des paires électron-trou	11
I.5.2. Recombinaison	11
I.6. Absorption optique	13
I.7. Coefficient d'absorption	13
I.8. Choix et critères des matériaux III-V utilisés	14
I.8.1. L'Arséniure de Gallium (GaAs)	14
I.8.2. L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	17
I.8.3. Matériau GaInP.....	17
I.8.4. Alliage AlGaInP	18
I.9. Conclusion	18
CHAPITRE II : Généralités sur l'effet photovoltaïque et les cellules solaires multi-jonctions.....	19
II.1. Introduction	19
II.2. Masse d'air	19
II.3. Effet photovoltaïque.....	20
II.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	21

II.4.1. Absorption de la lumière dans le matériau semi-conducteur	21
II.4.2. Création de paires électron /trou dans le semi-conducteur	22
II.4.3. Collecte des particules générées.....	22
II.5. Principaux constituants de la cellule photovoltaïque	22
II.6. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	24
II.6.1. Courant de court-circuit I_{cc}	24
II.6.2. Tension de circuit ouvert V_{CO}	25
II.6.3. Facteur de forme FF	25
II.6.4. Rendement de conversion η	26
II.7. Association des cellules photovoltaïques	26
II.7.1. Association de cellules photovoltaïques en parallèle	26
II.7.2. Association de cellules photovoltaïques en série	27
II.8. Influence de l'ensoleillement et de la température sur les cellules PV	27
II.8.1. Influence l'ensoleillement.....	27
II.8.2. Influence de la température.....	28
II.9. Différentes technologies photovoltaïques	29
II.9.1. Première génération	29
II.9.2. Deuxième génération	31
II.9.3. Troisième génération	33
II.10. Conclusion	38
CHAPITRE III : Modélisation physique des cellules solaire multi-jonctions sur Atlas Silvaco.....	39
III.1. Introduction	39
III.2. Modélisation mathématique d'une cellule solaire	39
III.2.1. Modèles et équations de base des semi-conducteurs	40
III.2.2. Modèles de mobilité	42
III.3. Modélisation des cellules solaires dans Atlas Silvaco	44
III.3.1. Présentation du logiciel Silvaco Atlas.....	44
III.3.2. Modèles utilisés pour notre cellule solaire dans Silvaco	49
III.3.3. Modèles utilisés dans la partie Luminous dans Silvaco Atlas	49
III.4. Directives utilisées dans notre modélisation	50
III.5. Conclusion.....	51
CHAPITRE IV : Simulation numérique et discussion des résultats	52
IV.1. Introduction	52
IV.2. Simulations.....	52

IV.2.1. Cellule solaire supérieure à base d'absorbeur GaInP	54
IV.2.2. Cellule solaire inférieure à base d'absorbeur GaAs	59
IV.3. Cellule solaire à double jonctions : Structure Tandem (GaInP/GaAs)	64
IV.3.1. Présentation de la structure	64
IV.4. Conclusion	73
CONCLUSION GENERALE	74
Références bibliographiques	76

Liste des figures

Figure I.1 : Tableau périodique partiel.	5
Figure I.2 : Bande d'énergie pour les trois types de matériaux.	7
Figure I.3 : Dopage de silicium par l'atome de Phosphore dans un S-C de type N.	8
Figure I.4 : Dopage de silicium par l'atome du Bore dans un S-C de type P.	9
Figure I.5 : Schéma des principaux processus de recombinaison dans un SC.	12
Figure I.6 : Structure cristalline du GaAs.	15
Figure I.7 : Structure cristalline de GaInP.	17
Figure II.1 : explication de la masse d'air.	20
Figure II.2 : Création d'une paire électron-trou dans un semi-conducteur.	21
Figure II.3 : (a) Structure d'une cellule photovoltaïque. (b) Vue en coupe d'une cellule Photovoltaïque.	21
Figure II.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	22
Figure II.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque.	24
Figure II.6 : Cellule photovoltaïque en court-circuit.	25
Figure II.7 : Cellule photovoltaïque en circuit ouvert.	25
Figure II.8 : Facteur de forme (FF) pour une cellule photoélectrique.	26
Figure II.9 : Caractéristique I-V du raccordement en parallèle des cellules PV.	27
Figure II.10 : Caractéristique I-V du raccordement en série des cellules PV.	27
Figure II.11 : Influence du flux sur la caractéristique I-V de la cellule à une température constante 25°C	28
Figure II.12 : Influence du flux sur la caractéristique. P-V de la cellule PV à une température constante 25°C	28
Figure II.13 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension.	29
Figure II.14 : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension.	29
Figure II.15 : Cellule photovoltaïque polycristalline.	30
Figure II.16 : Cellule photovoltaïque monocristalline.	30
Figure II.17 : Cellule de deuxième génération.	31
Figure II.18 : Cellule au silicium amorphe.	32
Figure II.19 : Décomposition d'une cellule à base de tellure de cadmium.	32
Figure II.20 : Décomposition d'une cellule à base de CIGS.	33
Figure II.21 : Cellule organique.	34
Figure II.22 : Cellule nanocristalline à colorant.	34
Figure II.23 : Vue schématique de la décomposition de cellule à multi-jonctions.	36
Figure II.24 : Principe de la cellule multi-jonction.	37
Figure III.1 : Outils du logiciel Silvaco's TCAD.	45
Figure III.2 : Commandes et instructions principales dans Atlas.	46

Figure III.3 : Entrées et sorties dans Atlas Silvaco.	48
Figure IV.1 : (a) Structure DJ GaInP/GaAs à simuler. (b) Spectre solaire AM1.5 illuminant la cellule.....	53
Figure IV.2 : Structure, maillage et dopage de la cellule solaire supérieure à base de GaInP.	55
Figure IV.3 : Diagramme de bande de la cellule Top GaIn 56	56
Figure IV.4 : Potentiel de la cellule Top GaInP. 56	56
Figure IV.5 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule Top GaInP. 57	57
Figure IV.6 : Taux de recombinaison de la cellule Top GaInP..... 57	57
Figure IV.7 : Intensité optique pour la cellule Top GaInP..... 58	58
Figure IV.8 : Variation de courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule Top GaInP..... 58	58
Figure IV.9 : Structure de la cellule solaire inférieure à base de GaAs. 60	60
Figure IV.10 : Maillage de la cellule solaire inférieure à base de GaAs. 61	61
Figure IV.11 : Diagramme de bande de la cellule inférieure GaAs. 61	61
Figure IV.12 : Potentiel de la cellule inférieure GaAs. 62	62
Figure IV.13 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule inférieure GaAs. 62	62
Figure IV.14 :Taux de recombinaison de la cellule inférieure GaAs. 63	63
Figure IV.15 : Variation de courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule inférieure GaAs. 63	63
Figure IV.16 : (a) Structure conçue. (b) Circuit électrique équivalent de la cellule tandem GaInP/GaAs avec interconnexion d'une diode tunnel GaAs/GaAs. 65	65
Figure IV.17 : Structure, maillage et dopage de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs. 66	66
Figure IV.18 : Diagramme de bande de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs. 66	66
Figure IV.19 : Potentiel de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs. 67	67
Figure IV.20 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs. 67	67
Figure IV.21 : Taux de Recombinaison de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs..... 68	68
Figure IV.22 : Variation de courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs..... 68	68
Figure IV.23 : Diagramme de bande de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée. 69	69
Figure IV.24 : Potentiel de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée. 70	70
Figure IV.25 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée. 70	70
Figure IV.26 : Taux de recombinaison de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée. 71	71
Figure IV.27 : Intensité optique de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée. 71	71
Figure IV.28 : Courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée. 72	72

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Alliage de quelques matériaux III-V et III-VI	6
Tableau I.2 : Propriétés des matériaux GaAs et l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$	16
Tableau I.3 : Propriétés physiques de $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}$	18
Tableau II.1 : Rendement des cellules photovoltaïque pour chaque génération.	37
Tableau IV.1 : Principaux paramètres exigés des matériaux optimaux utilisés pour la conception de la cellule solaire DJ InGaP/GaAs.	53
Tableau IV.2 : Paramètres des différentes couches de la cellule solaire supérieure.	54
Tableau IV.3 : Paramètres photovoltaïques de la cellule Top GaInP simulés sous éclairement AM1.5G.	59
Tableau IV.4 : Paramètres géométriques et physiques optimaux de la cellule Top GaInP simulés sous éclairement AM1.5G.	59
Tableau IV.5 : Paramètres photovoltaïques optimaux de la cellule Top GaInP simulés sous éclairement AM1.5G.	59
Tableau IV.6 : Paramètres géométriques et physiques de la cellule inférieure GaAs simulés sous éclairement AM1.5G.	60
Tableau IV.7 : Paramètres photovoltaïques calculés de la cellule inférieure GaAs et simulés sous éclairement AM1.5G.	64
Tableau IV.8 : Paramètres géométriques optimaux de la cellule inférieure à base GaAs.....	64
Tableau IV.9 : Paramètres photovoltaïques optimaux de la cellule GaAs simulés sous éclairement AM1.5G.	64
Tableau IV.10 : Paramètres photovoltaïques calculés de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs et simulés sous éclairement AM1.5G.	69
Tableau IV.11 : Paramètres photovoltaïques optimaux de la cellule GaAs simulés sous éclairement AM1.5G.	72

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
AC	Alternating Current
AI-BFS	Aluminium back surface Field
AM	Area Mass
BSF	Back Surface Field
CAR	AntiReflective Coating
CC	Court-Circuit
CIGS	Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium
CIS	Cuivre, Indium, Sélénium
DC	Direct Current
DJ	Double Jonction
EG	Énergie de Gap
EQE	External Quantum Efficiency
FAB	Fabrication
FF	Facteur de Forme
GUM	Gummel
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LED	Light Emitting Diode
NLBBT	Non-Local Band-to-Band Tunneling
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PE-CVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
PV	Photovoltaïque
SC	Semi-Conducteur
SRH	Shockley Read Hall
TR,MAT	Transfer matrix algorithm
UV	Ultra-Violet
VWF	Virtual Wafer

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, il est aussi, le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ces sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins toujours accrus de l'industrie et des consommateurs.

Les énergies renouvelables multiples et fondamentalement déversent par leurs mécanismes physiques, chimiques ou biologiques. On parle de nos jours d'énergies renouvelables pour désigner en fait des sources anciennes dont la mise en œuvre est optimisée avec des technologies modernes ou bien d'énergies dont le principe est entièrement nouveau, le photovoltaïque [1].

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité par le biais d'une cellule photovoltaïque. Cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Leurs développements font de rapide progrès motivés par la conquête de l'espace. De plus, leur conception de base est souvent une jonction PN en semi-conducteur dont le rendement dépend des photons absorbés et des paires électrons-trous générés dans la zone de charge d'espace. L'une des possibilités d'améliorer cette absorption est d'utiliser des cellules multi jonctions à base des semi-conducteurs III-V [2].

L'objectif de ce travail est la modélisation et la simulation d'une cellule solaire tandem DJ (double jonction) à base des matériaux (III-V) (GaInP/GaAs, à travers le logiciel Silvaco Atlas.

Tout le long de travail, nous avons utilisé les alliages quaternaires AlGaInP et ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$, et $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}$ qui font partie des matériaux SC III-V, offrent multiples possibilités, aussi bien pour la microélectronique que pour l'optoélectronique. Ces ternaires offrent donc l'avantage d'ajustage de la bande interdite et par conséquent, de la longueur d'onde de la lumière émise autant que l'énergie du photon sera toujours légèrement supérieure à celle de la bande interdite.

Notre étude focus en premier lieu, sur la modélisation d'une cellule solaire simple (GaInP et GaAs) par le choix des modèles existants dans Silvaco et décrivant de façon aussi précise que possible

les propriétés physiques des matériaux considérés (AlGaInP, GaInP, GaAs et $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$). Une fois le modèle de chaque cellule est validé, nous avons par la suite optimisé les paramètres de chaque cellule en visant le facteur de forme FF et également le rendement de conversion η .

En deuxième lieu à l'implantation et la validation du modèle de fonctionnement d'une cellule solaire DJ dans le logiciel Silvaco Atlas visant l'optimisation de ses paramètres physiques par l'étude des propriétés optoélectroniques tout en mettant en évidence l'effet de l'épaisseur et de dopage de la jonction tunnel.

Ce manuscrit est composé de quatre chapitres : le premier Chapitre, sont des rappellent et des notions générales sur les matériaux semi-conducteurs III-V en basant sur les matériaux utilisés dans la structure de la cellule multi-jonction DJ, par l'étude et l'analyse de ses différentes propriétés.

Le deuxième chapitre, consacré pour présenter des généralités sur l'effet photovoltaïque, l'étude du rayonnement solaire (hors atmosphère et au sol) en déterminant le spectre solaire de référence AM1.5G, le principe de conversion photovoltaïque. De plus, nous avons approfondit à l'étude des caractéristiques et les différentes technologies d'une cellule solaire.

Dans le troisième chapitre, nous exposons notre problématique, puis nous présentons différents modèles utilisés pour modéliser les cellules solaires (simple, tandem DJ) dans le logiciel Silvaco et explorer le transport des porteurs de charges dans ces cellules. Dans une première partie, nous présentons les équations fondamentales dans les semi-conducteurs. Dans une seconde partie, nous nous concentrons sur la description des modèles utilisés dans la partie "solar". En outre, par ces modèles choisis, nous souhaitons qu'ils mènent aux relations entre les propriétés des matériaux III-V (GaAs, et les alliages $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{In}_y\text{P}$) et les caractéristiques électriques et optiques des cellules solaires, comprendre leur processus physiques internes, comprendre les causes des problèmes et, si possible de fournir des lignes directrices pour améliorer leurs efficacités et leurs rendements.

Le dernier chapitre, le premier point visé est le l'élaboration et l'implantation des modèles de deux cellules constituant notre cellule tandem DJ dans Silvaco. Nous passerons par la suite à l'optimisation des différents paramètres de chacune par le bon choix menant à l'amélioration de leurs efficacités et leurs rendements de conversion énergétique.

Le deuxième point visé est l'exploitation des résultats de simulation optimisés obtenus pour chaque cellule à l'élaboration et l'implantation du modèle de notre cellule DJ. La validation de nos modèles dans Silvaco, nous permet de représenter une série de résultats de simulation et prévoir la

limitation de la conversion photovoltaïque : caractéristiques IV obtenues qui nous permet, par conséquent, d'extraire les quatre paramètres fondamentaux de la cellule à savoir : le courant de court-circuit (J_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η). Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I : Notions générales et fondamentales sur les matériaux semi-conducteurs III-V

I.1. Introduction

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'élément et de composés semi-conducteurs.

En électronique rapide et en optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs [2].

Ce chapitre représente les matériaux III-V, les notions fondamentales des semi-conducteurs et l'importance du choix des modèles physiques afin d'introduire le lecteur à la logique du processus de simulation.

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

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés 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 Mendeleïev (voir **Figure I.1**). Ainsi de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés.

	III	IV	V	VI
	5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène
	13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure
80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium

Figure I.1 : Tableau périodique partiel [3].

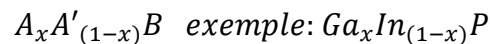
I.2.1. Composés binaires

Les semi-conducteurs binaires sont des éléments qu'on peut obtenir à partir d'un alliage de deux matériaux différents comme on l'a présenté dans la **Figure I.1**.

I.2.2. Composés ternaires et quaternaires

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On peut obtenir, par exemple, des alliages ternaires, ou quaternaires qui sont identifiés de la façon suivante [2] :

- **Ternaires** : S'il y a substitution de 2 atomes sur l'un des sous réseaux, soit :



- **Quaternaires 1+3** : S'il y a substitution de 3 atomes sur des sous réseaux soit :



- **Quaternaires 2+2** : S'il y a substitution de 2 atomes sur chacun des deux sous réseaux soit :

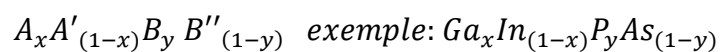


Tableau I.1 : Alliage de quelques matériaux III-V et III-VI

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

I.3. Composants semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et des isolants à proprement parler. Le comportement électrique des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie.

I.3.1. Bandes 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 [4].

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 [4].

L'énergie de gap est l'énergie minimum nécessaire pour qu'un électron saute de la bande de valence vers la bande de conduction [5].

La **Figure I.2** montre les diagrammes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.

- **Pour l'isolant :** l'écart énergétique entre les bandes est vaste. Les électrons ne circulent pas.

- **Pour semi-conducteur** : on remarque un écart énergétique plus petit, permettant à quelques électrons de la bande de valence à rejoindre la bande de conduction et de devenir des électrons libres.
- **Pour un conducteur** : les bandes énergétiques se chevauchent. Dans un matériau conducteur, il existe toujours un grand nombre d'électrons libres [6].

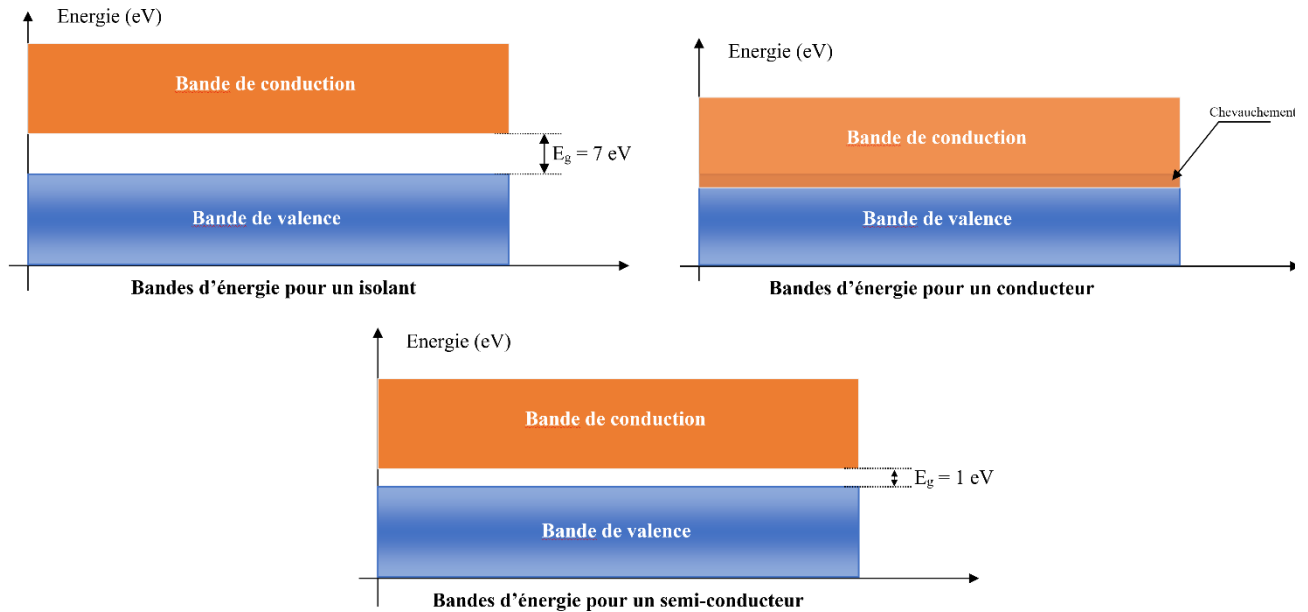


Figure I.2 : Bande d'énergie pour les trois types de matériaux [7].

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 :

$$E_g = E_{g-300k} + \alpha \left[\frac{(300K)^2}{300K + \beta} - \frac{T^2}{T + \beta} \right] \quad (I.1)$$

Où :

E_{g-300k} : L'énergie de gap du matériau à 300 K.

α et β : valeurs spécifiques pour chaque semi-conducteur.

I.3.2. Types de semi-conducteurs

I.3.2.1. Semi-conducteurs intrinsèques

Ce sont des semi-conducteurs très purs et bien cristallisés, ayant un taux d'impuretés très faibles et leur conductivité augmente avec la température. Le nombre de trous et d'électrons est égal à :

$$n = p = n_i \quad (I.2)$$

Où :

n_i : Densité de porteurs intrinsèque, c'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donnée.

Le niveau de Fermi dans un semi-conducteur intrinsèque est très voisin du milieu du gap à la température ambiante [8].

$$E_{fi} = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (I.3)$$

E_c : Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction du semi-conducteur.

E_v : Le niveau énergétique du haut de la bande de valence du semi-conducteur.

I.3.2.2. Semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé **dopage** et il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques, de type N et de type P.

• Semi-conducteur de type N

Un semi-conducteur dopé *N* possède un grand nombre d'électrons libres, la plupart de ces électrons libres étant données en cristal par les impuretés dopantes. Cela correspond aux températures usuelles, à un grand nombre de place occupées dans la bande de conduction.

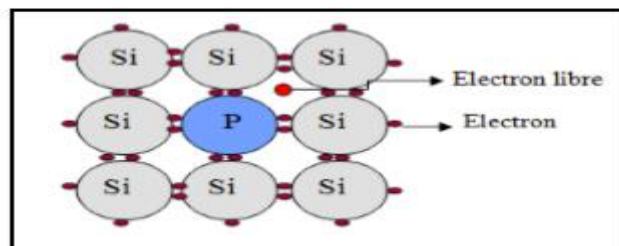


Figure I.3 : Dopage de silicium par l'atome de Phosphore dans un S-C de type N [4].

• Semi-conducteur de type P

Dans ce cas, le cristal est dopé avec des atomes possédant un électron de valence moins, les impuretés sont des atomes appelés accepteurs de la troisième (III) colonne de la classification périodique, tel que l'Aluminium (Al), le Bore (B) et le Gallium (Ga). Le Bore possède trois électrons dans la couche externe. Un semi-conducteur de type P possède un grand nombre de trous, la plupart de ces trous résultent de l'introduction d'atomes accepteurs dans le cristal. Cela correspond, aux températures usuelles, à un grand nombre de place vides d'électron dans la bande de valence.

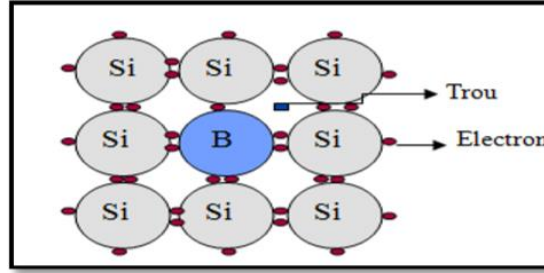


Figure I.4 : Dopage de silicium par l'atome du Bore dans un S-C de type P [4].

I.4. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs

Ces équations sont résolues via des logiciels spécifiques de simulation des dispositifs à base des semi-conducteurs, sont dérivées des équations de Maxwell. Les trois équations fondamentales de transport de charges sont respectivement l'équation de Poisson, l'équation de continuité pour les électrons et les trous et les équations de transport.

La statistique de Boltzmann détermine la concentration des porteurs. Après le maillage de la structure étudiée, le simulateur évalue numériquement la résolution de ces équations à chaque nœud du maillage.

Une discrétisation a dû être réalisée afin d'appliquer ces équations à une grille d'éléments finis utilisés pour représenter le domaine de simulation [2].

I.4.1. Equation de poisson

L'équation de Poisson s'exprime par [9] :

$$\text{div}(\epsilon \nabla \varphi) = -\rho \quad (\text{I.4})$$

Où :

φ : est le potentiel électrostatique,

ϵ : est la permittivité locale,

ρ : est la densité locale de charge.

Le champ électrique est donné par la relation :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(\varphi) \quad (\text{I.5})$$

I.4.2. Equation 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 [10], [11].

• Pour les électrons

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{I.6})$$

• Pour les trous

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{I.7})$$

Où :

n et p : concentration des électrons et des trous respectivement.

$\vec{J}_n$ et $\vec{J}_p$: densités du courant des électrons et des trous respectivement.

G_n et G_p : taux de génération pour les électrons et les trous respectivement.

R_n et R_p : taux de recombinaison pour les électrons et trous respectivement,

q est la charge électrique d'électron vaut $1,6 \cdot 10^{-19}$ C [9].

I.4.3. Equation 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 [10] :

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla \phi_n \quad (\text{I.8})$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla \phi_p \quad (\text{I.9})$$

Avec :

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 respectivement.

I.5. Génération et recombinaison des paires électron-trou

I.5.1. Génération des paires électron-trou

L'énergie minimale exigée pour la génération d'une paire électron-trou correspond à la hauteur de la bande interdite. Elle est décrite par la relation suivante :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{I.10})$$

Plus la température augmente, certains électrons de la bande de valence sautent dans la bande de conduction et laissent derrière eux des trous dans la bande de valence. A cet effet, les électrons et les trous établissent une conductivité électrique non nulle.

L'origine de la génération peut être due aux [6] :

- Générations spontanées dues à l'agitation thermique (taux de génération thermique),
- Générations résultantes de l'excitation du semi-conducteur par une source externe : tension extérieure, rayonnement solaire, etc.).

I.5.2. 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) **SRH**.
- La recombinaison **Auger**.

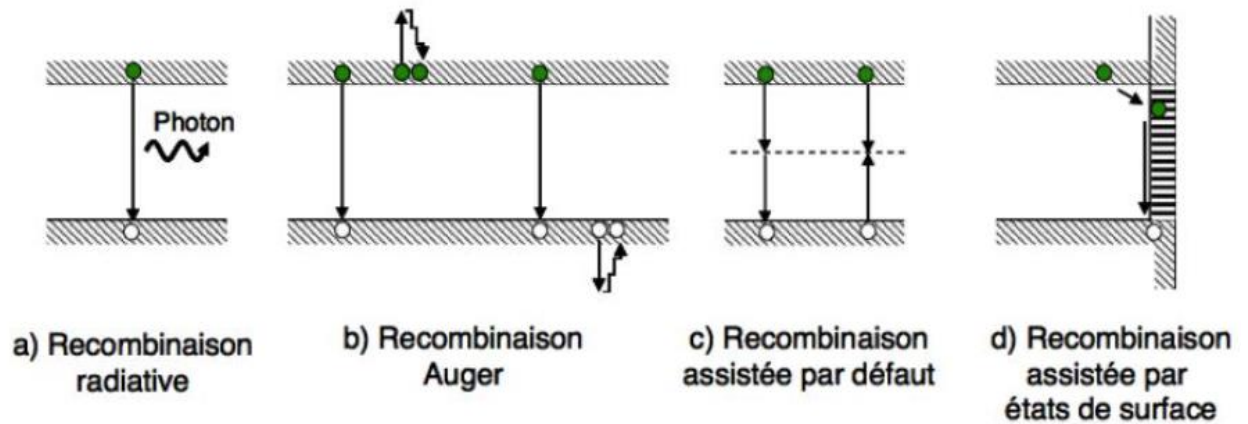


Figure I.5 : Schéma des principaux processus de recombinaison dans un SC [12].

I.5.2.1. Recombinaison en surface

Quand on éclaire un 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 (voir Figure I.5.d) [13].

I.5.2.2. 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. Le taux de recombinaisons radiatives. Ce type de recombinaison est dominant dans les semi-conducteurs purs, dotés d'une structure de bande à transitions directes (voir Figure I.5.a) [1].

I.5.2.3. Recombinaison SRH

Les recombinaisons multi-phonons en volume via les défauts ou recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH) s'effectuent par un mécanisme à deux étapes par la relaxation d'un électron libre de la bande de conduction vers le niveau de défaut puis vers la bande de valence où il s'annule avec un trou (ou la relaxation d'électron et du trou vers le défaut suivie par la recombinaison des deux) (voir Figure I.5.c) [14].

On a une recombinaison Auger (voir Figure I.5.b) 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 [15] :

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (I.11)$$

Où : C_n et C_p sont les coefficients d'Auger.

I.6. 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 [16].

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 [16].

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 [17] :

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.12)$$

Où :

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.

I.7. Coefficient d'absorption

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

A proximité du seuil d'absorption intrinsèque, le coefficient d'absorption est proportionnel à la différence ($h\nu - E_g$) :

$$\alpha = B(h\nu - E_g)^a \quad (\text{I.13})$$

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

L'absorption d'une radiation lumineuse dans un semi-conducteur est décrite par la loi de Lambert-Bouguer [17] :

$$I(x) = I(1 - R)\exp(-\alpha x) = I_0\exp(-\alpha x) \quad (\text{I.14})$$

Où :

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.

I.8. Choix et critères des matériaux III-V utilisés

Les matériaux III-V présentent un grand intérêt du moment qu'ils sont largement utilisés en optoélectronique pour la fabrication de diodes électroluminescentes (LED, diodes lasers ...) et en microélectronique pour la fabrication de circuits intégrés [5]. Ils présentent généralement une haute mobilité et une conductivité thermique élevée ainsi une bande interdite directe.

L'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques exige l'amélioration des procédures de leur production et en particulier le bon choix des matériaux utilisés pour leur fabrication. Dans ce contexte, parmi ces matériaux utilisés on retrouve : GaAs, AlGaAs et GaInP...ect.

I.8.1. L'Arséniure de Gallium (GaAs)

Le GaAs est un semi-conducteur III-V complexe composé de l'élément de gallium (Ga) de la colonne III et l'élément de l'arsenic (As) de la colonne V du tableau périodique des éléments. Le GaAs a d'abord été créé par la société Goldschmidt en 1929, mais les premières propriétés électroniques de ce semi-conducteur ne furent démontrées qu'en 1952 [6].

Il possède un fort coefficient d'absorption, une forte mobilité des électrons, une bande interdite directe de valeur 1,42eV.

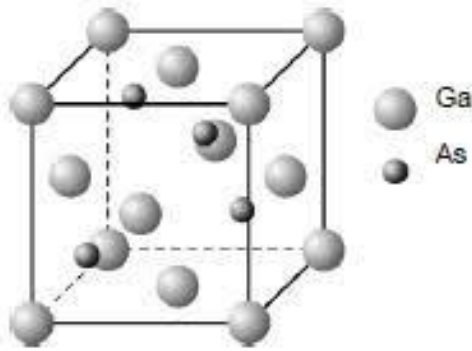


Figure I.6 : Structure cristalline du GaAs [18].

Le **Tableau I.2** montre les propriétés des matériaux GaAs et l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$.

Tableau I.2 : Propriétés des matériaux GaAs et l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [19].

Paramètre	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	GaAs
Energie de Gap E_g (ev)	$\begin{cases} 0 \leq x \leq 0,45 ; E_g(x) = 1,247x + 1,247 \\ 0,45 \leq x \leq 1 ; E_g(x) = 0,143x^2 + 0,125x + 1,900 \\ 0,45 \leq x \leq 1 ; E_g(x) = 0,144x^2 + 0,124x + 1,981 \end{cases}$	1,424
Densité (g.cm ⁻³)	$\begin{aligned} -1,6x + 5,36 \\ -1,56x + 5,32 \end{aligned}$	5,360 5,32
Coefficient de dilatation thermique linéaire (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	$-0,53x + 5,73$	5,73
Constante d'électrique	$\begin{aligned} \epsilon_r(x) &= -3,12x + 13,18 \\ \epsilon_r(x) &= -2,84x + 12,9 \end{aligned}$	13,18 12,9
Affinité électronique χ (ev)	$\begin{aligned} \chi(x) &= -1,1x + 4,07, \quad 0 \leq x \leq 0,45 \\ \chi(x) &= -0,14x + 3,64 \quad 0 \leq x \leq 1 \end{aligned}$	4,07
Constante de maille a (Å)	$\alpha(x) = 0,0078x + 5,6533$	5,6533
Coefficient de Auger A (cm ⁶ /s)	/	Dopé(n) 1,9×10 ⁻³¹ Dopé(p) 2,3×10 ⁻³¹
Recombinaison radiative A_0 (cm ³ /s)	$A_{0(Eg)} = 10^{-10}$ pour T=300k	10 ⁻¹⁰
Recombinaison en surface	Surface libre : 4×10 ⁵ cm/s, pour x=0,08	Surface libre : 4×10 ⁵ cm/s
Densité effective d'état N_c (l/cm ³)	$\begin{aligned} N_c &= 2,5 \times 10^{19}(0,063 + 0,083x)^{3/2} \\ \begin{cases} x < 0,41 ; N_c = 2,5 \times 10^{19}(0,85 - 0,14x)^{3/2} \\ x > 0,45 ; N_v = 2,5 \times 10^{19}(0,85 - 0,14x)^{3/2} \end{cases} \end{aligned}$	4,7×10 ¹⁷
Densité effective d'état N_v (l/cm ³)		9,8×10 ¹⁸
Masse effective des électrons et des trous $m_e^*(x)$ et $m_h^*(x)$	/	$\begin{aligned} \frac{m_e^*}{m_0} &= 0,0670 \\ \frac{m_h^*}{m_0} &= 0,642 \end{aligned}$
Concentration de porteurs intrinsèque n_i	$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp \left[-\frac{E_g}{2kT} \right]$	2,1×10 ⁶

I.8.2. L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ est une solution solide de GaAs et de AlAs avec un rapport molaire x et $(1-x)$. Les alliages $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ conviennent à la mise en œuvre de l'ingénierie de bande interdite dans les diodes lasers graduées. Ceci pour plusieurs raisons :

- Ces alliages sont caractérisés par une bande interdite directe pour les valeurs de x entre $x = 0$ ($E_g = 1,42 \text{ eV}$) et $x = 0,45$ ($E_g = 1,96 \text{ eV}$). A cet effet, ces matériaux sont des absorbeurs optiques efficaces comme requis pour les diodes lasers.
- Dans toute la plage de composition de $x = 0$ (GaAs) à $x = 1$ (AlAs), la variation de la constante de réseau est inférieure à 1%, de sorte que les couches graduées peuvent être cultivées sans formation de dislocations notables du réseau.

I.8.3. 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 ($x=1$, $E_g=2,26 \text{ eV}$) et InP ($x=0$, $E_g=1,344 \text{ eV}$).

Comme la plupart des matériaux semi-conducteurs III-V, le GaInP cristallise en un réseau zinc-blende, présentée sur la **Figure I.7**. Il a un gap direct pour une fraction molaire du Gallium inférieure à 0,74 et un gap indirect dans le cas contraire. Il forme une bonne interface avec le matériau GaAs pour $x = 0,516$.

En plus, pour la réalisation des couches fenêtres, le matériau GaInP a des propriétés excellentes par rapport au matériau AlGaAs [18], [20]. 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.

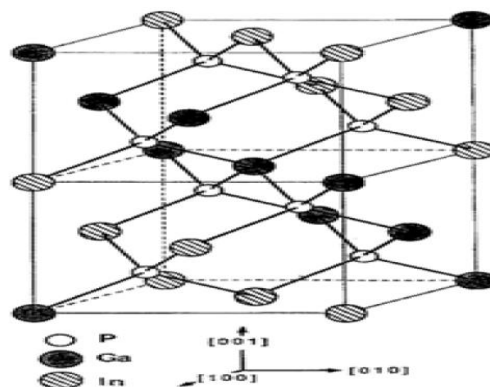


Figure I.7 : Structure cristalline de GaInP [21].

I.8.4. Alliage AlGaInP

En ajoutant au matériau GaInP, 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, ce qui donne plusieurs combinaisons dans la conception des cellules solaires monolithiques.

Le **Tableau I.3** montre les propriétés du matériau $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}$ [19].

Tableau I.3 : Propriétés physiques de $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}$ [19].

Paramètres	$\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{P}$	$\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$
Energie de gap (eV)	$E_g(x) = 1,35 + 0,73x + 0,7 x^2$ (atlas)	1,89
Permittivité diélectrique ϵ	$12,5 - 1,4x$	11,8
Affinité électronique χ	$\chi(x) = 4,38 - 0,58x$	4,09
Constante de réseau ($\text{\AA}^\circ$)		5,65
Coefficient d'Auger (cm^6/s)	$A(x) = -8,2 \times 10^{-30}x^2 + 8,3 \times 10^{-30}x + 9 \times 10^{-31}$	3×10^{-30}
Recombinaison radiative A_0 (cm^3/s)	$A_0(E_g) = (1 \pm 0,3)10^{-10}$	
Recombinaison en surface	InGaP/GaAs : 1,5 cm/s	
Masse effective des électrons et des trous $m_e^*(x)$ et $m_h^*(x)$	$\frac{m_e^*(x)}{m_0} = 0,0254x^2 - 0,114x + 0,08$ $\frac{m_h^*(x)}{m_0} = 0,19x + 0,6$	$\frac{m_e^*(x)}{m_0} = 0,029$ $\frac{m_h^*(x)}{m_0} = 0,695$

I.9. Conclusion

Nous avons présenté les notions générales et fondamentales sur les matériaux semi-conducteurs en particulier les matériaux III-V. Ainsi que les propriétés générales des composés (III-V) binaires, ternaires et quaternaires destinés dans la conception de la cellule solaire tandem double jonction DJ **InGaP/GaAs**. Leurs utilisations apportent de nombreux avantages en termes de propriétés des matériaux et sont préférables grâce à leurs performances qui sont très intéressantes pour les dispositifs photovoltaïques. Ce qui vient après est une présentation de l'effet photovoltaïque et les différentes technologies des cellules P.V.

CHAPITRE II : Généralités sur l'effet photovoltaïque et les cellules solaires multi-jonctions

II.1. Introduction

Actuellement, au cours de ces dernières années, les énergies renouvelables en particulier les énergies photovoltaïques ont une importance énorme dans le monde entier, leur développement et leur recherche continuent à progresser. Ceci grâce aux avantages qu'elles offrent : l'abondance dans la nature, énergies alternatives et aussi non-polluantes.

L'électricité photovoltaïque est une source incontournable pour l'avenir, et des efforts considérables se font pour rendre cet apport d'énergie plus performant. 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.

L'objectif de ce chapitre, est de présenter les notions fondamentales à la compréhension du sujet (cellules solaires). Nous présentons en premier lieu la définition de la masse d'air et l'effet photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïque et leurs caractéristiques principales. En deuxième lieu, nous essayons de comprendre et maîtriser l'effet de l'ensoleillement et la température sur les cellules photovoltaïques et leurs association série et parallèle. Enfin nous allons présenter les différentes générations des cellules photovoltaïques les plus répandues sur le marché tout en illustrant leurs rendements en fonction de la structure, dimensions, et coût de production.

II.2. Masse d'air

Le soleil est une sphère de plasma (matière complètement ionisée) qui est le siège de réactions thermonucléaires et exothermiques transformant des noyaux hydrogène (proton) en noyaux d'hélium (neutron) avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique répartie sur un très large spectre de longueur d'onde comprises entre 10^{-10} et 10^4 m.

La terre reçoit une fraction minuscule de cette énergie (environ $1,5 \times 10^{18}$ KWh/an) car l'atmosphère absorbe et reflète une partie de ce rayonnement, incluant la plupart des rayons X et rayons UV (Ultra-violet) [1].

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de 1,4 kW/m² au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur Terre à 1 kW/m² par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la « masse d'air » (AM).

- La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale.
- Le titre AM1 correspond à une même lumière arrivant à la surface terrestre. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à 48,2° sur la surface de la Terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande (voir **Figure II.1**).

De manière générale, l'indice m associée à la masse d'air (AMm) est calculé comme suit [22] :

$$m = \frac{1}{\sin(A)} \quad (\text{II.1})$$

A : étant l'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la terre.

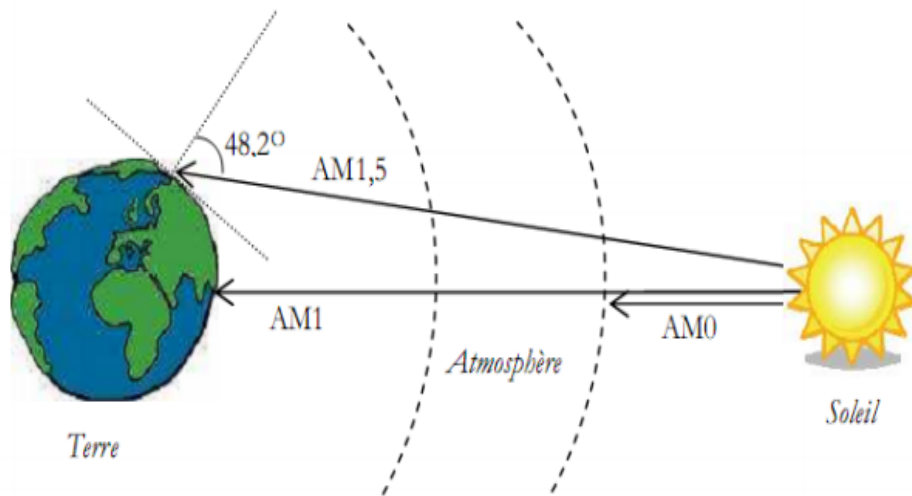


Figure II.1 : explication de la masse d'air [22].

II.3. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité (courant continu CC), découvert par A. Becquerel en 1839 et expliqué par A. Einstein en 1905 [23]. Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (photo détecteurs) mais aussi pour la conversion de la lumière en énergie électrique (cellules solaires).

Ce phénomène se produit dans les semi-conducteurs. Ceci est dû à leur structure énergétique. Un électron lié à l'atome se trouve dans la bande de valence ; un électron libre se situe, lui, dans la bande de conduction : c'est lui qui, par son déplacement, permet la conduction du courant électrique.

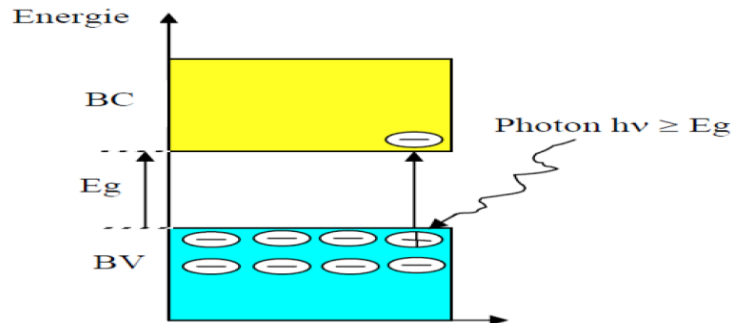


Figure II.2 : Création d'une paire électron-trou dans un semi-conducteur [23].

II.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir des semi-conducteurs, dopée P et l'autre dopée N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel [18]. Elle est un dispositif qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique (voir **Figure II.3**) Le principe de cette conversion repose sur les trois phénomènes suivants [24].

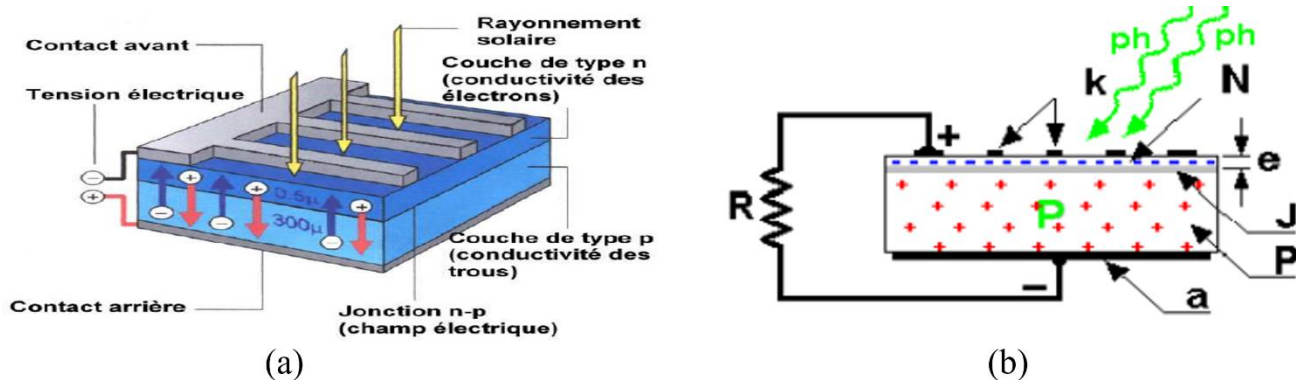


Figure II.3 : (a) Structure d'une cellule photovoltaïque [24]. (b) Vue en coupe d'une cellule Photovoltaïque [18].

II.4.1. Absorption de la lumière dans le matériau semi-conducteur

C'est grâce au phénomène d'absorption qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité. Le gap est la caractéristique la plus importante pour l'absorption ; c'est l'écart entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence d'un matériau. La bande de valence doit être occupée par les électrons et la bande de conduction vide.

- Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap ($E = h\nu < E_g$) ; le photon n'est pas absorbé.
- Dans le cas d'un photon suffisamment énergétique ($E = h\nu \geq E_g$) ; l'interaction (photon/semi-conducteur) se traduit par la génération d'une paire (électron/trou) qui modifie localement la conductivité du matériau (voir **Figure II.4**) [25].

II.4.2. Création de paires électron /trou dans le semi-conducteur

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 passe alors vers un niveau d'énergie supérieur. Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes.

Si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau ; les électrons seront donc libérés de l'attraction de l'atome, créant ainsi un déséquilibre électrique au sein de la matière et se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique (voir **Figure II.3**). Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. La circulation des électrons (e^-) dans un sens et les trous (h^+) dans l'autre formeront un courant électrique, lorsqu'une charge sera branchée [25].

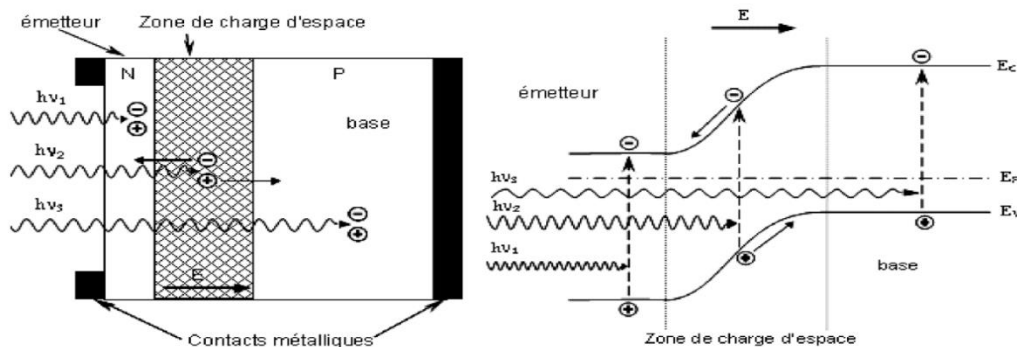


Figure II.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [24].

II.4.3. Collecte des particules générées

La solution la plus fréquente pour collecter ces particules est d'appliquer un champ électrique au moyen d'une jonction P-N. Il est aussi possible d'utiliser d'autres structures, comme les hétérojonctions et les diodes Schottky [26].

II.5. Principaux constituants de la cellule photovoltaïque

L'architecture des cellules PV a rapidement évolué, et abouti à une architecture dite standard. Les principaux éléments constituant la cellule sont :

- **Texturation** : Pour un meilleur rendement, il est préférable d'utiliser une surface dont la forme triangulaire, cela entraîne une diminution de l'intensité de lumière réfléchi et une amélioration de l'intensité de lumière absorbée par le matériau semi-conducteur.
- **Couche anti-Reflet** : c'est une couche anti-réfléchissante (AntiReflective Coating CAR basée sur le principe de l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces [5]. Cette couche permet de réduire la réflexion de la lumière à moins de 5% sur la face avant de la surface de la cellule solaire.
- **Les contacts** : Ils créent une barrière de potentiel « barrière de Schottky » :
 - **Contact ohmique inférieure**, couvre la partie inférieure de la surface de la cellule et il a comme rôle la collection des porteurs majoritaires et minoritaires, de prévenir la recombinaison et de permettre aux rayons lumineux de pénétrer à l'intérieur de la cellule solaire [3].
 - **Contact ohmique supérieure** (grille métallique) : Ni-Al, ou parfois ajoutée une couche antireflet (MgF₂), couvre la surface de cellule solaire, son rôle est de minimiser l'ombrage et éviter la recombinaison.
- **Fenêtres** : couche conductrice permettant aux électrons de circuler vers les contacts électriques sans augmenter la résistance des cellules en série.
- Une couche absorbante : **Émetteur** : couche fine à base de semi-conducteur, de type N. Pour minimiser l'absorption dans l'émetteur, Il faut que son épaisseur soit très fine par rapport à l'épaisseur de la base pour assurer la collecte des porteurs [18]. Le dopage de l'émetteur doit être de l'ordre de 10^{18} cm^{-3} .
- Une couche tampon : **Base** : couche fine à base de semi-conducteur, de type P, Le dopage de la base a un rôle important dans l'augmentation du rendement de la cellule solaire. Ainsi, il doit être plus faible que celui de l'émetteur afin d'augmenter la durée de la vie des porteurs minoritaires, en contrepartie. Il augmente le courant de l'obscurité et donc diminue la performance de la cellule.
- **Champ de la surface Arrière (BSF)** : (Back Surface Field) est une couche mince fortement dopée (p+ ou n+) permet de passiver la face arrière de la cellule. L'ajout de la couche BSF permet de partager la tension entre les jonctions n-p et p-p+, cela conduit à ; a diminution du courant d'obscurité dans la cellule. De plus, le champ électrique induit dans la jonction p-p+ reflète les porteurs minoritaires et permet d'augmenter la tension de court-circuit de la cellule solaire, de minimiser les recombinaisons et donc collecter des porteurs majoritaires [3], [18].

- Une couche d'oxyde transparent conducteur (OTC) : ITO, ZnO,
- **Le substrat** : verre sodé ; ou utiliser des substrats flexibles ou métalliques.

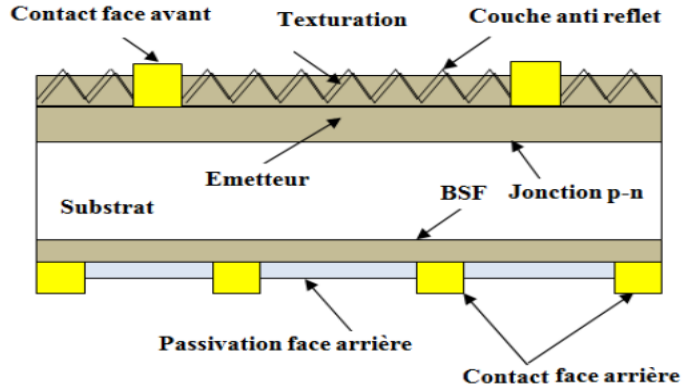


Figure II.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque [27].

II.6. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$, ainsi illustré sur la **Figure II.8** [26]. Cette caractéristique courant-tension est une relation non-linéaire, représenté par l'équation suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \times \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (II.2)$$

Où :

I_{ph} : courant généré variable suivant l'éclairement.

T : température en K.

k : constante de Boltzmann vaut $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

I_s : courant de saturation.

Les paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque sont :

II.6.1. Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule est nulle [26]. (voir **Figure II.6**).

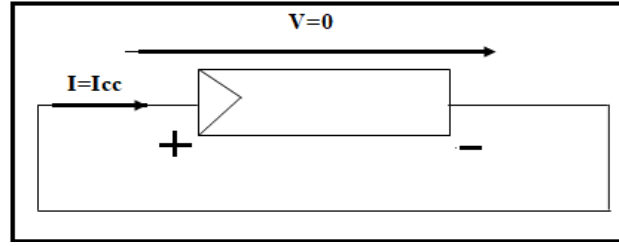


Figure II.6 : Cellule photovoltaïque en court-circuit [26].

II.6.2. Tension de circuit ouvert V_{co}

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert (le courant traversant la cellule est nul). Dans ce cas, la puissance est nulle [26] (voir **Figure II.7**).

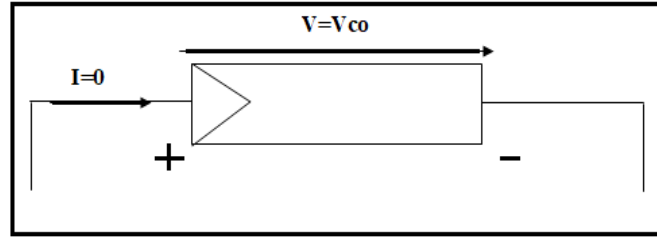


Figure II.7 : Cellule photovoltaïque en circuit ouvert [26].

II.6.3. Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de forme (facteur de remplissage) ou fill factor (**FF**). Il est représenté sur la **Figure II.8** (le rapport entre les deux quadrants). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{oc}} = \frac{I_{pm} \times V_{pm}}{I_{cc} \times V_{oc}} \quad (II.3)$$

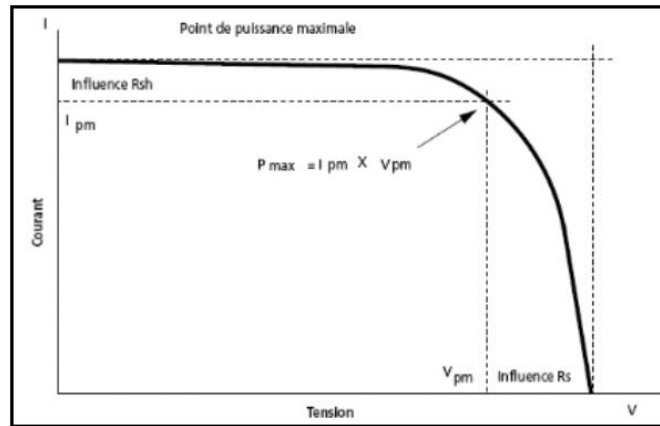


Figure II.8 : Facteur de forme (FF) pour une cellule photoélectrique [26].

II.6.4. Rendement de conversion η

On parle souvent de rendement de conversion pour des cellules photovoltaïques, ce terme correspond à la capacité de la cellule à transformer l'énergie des photons qui la percutent. Ces mesures sont aujourd'hui normalisées. Les cellules solaires sont donc testées par les constructeurs sous un spectre lumineux artificiel correspondant à un spectre solaire typique AM1.5 (soit à l'irradiation totale reçue sur le sol terrestre à une altitude de 0° avec un angle de 48°) sous une température fixe de 25°C. Pour simplifier, cette convention a permis de normaliser les rendements donnés dans les notices des capteurs afin de pouvoir les comparer.

La puissance moyenne totale reçue lors des tests par les cellules assemblées en module PV est de 1000W/m² sous 25°C [26].

Le rendement η d'un photo-générateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photo-générateur comme l'illustre l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{oc}}{P_{\text{in}}} \quad (\text{II.4})$$

II.7. Association des cellules photovoltaïques

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque.

II.7.1. Association de cellules photovoltaïques en parallèle

Dans un groupement en parallèle, les cellules sont traversées par la même tension et la caractéristique résultante du groupement en parallèle est obtenue par addition des courants à une tension

donnée [28]. La figure ci-dessous illustre la caractéristique résultante d'association de cellules en parallèle.

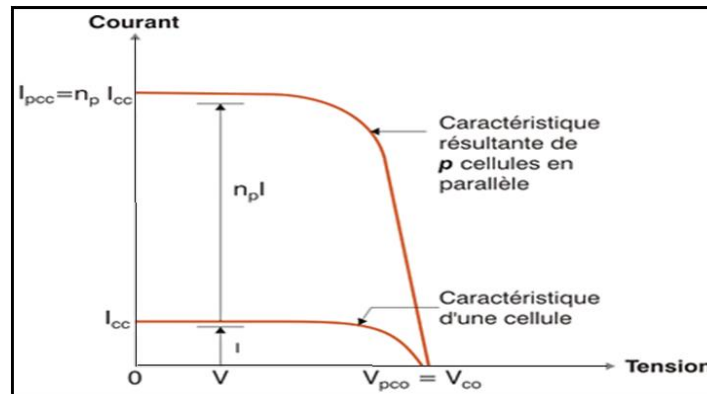


Figure II.9 : Caractéristique I-V du raccordement en parallèle des cellules PV [28].

II.7.2. Association de cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions (voir **Figure II.10**) à un courant donné [28].

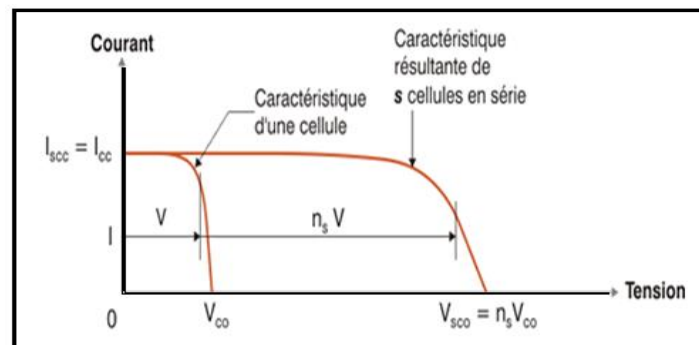


Figure II.10 : Caractéristique I-V du raccordement en série des cellules PV [29].

II.8. Influence de l'ensoleillement et de la température sur les cellules PV

II.8.1. Influence l'ensoleillement

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement. A une température constante, l'augmentation du flux lumineux (ensoleillement) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I(V)$ suivant le sens positif de l'axe des courants [30]. La **Figure II.11** et la **Figure II.12** montrent l'effet de l'éclairement sur les caractéristiques respectivement $I(V)$ et $P(V)$ à une température de 25°C.

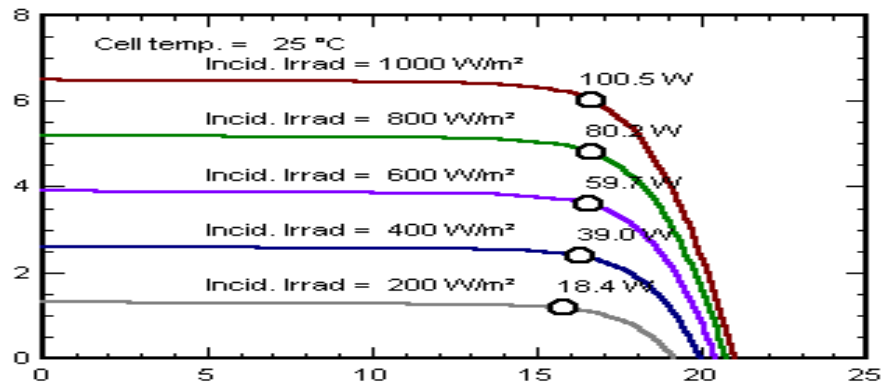


Figure II.11 : Influence du flux sur la caractéristique I-V de la cellule à une température constante 25°C [29].

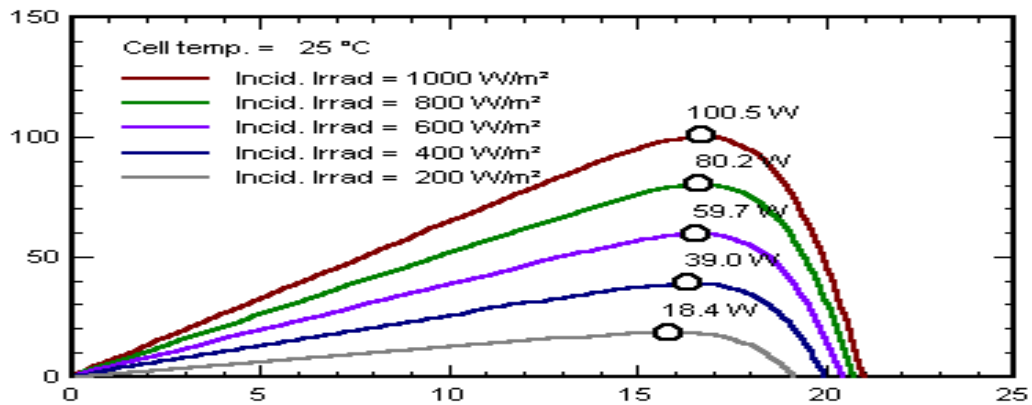


Figure II.12 : Influence du flux sur la caractéristique P-V de la cellule PV à une température constante 25°C [31].

II.8.2. Influence de la température

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant augmente également due principalement à la diminution du largeur de la bande interdite du matériau.

Cette augmentation est de l'ordre de 0,1% par degré (Kelvin). Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite et entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule [28]. L'influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) est illustrée respectivement sur la **Figure II.13** et sur la **Figure II.14** à un niveau d'éclairement de 1000W/m².

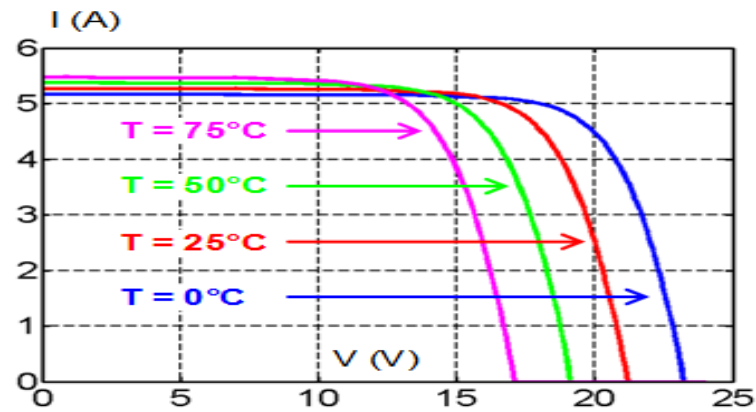


Figure II.13 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension [31].

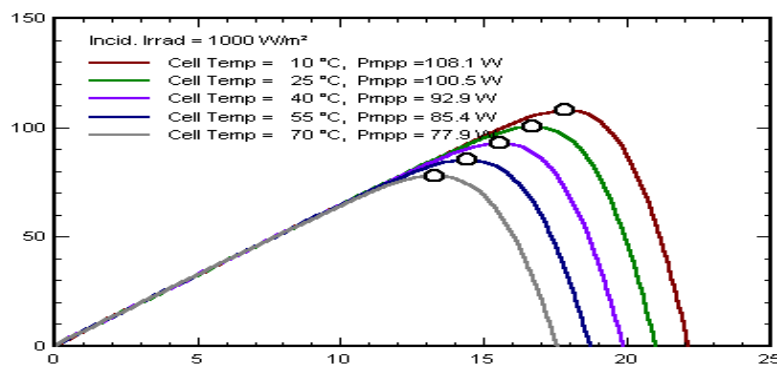


Figure II.14 : Influence de la température sur la caractéristique puissance-tension [31].

II.9. Différentes technologies photovoltaïques

II.9.1. Première génération

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallines.) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés [32].

II.9.1.1. Cellules polycristallines

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, deux cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.

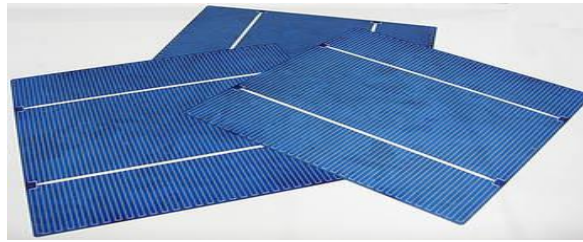


Figure II.15 : Cellule photovoltaïque polycristalline [33].

- **Rendement :** 16-18 % (on obtient ainsi une puissance de 160 à 180 Wc par m²). Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix.
- **Avantage :**
 - Rapport performance/prix.
 - Bon rendement.
 - Durée de vie importante.
- **Inconvénients :**
 - Faible sous éclairage réduit [33].

II.9.1.2. Cellules monocristallines

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en forme général d'un bleu uniforme.

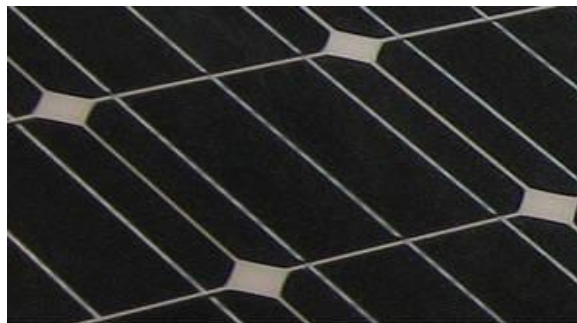


Figure II.16 : Cellule photovoltaïque monocristalline [34].

- **Rendement :** 17-20 % (on obtient ainsi une puissance de 170 à 200 W par m²). Sans entrer dans le détail, si aujourd'hui les cellules sont de types AI-BFS (aluminium back surface Field), l'évolution vers des cellules PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) permettra prochainement de monter à 23 % tandis que les cellules à hétérojonctions promettent déjà d'atteindre les 26 % (26,6 % déjà obtenu en laboratoire).

- **Avantage :**
 - Durée de vie importante
 - Très bon rendement.
- **Inconvénients :**
 - Coût élevé.
 - Rendement faible sous éclairage réduit [34].

II.9.2. Deuxième génération

Les nouvelles cellules photovoltaïques qui constituent la deuxième génération de cellules sont composées de très peu voire pas de silicium. Cela s'explique par l'augmentation du prix de ce matériau pourtant abondant sur terre.

Ces cellules sont réputées car elles sont réduites considérablement d'épaisseur. Ce qui explique la facilité des constructeurs à créer des panneaux photovoltaïques très souples, légère et facile à installer. C'est pour cela que l'on appelle ces cellules des cellules à couches minces, car leur zone d'absorption est de l'ordre de quelques micromètres (200 à 300 μm) [34].

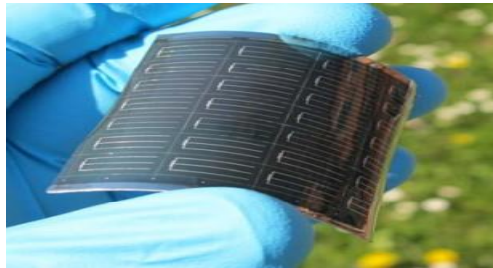


Figure II.17 : Cellule de deuxième génération [35].

II.9.2.1. Cellules à base de Silicium amorphe

Les cellules à base de silicium amorphe sont basées sur l'empilement de base constitué par une couche de type p, une couche non dopée dite intrinsèque et notée i, et une couche de type n. Ces structures pin sont déposées directement sur le support à basse température (200°C ou moins) à partir de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (appelée PE-CVD pour plasma enhanced-CVD), par décomposition du gaz silane (SiH_4). Il s'agit de technologies largement similaires à celles utilisées dans le domaine des écrans plats. Les cellules solaires au silicium amorphe, à l'origine cantonnées dans des marchés de niches (exemple : calculettes) ont élargi leur champ d'application dans le domaine des modules souples que l'on peut déployer sur les grandes toitures, fabriqués par les technologies en rouleau (roll to roll) sur des supports plastiques ou métalliques, et dans celui des supports verre de grande surface pouvant aller jusqu'à près de 5,7 m² d'un seul tenant [34].

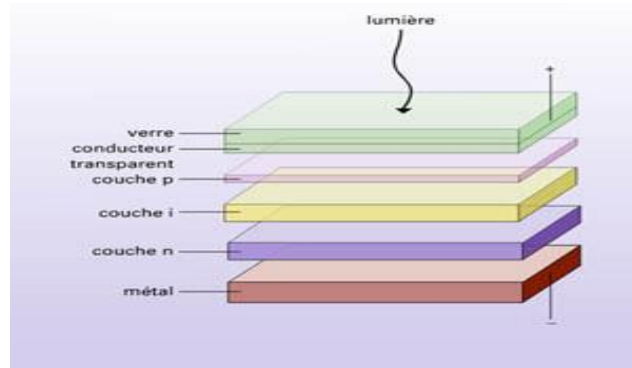


Figure II.18 : Cellule au silicium amorphe [34].

II.9.2.2. Cellules à base de tellure de cadmium

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. La couche n est un semi-conducteur de grande bande interdite (le CdS avec l'énergie du gap E_g 2,4 eV), qui laisse passer la lumière. On parle alors de couche fenêtre. Les photons sont ensuite absorbés dans la couche de CdTe de type p, appelée absorbeur. La valeur 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2 μm autorisant ainsi l'utilisation de matériaux relativement impurs, dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques μm [36].

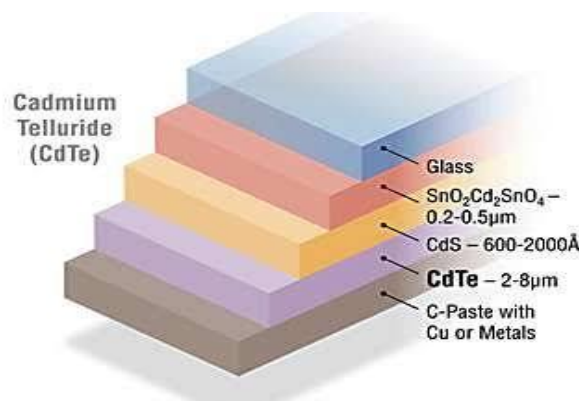


Figure II.19 : Décomposition d'une cellule à base de tellure de cadmium [36].

II.9.2.3. Cellules à base de sélénure de cuivre indium gallium

La fabrication des couches de CIS est plus complexe que celles du CdTe du fait de leur caractère ternaire, voire quaternaire (avec le gallium, CIGS), ce qui a nécessité une mise au point plus longue. La contrepartie positive de cette complexité est une grande flexibilité concernant l'optimisation des

propriétés. On peut ainsi fixer de façon très modulable, non seulement le gap mais également les autres propriétés (affinité électronique, travail de sortie), en substituant partiellement l'indium avec du gallium, de l'aluminium ou le sélénium par du soufre. L'absorbeur est le CIGS et les couches fenêtres et d'OCT sont constituées de sulfure de cadmium, zinc ou indium (en substitution potentielle du cadmium) et d'oxyde de zinc, dopé aluminium, tandis que le contact arrière est constitué par une couche de molybdène [36].

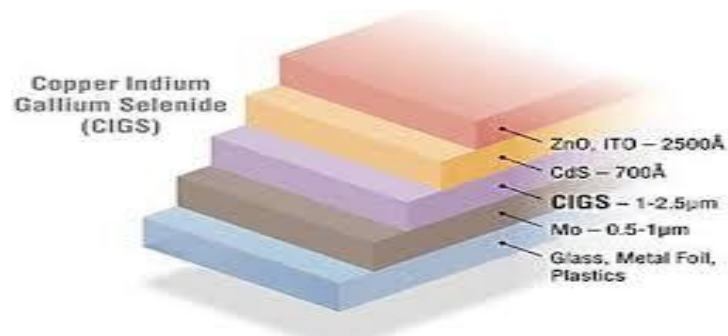


Figure II.20 : Décomposition d'une cellule à base de CIGS [36].

II.9.3. Troisième génération

La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces matériaux étant rares, ils sont chers. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche.

II.9.3.1. Cellules organiques

Une des filières émergentes est celle des cellules tout organiques. Dans ce cas, on se sert de la propriété semi-conductrice de certains polymères, permettant ainsi de créer des jonctions analogues aux jonctions p-n, et donc d'en faire des cellules solaires. Le saut a été franchi avec l'idée de mélanger intimement deux matériaux organiques permettant ainsi aux excitons (paires électron-trou créées lors de l'excitation lumineuse) d'être plus facilement séparés aux nombreuses interfaces. Le concept de cellules organique à jonction interpénétrée était né (BulkHeterojunction). Le système de base montré sur la **Figure II.21** est celui où le donneur est constitué par des molécules de fullerène fonctionnalisées et l'accepteur est un polymère dérivé du polythiophène [36].

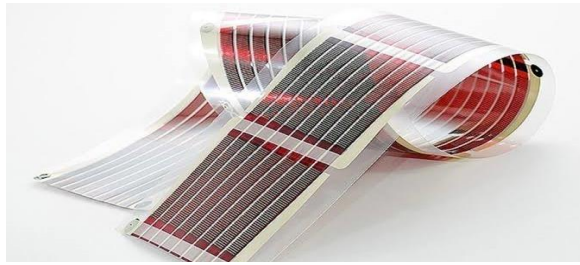


Figure II.21 : Cellule organique [36].

II.9.3.2. Cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel

Pour les cellules à colorants, il s'agit d'une matrice poreuse inorganique, fonctionnalisée par le greffage de colorants photo actifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydoréduction permettant de communiquer électriquement avec la molécule de colorant.

Le système de référence est constitué d'une couche d'oxyde de titane (TiO_2) frittée dont les particules sont de taille nanométrique, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple redox iodo-ioduré [36].

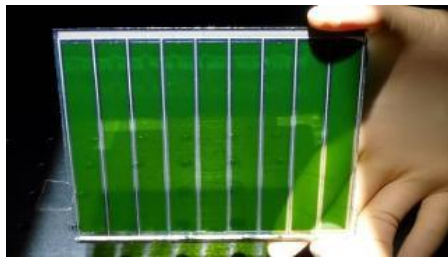


Figure II.22 : Cellule nanocristalline à colorant [37].

II.9.3.3. Cellules 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 semi-conducteurs (III-V), ont été mise au point depuis les années 60 [19]. Le premier dispositif de la multi-jonction 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% [38]. Actuellement, l'avancement technologique permet la réalisation des cellules solaires avec des rendements très élevés de l'ordre de 42,3% [39]. 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 multi-jonctions 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 [40].

Le développement des cellules solaires multi jonctions 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 du non-absorption des photons d'énergie $h\nu E_g$.

Dans cette approche, l'empilement de plusieurs simples jonctions ayant différents gaps assure l'absorption efficace de différente partie du spectre solaire. En plus, l'utilisation des semi-conducteurs (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 ($\sim 50^\circ\text{C}$) [40].

• Structure et principe de base d'une cellule multi-jonction

Le concept des cellules solaires multi-jonction 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 (voir **Figure II.23**).

Une première jonction à grande bande interdite permettant la conversion efficace des photons UV en minimisant les pertes par thermalisation (TOP),

Une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction (JUNCTION TUNNEL),

Une troisième jonction à petit gap convertit les photons infrarouges (BOTTOM) [36].

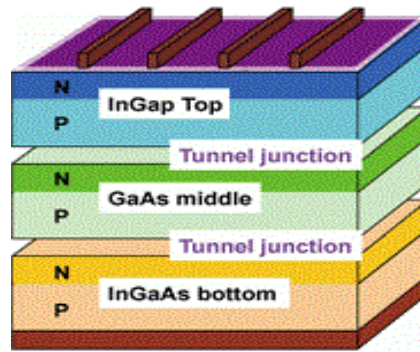


Figure II.23 : Vue schématique de la décomposition de cellule à multi-jonctions [36].

Les cellules photovoltaïques à haut rendement utilisent des matériaux avec des bandes interdites qui couvrent tout le spectre solaire. Les cellules solaires multi-jonctions 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 [41]. (Voir **Figure II.24**).

L'une des limitations fondamentales des cellules solaires multi-jonctions 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 [27].

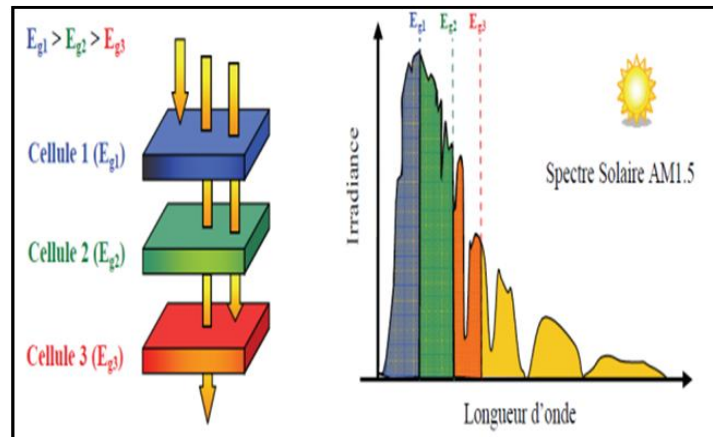


Figure II.24 : Principe de la cellule multi-jonction [41].

Les rendements des cellules sont illustrés dans le **Tableau II.1**.

Tableau II.1 : Rendement des cellules photovoltaïque pour chaque génération.

Type	Rendement cellule(en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
1^{ère} génération				
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
2^{ème} génération				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
3^{ème} génération				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la recherche, production
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la recherche, production
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production

II.10. Conclusion

Nous avons présenté le principe de l'effet photovoltaïque et les concepts fondamentaux de la conversion de la lumière en électricité à travers les cellules photovoltaïques à base des différents semi-conducteurs. De même, nous avons présenté les notions préliminaires nécessaires pour la compréhension de la cellule solaire à travers son principe de fonctionnement, ses principaux éléments constitutifs ainsi que ses paramètres caractérisant son fonctionnement (I_{cc} , V_{oc} , FF , η ...).

Finalement, on a exposé les cellules photovoltaïques qui constituent la première, deuxième et troisième génération, ainsi que les cellules solaires multi jonctions à base des matériaux III-V, tout en décrivant leurs structures et leurs caractéristiques qui permettent d'avoir un rendement et une absorption plus élevé et un grand intérêt en raison de leurs propriétés.

CHAPITRE III : Modélisation physique des cellules solaire multi-jonctions sur Atlas Silvaco

III.1. Introduction

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra de lier ses caractéristiques avec les propriétés du matériau et la technologie de fabrication afin d'améliorer ses performances et son rendement.

Le but de ce chapitre est la modélisation d'une cellule solaire multi-jonctions (simple et double-jonctions GaInP/GaAs) en vue d'optimiser par simulation ses caractéristiques physiques et géométriques de ses différentes couches.

III.2. Modélisation mathématique d'une cellule solaire

La modélisation mathématique joue un rôle important dans l'optimisation effective de la cellule solaire à réaliser. Par ces modèles, nous essayons de trouver un lien entre les propriétés des matériaux III-V utilisés (*GaAs*, *GaInP*, les alliages $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, et $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{In}_y\text{P}$) et les caractéristiques électriques et optiques des cellules solaires tout en mettant en évidence la recherche des paramètres technologiques optimaux qui assurent un meilleur rendement.

Le point de départ dans la modélisation des cellules solaires utilise l'approche basée sur le modèle physique des équations à semi-conducteur. Le modèle souhaité consiste essentiellement à résoudre en premier lieu les équations de base qui sont l'équation de Poisson, reliant la charge au potentiel électrostatique, et les équations de continuité pour les électrons et les trous.

En deuxième lieu plusieurs options additionnelles doivent être réunies et pris en compte dans ce modèle comme la présence de plusieurs couches dans la cellule ; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, introduit par les discontinuités dans les bandes d'énergie (E_c et E_v). Il devrait aussi, traiter correctement le problème de recombinaison et les centres de génération-recombinaisons dans les états profonds dans le volume des couches. Le modèle mathématique utilisé pour notre étude consiste au couplage entre les deux comportements électrique et optique effectuées généralement sur les cellules solaires non seulement la caractéristique $I(V)$, mais également la réponse spectrale. Enfin, la validation du modèle élaboré se traduit par la convergence, le calcul et l'obtention des résultats de simulation souhaités. Toutes ces options sont mises en application dans le logiciel de simulation Silvaco Atlas [36].

III.2.1. Modèles et équations de base des semi-conducteurs

Ces modèles consistent en un ensemble d'équations qui couplent le potentiel électrostatique et les densités de porteurs de charge dans un domaine de simulation bien précis. Ces équations, qui sont résolues dans le logiciel **Silvaco**, sont dérivées des équations de Maxwell. Elles sont principalement : L'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport.

III.2.1.1. L'équation de Poisson

L'équation de Poisson lie les variations dans le potentiel électrostatique aux densités locales de charge.

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (\text{III.1})$$

Où la densité de charge :

$$\rho(x) = e[\rho(x) - n(x) + N_d(x) - N_a(x)] \quad (\text{III.2})$$

Pour le calcul du potentiel, on a :

$$\frac{dv(x)}{dx} = -E(x) \quad (\text{III.3})$$

On trouve pour $0 < x < x_n$:

$$v(x) = (v_d - v_a) - \frac{eN_d}{2\epsilon_n}(x + x_p)^2 \quad (\text{III.4})$$

Les expressions de la largeur de la zone d'espace dans chacun des deux semi-conducteurs :

$$x_n = \left[\frac{2\epsilon_n\epsilon_p N_d(v_d - v_a)}{eN_d(N_a\epsilon_p + N_d\epsilon_n)} \right]^{1/2} \quad (\text{III.5})$$

$$x_p = \left[\frac{2\epsilon_n\epsilon_p N_d(v_d - v_a)}{eN_a(N_a\epsilon_p + N_d\epsilon_n)} \right] \quad (\text{III.6})$$

$$w = \left[\frac{2\epsilon_n\epsilon_p (N_d + N_a)^2 + (v_d - v_a)}{eN_d N_a (N_a\epsilon_p + N_d\epsilon_n)} \right] \quad (\text{III.7})$$

Nous pouvons aussi définir les valeurs de potentiel v_p et v_n dans chacune des deux régions **P** et **N** respectivement par :

$$v_n = (v_d - v_a) \left[\frac{N_a \epsilon_n}{N_a \epsilon_p + N_d \epsilon_n} \right] \quad (\text{III.8})$$

$$v_p = (v_d - v_a) \left[\frac{N_d \epsilon_n}{N_a \epsilon_p + N_d \epsilon_n} \right] \quad (\text{III.9})$$

III.2.1.2. Les équations de transport

Les modèles de transport de charge, sont généralement obtenus en appliquant les approximations et les simplifications de l'équation de transport de Boltzmann. Ces hypothèses mènent à un certain nombre de modèles de transport : tels que le modèle de dérive-diffusion, le modèle de transport à l'équilibre énergétique ou modèle hydrodynamique.

Pour le modèle de dérive-diffusion [37], Les densités de courant dans les équations de continuité peuvent être exprimées en termes de niveaux de quasi-Fermi ϕ_n et ϕ_p comme mentionner précédemment dans le chapitre I par les équations (I.8) et (I.9).

Les niveaux quasi-fermis sont alors liés aux concentrations de porteurs et au potentiel grâce aux deux approximations de Boltzmann :

$$n = n_i \exp \left[\frac{q(\Psi - \phi_n)}{kT_L} \right] \quad (\text{III.10})$$

$$p = n_i \exp \left[\frac{-q(\Psi - \phi_p)}{kT_L} \right] \quad (\text{III.11})$$

Où :

n_i est la concentration intrinsèque effective,

T_L est la température du réseau.

Les expressions de densité, obtenues sont :

$$\vec{J}_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \Psi - \mu_n n (kT_L \nabla (\ln n_i)) \quad (\text{III.12})$$

$$\vec{J}_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \Psi + \mu_p p (kT_L \nabla (\ln n_i)) \quad (\text{III.13})$$

Les champs électriques effectifs sont définis par :

$$\vec{E}_n = -\nabla \left(\Psi + \frac{kT_L}{q} \ln n_i \right) \quad (\text{III.14})$$

$$\vec{E}_p = -\nabla \left(\Psi - \frac{kT_L}{q} \ln n_i \right) \quad (\text{III.15})$$

III.2.1.3. L'équation du courant de déplacement

Pour la simulation dans le domaine temporel, l'expression du courant de déplacement est donnée par :

$$\vec{J}_{dis} = \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{III.16})$$

III.2.1.4. Processus de génération-recombinaison des porteurs

Les principaux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge libres dans les semi-conducteurs sont : les recombinaisons non radiatives (émission Auger, recombinaison Shockley-Read-Hall (**SRH**)) et les recombinaisons radiatives (émission spontanée, émission stimulée) (voir **Figure I.5**).

III.2.2. Modèles de mobilité

La mobilité des porteurs de charge dépend de nombreux paramètres tels que la température, le dopage, ou encore les collisions des porteurs entre eux ou avec les impuretés. Dans ce paragraphe, nous présentons les modèles physiques de mobilité.

III.2.2.1. Modèle de mobilité Caughey et Thomas

L'expression de Caughey et Thomas [42] implémentée dans SILVACO met en évidence la dépendance de la mobilité en fonction d'un fort champ électrique.

Les expressions de la mobilité des électrons et des trous sont données par :

$$\mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{v_{nsat}} \right)^{\beta_n}} \right]^{\frac{1}{\beta_n}} \quad (\text{III.17})$$

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{v_{psat}} \right)^{\beta_p}} \right]^{\frac{1}{\beta_p}} \quad (\text{III.18})$$

Où :

E est le champ électrique parallèle.

v_{nsat} et v_{psat} les vitesses de saturation des électrons et des trous.

β_n et β_p les coefficients de l'exposant.

III.2.2.2. Modèle de mobilité Massetti

Dans un semi-conducteur dopé, la nature de ce dernier ainsi que la valeur de son dopage influent sur la mobilité. Cela est dû à la dispersion des porteurs par collision avec les impuretés fixes qui a pour conséquence la dégradation de la mobilité.

Les expressions de la mobilité des électrons et des trous sont données par [43] :

$$\mu_n = \mu_{min1.n} \exp\left(\frac{-P_{c.n}}{N}\right) + \frac{\mu_{max.n} - \mu_{min2.n}}{1 + \left(\frac{N}{C_{r.n}}\right)^{a.n}} - \frac{\mu_{1.n}}{1 + \left(\frac{C_{S.N}}{N}\right)^{\beta.n}} \quad (\text{III.19})$$

$$\mu_p = \mu_{min1.p} \exp\left(\frac{-P_{c.p}}{N}\right) + \frac{\mu_{max.p} - \mu_{min2.p}}{1 + \left(\frac{N}{C_{r.p}}\right)^{a.p}} - \frac{\mu_{1.p}}{1 + \left(\frac{C_{S.P}}{N}\right)^{\beta.p}} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

N est la concentration totale des impuretés ionisées.

$\mu_{max.n}$ et $\mu_{max.p}$ sont les mobilités qui tiennent compte des interactions électrons-photons,

$\mu_{max1.n}$, $\mu_{max1.p}$, $\mu_{max2.n}$, $\mu_{max2.p}$ sont les mobilités de référence,

$P_{c.n}$, $C_{r.n}$, $C_{S.N}$, $P_{c.p}$, $C_{r.p}$, $C_{S.P}$ sont les niveaux de référence du dopage,

a_n , β_n , a_p , β_p , sont des coefficients de l'exposant.

III.2.2.3. Modèle de mobilité Canali

Le modèle de Canali a été implémenté en fixant les valeurs de $\beta \cdot n$ et $\beta \cdot p$ dans le modèle de Caughey-Thomas [44].

Les expressions sont données par :

$$\beta \cdot n = \beta_{0,n} \left(\frac{T_L}{300} \right)^{\beta_{exp,n}} \quad (III.21)$$

$$\beta \cdot p = \beta_{0,p} \left(\frac{T_L}{300} \right)^{\beta_{exp,p}} \quad (III.22)$$

III.3. Modélisation des cellules solaires dans Atlas Silvaco

En raison du coût élevé de l'expérience, l'outil simulation est devenu primordial pour le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant du temps et de l'argent.

Dans ce contexte, nous avons choisi de travailler avec le simulateur Silvaco Atlas vue qu'il est très utilisé en photovoltaïque et il dispose de larges études intégrées dans l'élaboration et la caractérisation des composants optoélectronique. Son succès a poussé ses auteurs à le développer continuellement.

III.3.1. Présentation du logiciel Silvaco Atlas

Parmi les outils de simulation, Silvaco Atlas qui est une entreprise spécialisée dans la création de logiciels de simulation et cible presque tous les aspects de la conception électronique moderne et microélectronique. L'entreprise fournit des capacités de modélisation et de simulation à partir de circuits simples de type Spice jusqu'aux schémas des circuits intégrés de pointe et des outils TCAD. Ces outils permettent de créer des modèles complexes et des structures 3D en utilisant des environnements et un grand nombre de différentes options de modélisation pour faciliter la conception (voir **Figure III.1**) [36].

Silvaco Atlas est conçu pour être utilisé avec les outils interactifs de **VIRTUAL WAFER FAB (VWF)** (**Figure III.1**). **VWF** aide à effectuer la simulation efficacement sans avoir recours à d'autres logiciels. Silvaco avec **VWF** propose des logiciels de simulation puissants rapides à savoir :

- **DEVEDIT** : est un outil interactif pour la spécification de la structure et du maillage ainsi que le raffinement.

- **DECKBUILD** : fournit un environnement d'exécution interactive.
- **TONYPLOT** : fournit des capacités de visualisation scientifique.
- **MASKVIEWS** : est un éditeur de masque pour le circuit intégré IC.
- **OPTIMIZER** : supports d'optimisation à travers de multiples simulateurs.

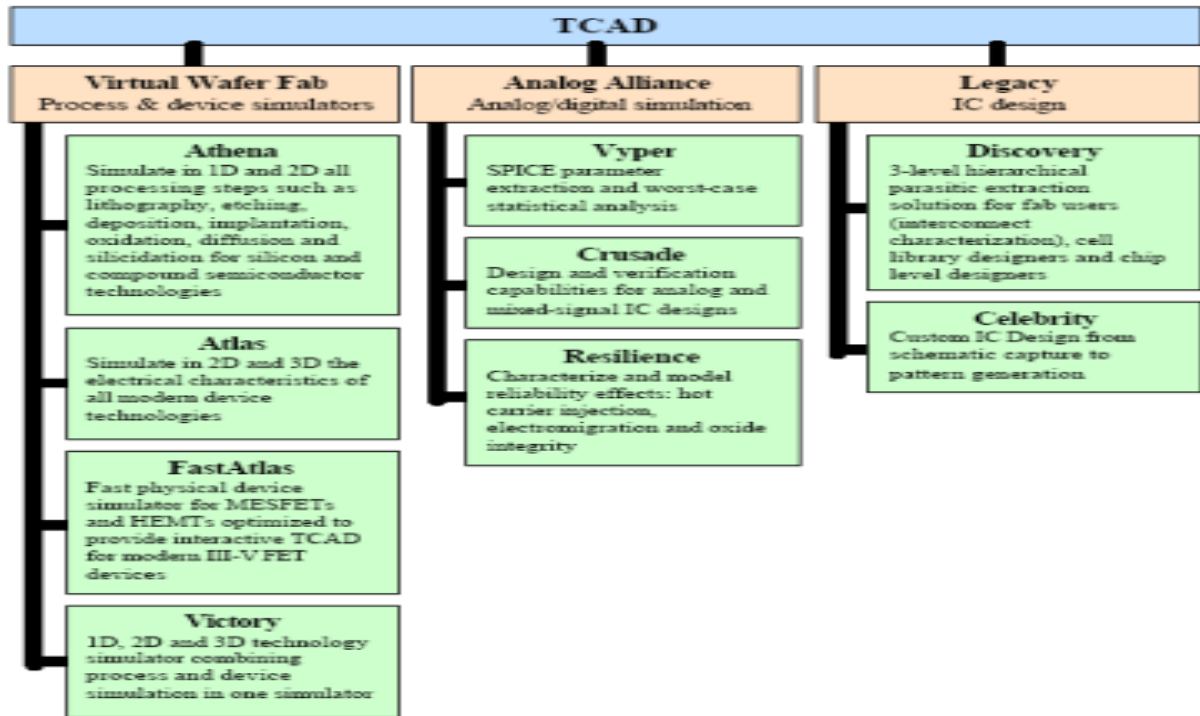


Figure III.1 : Outils du logiciel Silvaco's TCAD [45].

III.3.1.1. Structure du fichier d'entrée

Silvaco Atlas reçoit les fichiers d'entrée via DeckBuild. Lorsque nous entrons dans les groupes de commandes sont répertoriés selon la **Figure III.2** ci-dessous.

Group		Statements
1. Structure Speciflcation	————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Speciflcation	————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	————	METHOD
4. Solution Speciflcation	————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	————	EXTRACT TONYPLOT

Figure III.2 : Commandes et instructions principales dans Atlas [36].

III.3.1.2. Spécification de la Structure

La spécification de la structure est obtenue en identifiant :

- **Le maillage** : C'est une série de lignes horizontales et verticales avec espacement entre eux. Celui utilisé dans ce travail est bidimensionnel. Par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis.
- **Les régions** : après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions en spécifiant le code qui les définit. Les limites de chaque région sont explicitement identifiées dans les axes x et y. Ces régions doivent alors spécifiées un matériau qui est à son tour définit par un code couleur. Les régions sont constituées par des lignes verticales et horizontales pour marquer leurs limites.
- **Les électrodes** : Dans notre simulation les seules électrodes définies sont l'anode et la cathode. Cependant, Silvaco Atlas a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Notez que la cathode est définie avec de l'or comme matériau. Les dimensions x et y correspondent à la région définie. Alors que l'anode est définie au bas de notre dispositif pour toute la plage des x à $y = 0$.
- **Dopage et niveaux de dopage** : le dopage peut être de type n ou de type p alors que le type de distribution peut être uniforme ou gaussien.

III.3.1.3. Spécification du modèle de matériaux

La spécification du modèle de matériaux est donnée par :

- **Matériau** : La première spécification du terme **MATERIAL** est la déclaration. Lorsque **MATERIAL** apparaît une seconde fois est considéré comme un paramètre de localisation (REGION et NAME). D'autres paramètres du matériau sont : la bande interdite à température ambiante (EG300). La mobilité électronique (MUN), les durées de vie de recombinaison d'électrons (TAUN0) et de trous (TAUP0), densité de bande de conduction à température ambiante (NC300), etc.
- **Modèles** : Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories : mobilité, recombinaison, statistiques des porteurs, ionisation par impact et effet tunnel. Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.
- **Contact** : Il détermine les attributs de l'électrode. Voici un exemple de la déclaration de contact : **CONTACT NAME = Anode current.**
- **Interface**

III.3.1.4. Sélection des méthodes numériques

Le fonctionnement des dispositifs semi-conducteurs est modélisé dans Silvaco Atlas par un ensemble d'un à six équations aux dérivées partielles couplées, non linéaires (PDE). Atlas produit des solutions numériques de ces équations en calculant les valeurs d'inconnues sur un maillage de points dans le dispositif.

La méthode de résolution non linéaire et les paramètres associés tels que l'itération et les critères de convergence, sont spécifiés dans l'instruction **METHOD**. Les méthodes de solution d'itération non linéaire sont spécifiées dans l'instruction **METHOD** à l'aide des paramètres **NEWTON**, **GUMMEL** ou **BLOCK**.

- **Méthode de Gummel**

Chaque itération de la méthode de Gummel résout une séquence de sous-problèmes linéaires relativement petits. Les sous-problèmes sont obtenus en linéarisant une équation de l'ensemble par rapport à sa variable de la solution primaire, tout en conservant les autres variables à leur dernière valeur calculée.

- **Méthode de Newton**

Chaque itération de la méthode Newton résout une version linéaire de l'ensemble non linéaire d'un système algébrique. La taille du problème est relativement grande et chaque itération prend un temps relativement long. L'itération, cependant, convergera normalement rapidement (dans environ trois à huit itérations) tant que l'estimation initiale est suffisamment proche de la solution finale.

• Itération de Bloc

Atlas propose plusieurs schémas d'itération par blocs qui sont très utiles lors du chauffage de réseau où les équations du bilan énergétique sont prises en compte. [help atlas].

Dans Atlas, toute combinaison des paramètres : *GUMMEL*, *BLOCK* et *NEWTON* peut être spécifiée sur l'instruction **METHOD**.

III.3.1.5. Spécification de la solution

La spécification de la solution est donnée par :

- **Log** : **LOG** enregistre toutes les caractéristiques du dispositif dans un fichier data :(DC, transitoires, AC) généré par une instruction **SOLVE**.
- **Solve** : **SOLVE** effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- **Load** : L'instruction **LOAD** permet de télécharger les solutions précédentes à partir des fichiers comme estimation initiale à d'autres valeurs de polarisation.
- **Save** : L'instruction **SAVE** enregistre toutes les informations du nœud dans un fichier de sortie.

III.3.1.6. TonyPlot

Cette instruction fait l'analyse des résultats. Une fois qu'une solution a été trouvée pour un dispositif à semi-conducteur, les résultats peuvent être affichés graphiquement avec « **TonyPlot** ». De plus, les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec l'instruction **EXTRACT**.

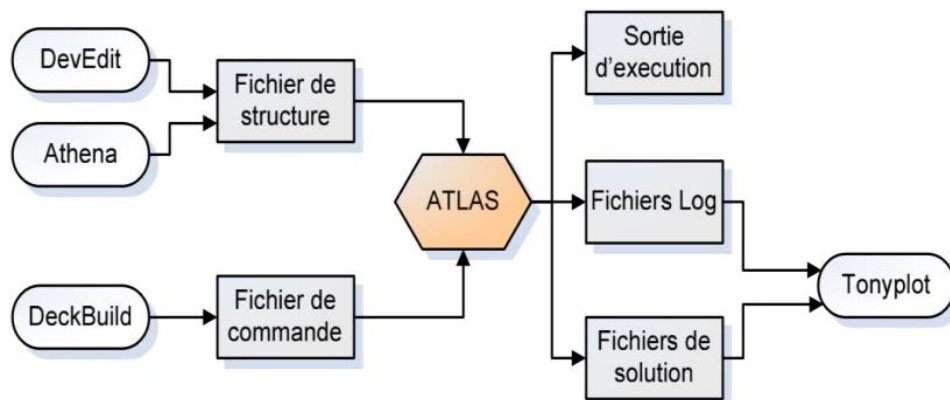


Figure III.3 : Entrées et sorties dans Atlas Silvaco [36].

III.3.2. Modèles utilisés pour notre cellule solaire dans Silvaco

III.3.2.1. Modèles physiques utilisés pour notre cellule solaire dans Silvaco

Le logiciel SILVACO met à notre disposition une grande variété de modèles physiques. Ces modèles sont pratiquement utilisés dans tous les dispositifs à base de semi-conducteurs en prenant compte de tous les mécanismes physiques misent en jeu. La précision des résultats de simulations numériques dépend fortement du choix des modèles physiques utilisés pour décrire le fonctionnement des cellules solaires.

Nous tenons à informer que tous les modèles physiques présentés dans la section Blaze (Silvaco) [36] sont dédiés pour le silicium. Alors que les modèles physiques dépendant des matériaux III-V, II-VI et ternaires ont été mis en œuvre dans Blaze pour tenir compte de la dépendance de la fraction molaire et des propriétés de ces matériaux.

Afin d'optimiser la cellule solaire efficacement, les modèles physiques incorporés dans la simulation (**Blaze**) doivent être sélectionnés avec soin. Les principaux modèles physiques utilisés pour la conception de toute cellule solaire sont :

- **Mobility CVT** : Pour activer la dépendance de la mobilité sur le champ transversal, le dopage et la température.
- **Recombinaison optique OPTR** : pour activer la recombinaison de bande à bande pour les semi-conducteurs à bande directe.
- **Shockley-Read-Hall SRH** : Pour activer la recombinaison. Il utilise des durées de vie des porteurs minoritaires fixes.
- **Recombinaison Auger AUGER** : Pour activer la transition directe de trois porteurs. Utile aux densités de courant élevées.
- **Statistiques de Fermi Fermi** : Pour activer les statistiques des porteurs. Convient aux régions fortement dopées.

Dans notre étude, pour activer ces modèles dans Silvaco Atlas, spécifiez sur l'instruction :

**MODELS : MODELS CONMOB FLDMOB SRH ANALYTIC CDL
TRAP.AUGER MOBILITY**

III.3.3. Modèles utilisés dans la partie Luminous dans Silvaco Atlas

Par souci de clarté, nous allons présenter les noms des différents modèles qui sont utilisés afin de modéliser notre cellule solaire. La partie **Luminous** dans Silvaco effectue une simulation électrique et optique couplée.

Luminous fonctionne avec Blaze (modèles physiques) et nous permet de :

- **Solar spectrum model** : activer par l'instruction **BEAM** pour simuler la réponse de la cellule à l'illumination par le spectre solaire. L'origine et l'angle d'incidence doivent être définis. Un angle de 90 degrés signifie une incidence normale du haut. Le paramètre `power.file` pointe vers un fichier externe qui contient une liste de longueurs d'onde en fonction de l'intensité. Le fichier *"myresults.spec"* contient des données pour le spectre solaire « Air Mass multi-spectral source AM1.5 or AM0 ».
- **Transfer matrix algorithm** : est activé à l'aide du paramètre **TR.MAT** de l'instruction **BEAM**. Il est utilisé pour illustrer certains des problèmes d'interprétation des résultats sur des dispositifs optiquement épais. De plus, pour tenir compte de l'interférence cohérente dans les couches minces et l'utilisation d'interfaces diffusives pour tenir compte des effets de piégeage de la lumière dans les surfaces texturées.
- **DIFFUSE model** : activer par l'utilisation de l'instruction **DIFFUSE** paramètre de l'instruction **BEAM**. Il permet la spécification d'interfaces diffusives sur les instructions **INTERFACE**.
- **Model quantum tunneling** : nous permet la spécification de « **auxiliary quantum tunneling mesh** ». La spécification de ce maillage est nécessaire pour notre cellule solaire DJ.
- **Non-local band-to-band tunneling model NLBBT** : Pour activer le tunneling spatial qui se produit à travers les cellules du haut et du bas de notre cellule tandem DJ à travers la jonction du le modèle NLBBT doit être activé et peut être couplé à différentes relations de structure de bande.

III.4. Directives utilisées dans notre modélisation

Dans notre modélisation, la stratégie utilisée est la suivante :

- Construction de la géométrie, dopage de la cellule solaire.
- Simulation sous éclairage et sans éclairage (Dark) des caractéristiques I-V et P-V,
- Simulation de la réponse spectrale,
- Il est possible de mémoriser l'intensité optique de l'éclairage en spécifiant `output opt.int` à tout moment avant d'enregistrer un fichier de structure. Le taux de photogénération apparaîtra par défaut dans le fichier de structure de la solution.

- Notre modèle élaboré dans **Silvaco Atlas** devait aboutir à l'extraction des paramètres des cellules solaires étudiées dans ce mémoire (J_{sc} , V_{oc} , FF , η , P_m , ...) par l'utilisation de l'instruction **EXTRACT**.

Quelques directives ont été mis afin de valider et aboutir aux buts souhaités dans cette étude sont :

- Nous avons commencé avec le schéma GUMMEL, Si la convergence n'a pas eu lieu dans un certain nombre d'itérations, nous avons basculé sur NEWTON. Cela est dû que l'itération Gummel peut affiner la solution initiale jusqu'à un point à partir duquel l'itération Newton peut converger.
- Le nombre d'itérations initiales de GUMMEL est limité par **GUM. INIT**.
- Lorsque l'éclairage est important pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il est important d'ajuster leur emplacement, leur orientation et leur intensité. Le spectre de la lumière peut être décrit avec tous les détails nécessaires (longueur d'onde, ...). La polarisation, la réflectivité et la trace de rayons font également partie des avantages du logiciel Silvaco Atlas.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détails une modélisation d'une cellule solaire. Cette modélisation repose sur le choix des modèles physiques implantés dans le logiciel Silvaco et qui consiste à un couplage entre les deux comportements électrique et optique.

Afin de réussir notre modélisation, nous faisons appel aux modèles suivants : modèle de recombinaison Shockley Read Hall (**SRH**), modèle de mobilité à faible champ (**CONMOB**) et modèle **Auger** afin d'améliorer la précision des résultats de simulation numérique.

La modélisation présentée dans ce chapitre devait aboutir à une présentation des résultats de simulation dans le logiciel **Silvaco** d'une cellule solaire (simple et DJ), dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : Simulation numérique et discussion des résultats

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est la simulation numérique des cellules solaires (double jonction) (InGaP/GaAs) en utilisant le logiciel deux dimensions **Atlas Silvaco**, sous un éclairage AM1.5G avec $P=0,1\text{W/cm}^2$, non seulement pour la compréhension de leurs mécanismes qui sont très importants dans leur développement, mais aussi pour désigner et optimiser d'autres structures. De même, la description exacte de leurs propriétés optoélectroniques est une étape cruciale pour développer et prévoir leurs applications technologiques. Le choix des matériaux est un critère essentiel pour la durée de vie et la fiabilité de cette cellule. Notre étude focus sur l'utilisation des matériaux III-V $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{In}_y\text{P}$, $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$, GaAs et $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$).

L'étude présentée devait aboutir à déterminer les caractéristiques électriques courant-tension de ces cellules et aussi de calculer les paramètres photovoltaïques liés à ces caractéristiques tels que : la densité du courant de court-circuit (J_{sc}), la tension en circuit-ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF), la puissance maximale (P_{max}), le rendement de conversion photovoltaïque (η) et la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde du spectre.

IV.2. Simulations

Notre méthodologie de simulation utilisée est une technique d'optimisation qui consiste en premier lieu à l'étude de la cellule solaire d'une seule jonction à base des absorbeurs (GaInP), et (GaAs) séparément, en vue d'optimiser par simulation leur caractéristiques physiques et géométriques des différentes couches constituant chaque cellule.

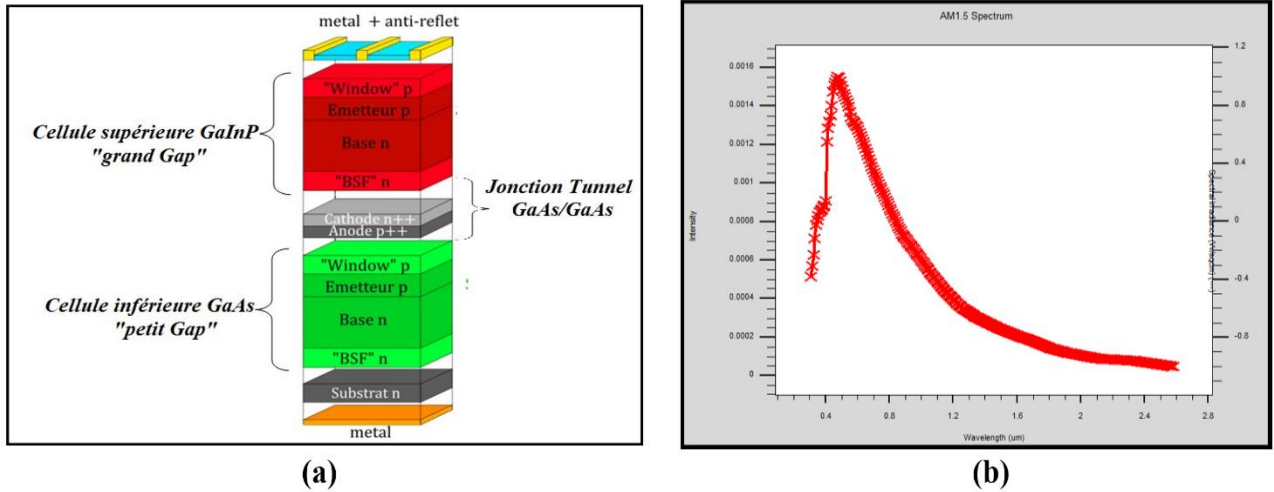


Figure IV.1 : (a) Structure DJ GaInP/GaAs à simuler. (b) Spectre solaire AM1.5 illuminant la cellule.

Les résultats obtenus de ces paramètres photovoltaïques calculés liés à ces caractéristiques vont être utilisés dans **Silvaco Atlas** pour développer des programmes de simulation des cellules solaires (double jonction) à base des absorbeurs (GaInP/GaAs). Nous finirons par l'optimisation de performances des cellules solaires DJ (voir **Figure IV.1**) effectuée en variant l'épaisseur, et le dopage de chaque couche de la cellule.

À cet effet, les modèles utilisés le long de ce mémoire dépendent fortement des paramètres fondamentaux calculés et représentés dans le **Tableau IV.1** ci-dessous.

Tableau IV.1 : Principaux paramètres exigés des matériaux optimaux utilisés pour la conception de la cellule solaire DJ InGaP/GaAs [46], [47].

Paramètres / Matériau	GaAs	$\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$(\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63})_{0.49}\text{In}_{0.51}\text{P}$
Paramètre de maille(A^0)	5,6533	5,659	5,65	5,65
E_g300 (eV)	1,42	2,09	1,9	2,1744
Permittivité ϵ	13,2	11,77	11,8	12,16
TAUN (s)	1,00E-09	1,00E-09	4,00E-09	1,00E-09
TAUP (s)	2,00E-08	2,00E-08	4,00E-09	2,00E-08
Affinité électronique (eV)	4,07	3,535	4,09	4,26
MUN ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	8800	212,2	1945	1000
MUP ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	400	67,6	141	500
e- densité d'état N_c300	4,350E17	1,58E19	6,55E17	9,13E17
h+ densité d'état N_v300	1,29E19	1,5E19	1,5E19	7,81 $^{\circ}$ 18
Vitesse therm : V_{thn} (m/s)	4,4E05	2,825E05		
Vitesse therm : V_{thp} (m/s)	-	9,75E04		
COPT (cm^3s^{-1})	4,5E-10	1,5E-10	1E-10	1,5E-10

AUGN (cm⁶s⁻¹)	5,0E-30	5,0E-30	3E-30	—
AUGP (cm⁶s⁻¹)	1,0E-31	1,0E-31	3E-30	43

IV.2.1. Cellule solaire supérieure à base d'absorbeur GaInP

L'objectif de cette partie est de construire la cellule solaire supérieure conçue et simulée en utilisant **Silvaco ATLAS** comme illustré à la **Figure IV.2**, puis d'améliorer son efficacité.

La structure de la cellule supérieure est constituée de : la couche (Al_xGa_{1-x-y})In_yP est utilisée comme une fenêtre optique placée en haut de la cellule, suivie par deux couches de Ga_(1-x)In_xP qui servent comme un émetteur (type N) et une base (type P), alors que la couche BSF à base de (Al_xGa_{1-x-y})In_yP.

Les paramètres géométriques utilisés dans la simulation sont donnés au **Tableau IV.2**.

Tableau IV.2 : Paramètres des différentes couches de la cellule solaire supérieure.

	Fenêtre (p) (Al_{0.37}Ga_{0.63})_{0.51}In_{0.49}P	Emetteur(p) In_{0.49}Ga_{0.51}P	Base(n) In_{0.49}Ga_{0.51}P	BSF(n) (Al_{0.37}Ga_{0.63})_{0.51}In_{0.49}P
Epaisseur (μm)	0,03	0,08	0,55	0,05
Dopage (cm⁻³)	2E18	2,2E18	2,8E16	2,1E16

Après le maillage (2D) de la cellule solaire supérieure, le simulateur évalue numériquement la résolution des équations à chaque nœud du maillage. Le bon choix de maillage nous conduit à obtenir des résultats de simulation précis où les algorithmes numériques appliqués convergent rapidement. Le maillage est formé en prenant un soin particulier pour le rendre plus dense près de la jonction et d'avoir suffisamment de points par couche.

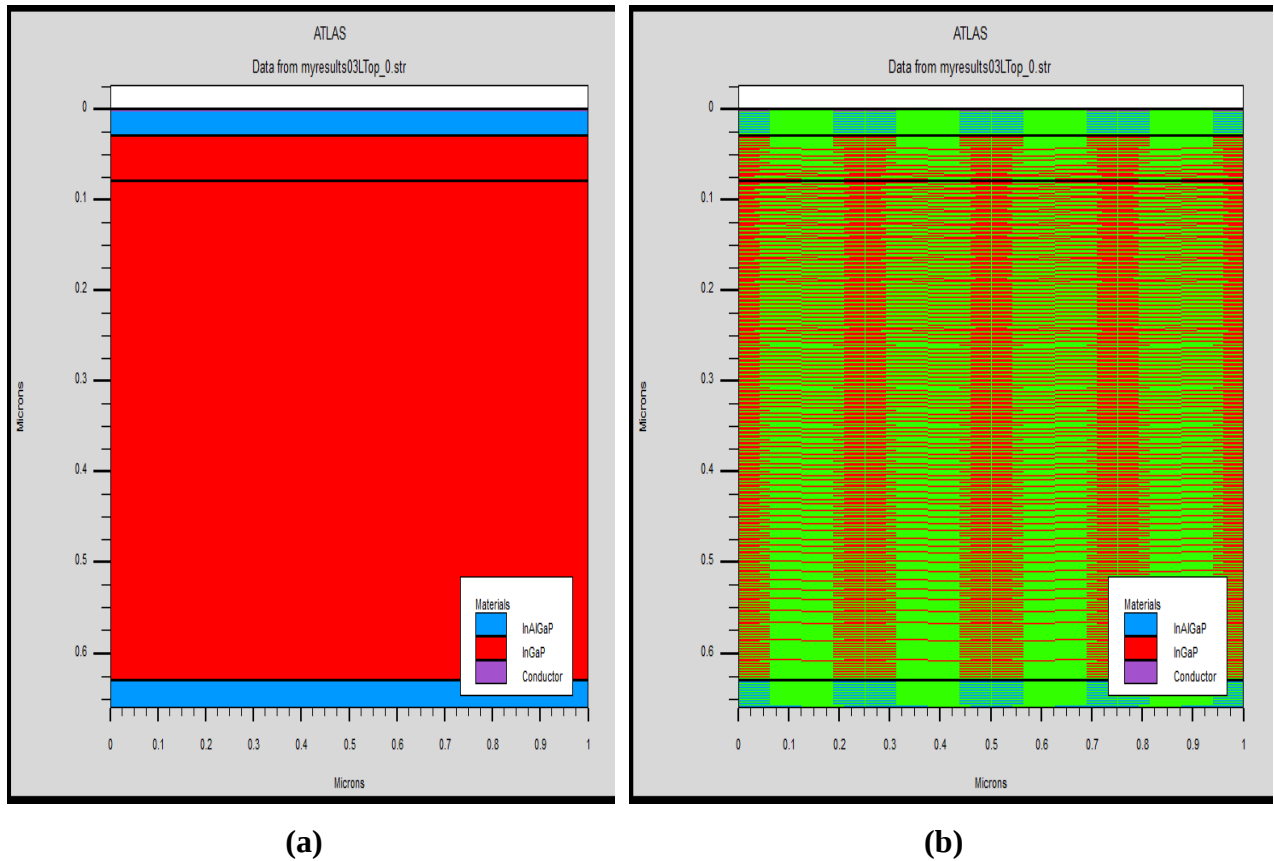


Figure IV.2 : Structure, maillage et dopage de la cellule solaire supérieure à base de GaInP.

IV.2.1.1. Caractéristiques électriques et optiques

Une fois le modèle est implanté et validé, nous allons présenter une série de résultats de simulation qui nous aide à comprendre profondément le principe de fonctionnement de la cellule et les paramètres influents son rendement à l'aide du logiciel Silvaco. Pour mieux comprendre le fonctionnement interne et l'évolution électrique et optique de la cellule étudiée, nous allons procéder à une coupe verticale (cutline). Les **Figure IV.3** et **Figure IV.4** représentent respectivement les bandes de conduction, de valence, l'évolution du potentiel en profondeur sous l'éclairement AM1.5G.

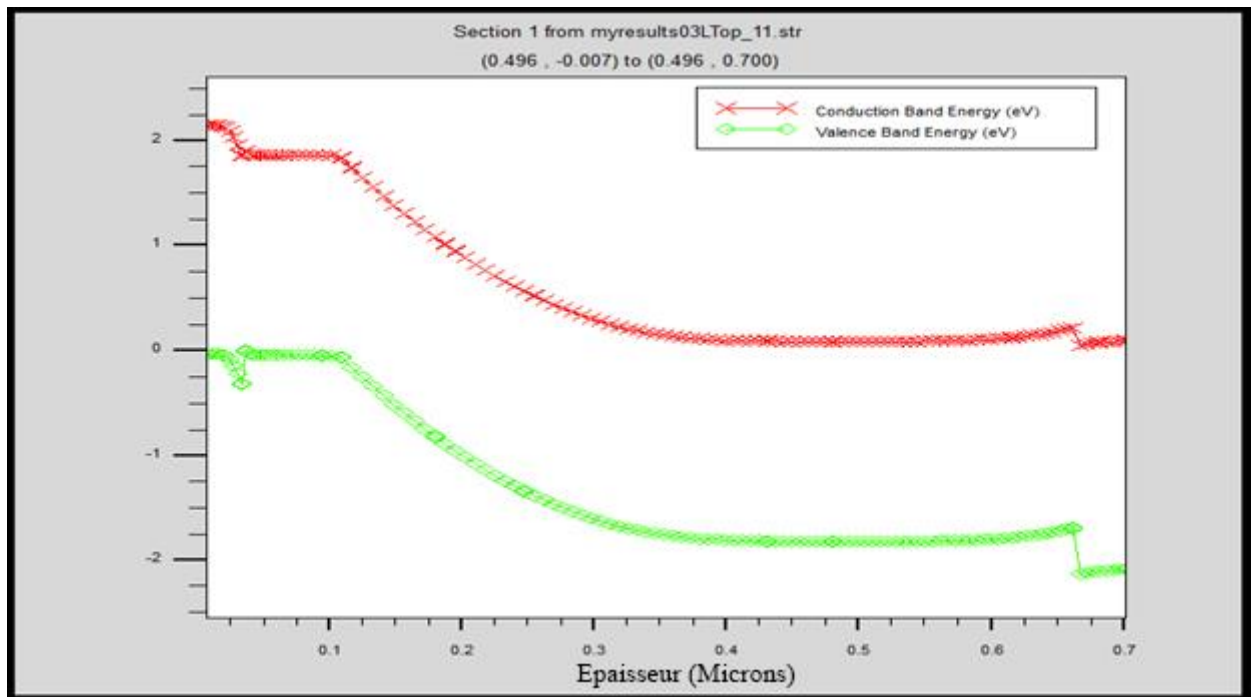


Figure IV.3 : Diagramme de bande de la cellule Top GaIn .

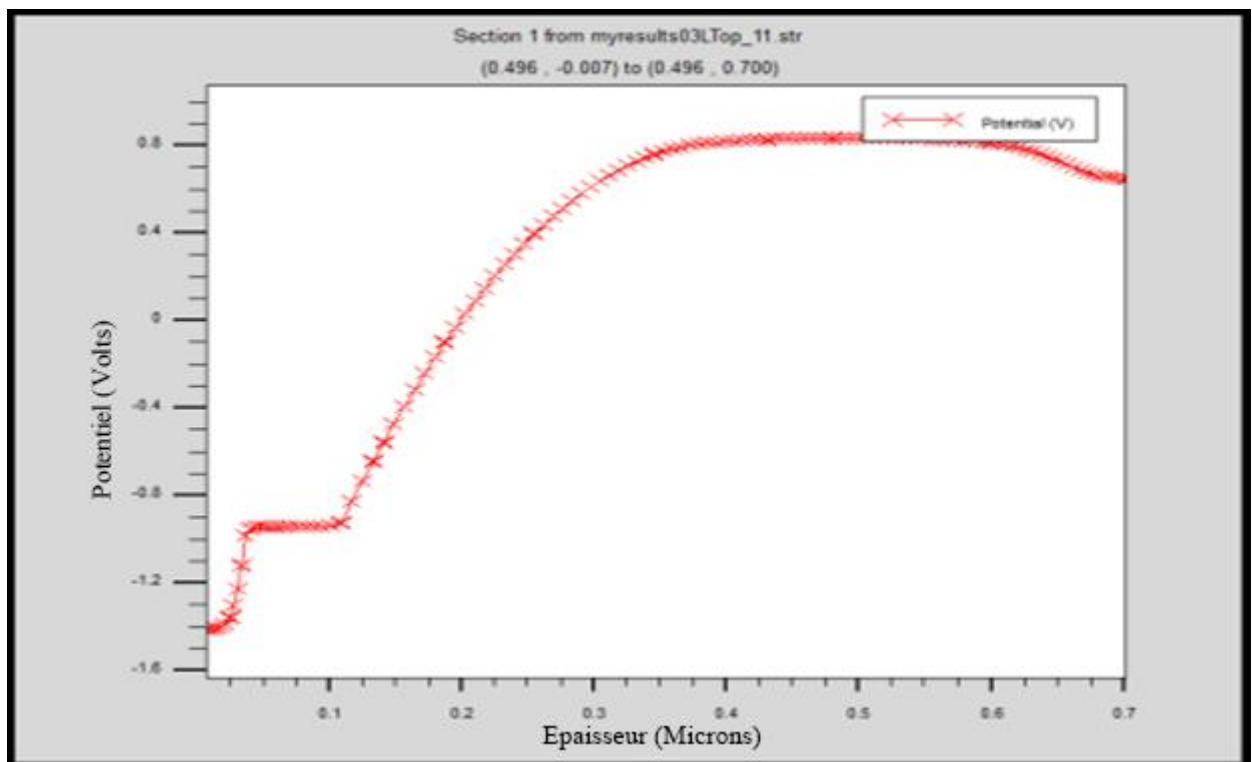


Figure IV.4 : Potentiel de la cellule Top GaInP.

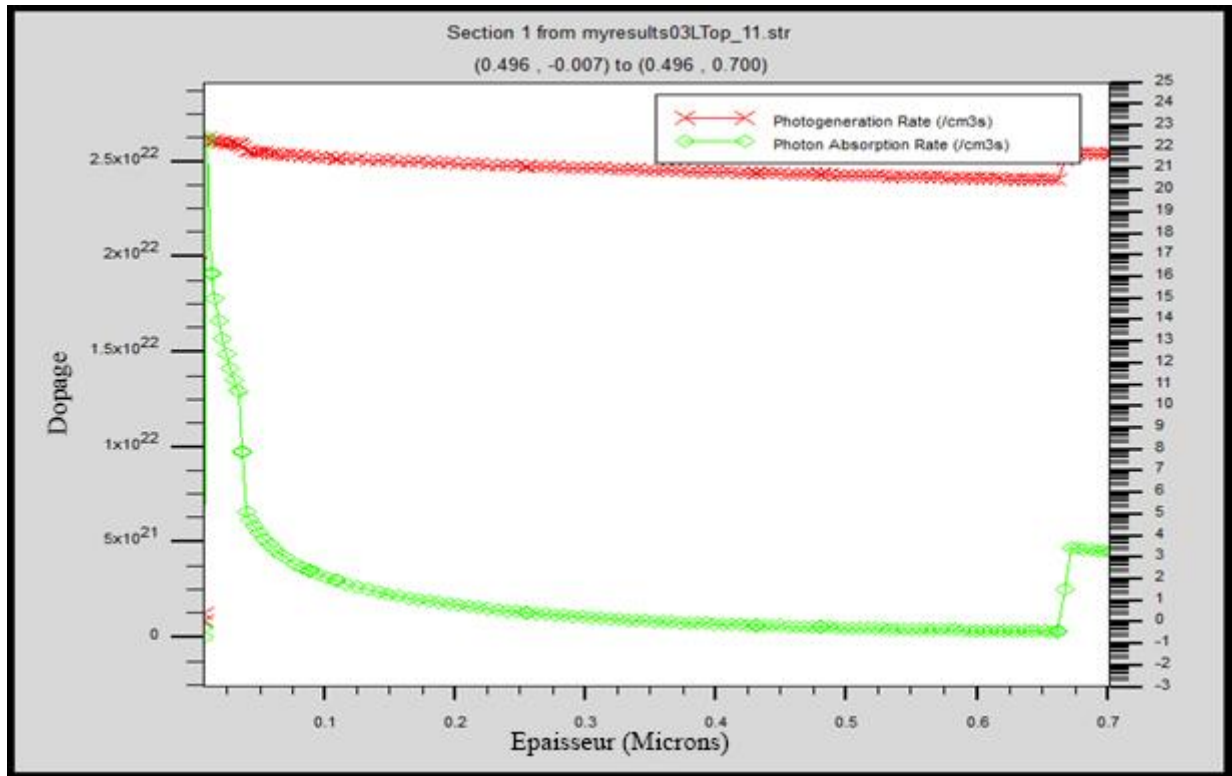


Figure IV.5 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule Top GaInP.

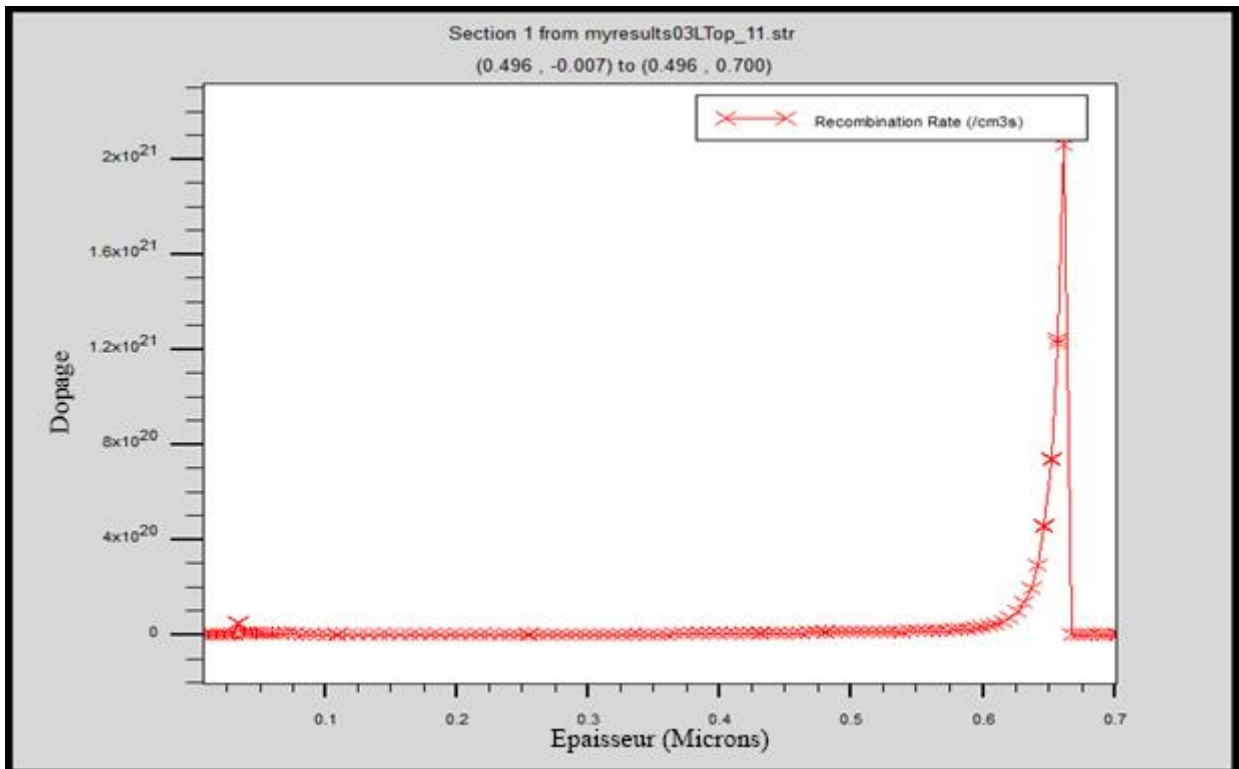


Figure IV.6 : Taux de recombinaison de la cellule Top GaInP.

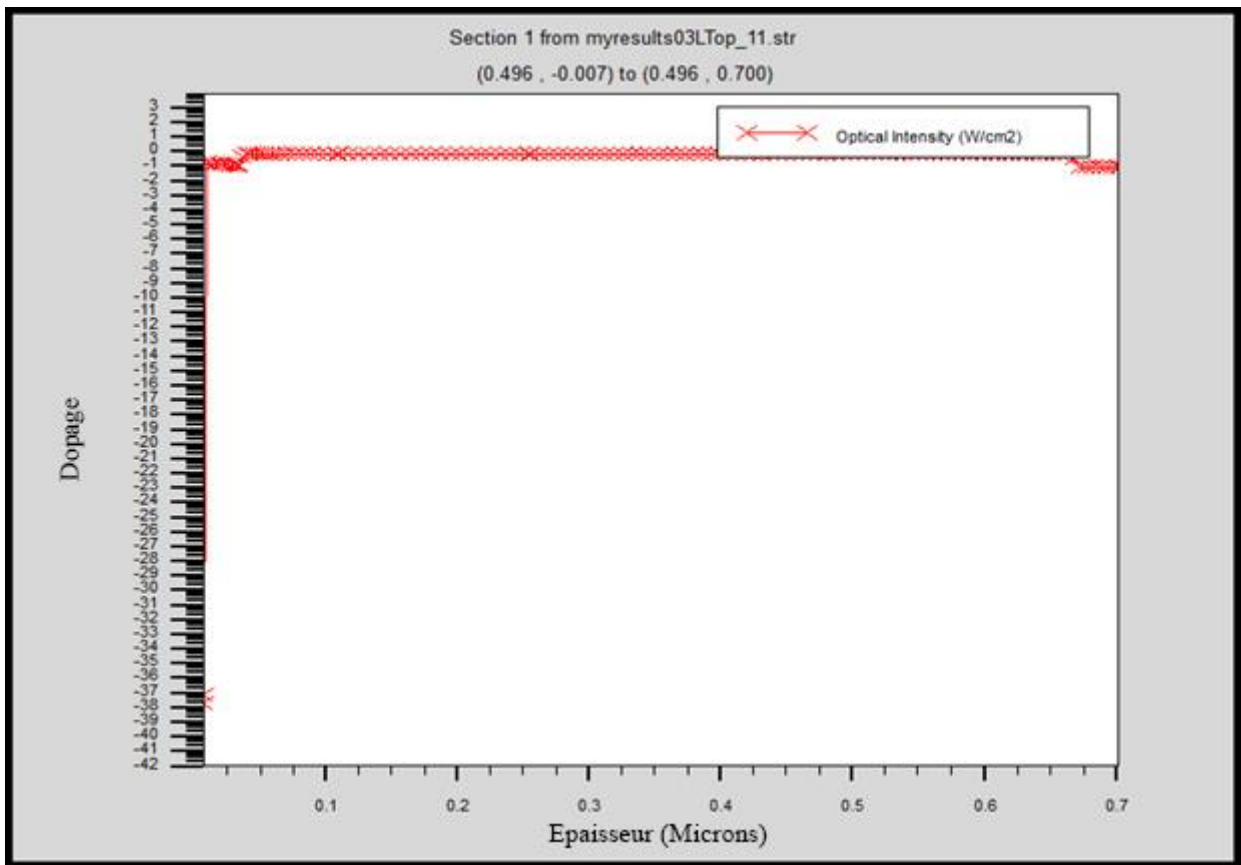


Figure IV.7 : Intensité optique pour la cellule Top GaInP.

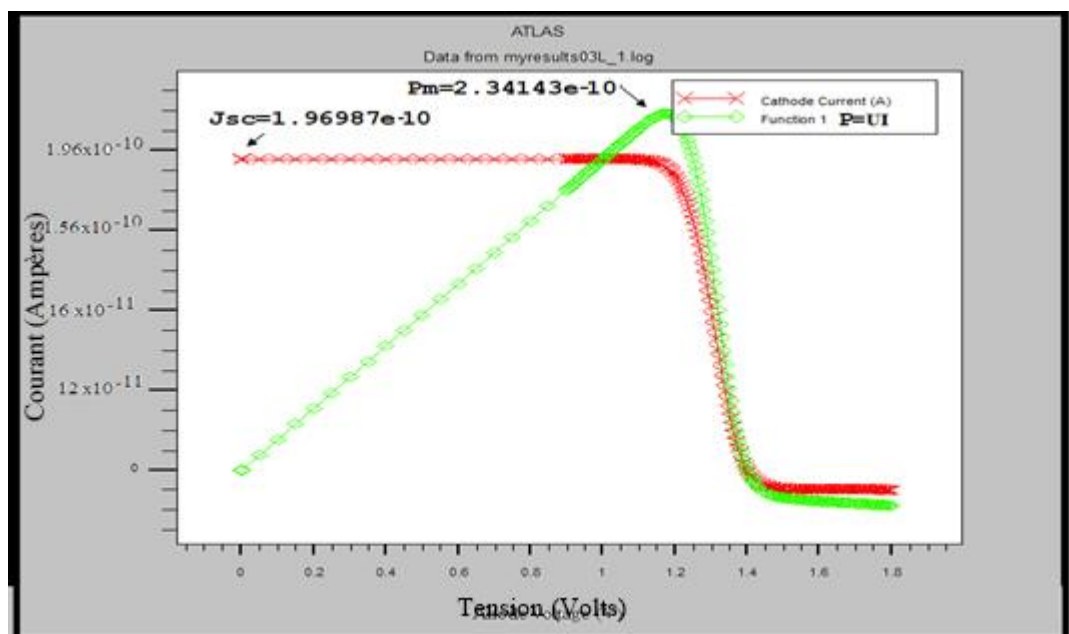


Figure IV.8 : Variation de courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule Top GaInP.

A partir de cette caractéristique J-V, nous allons extraire les paramètres photovoltaïques calculés par Silvaco de la cellule étudiée (J_{sc} , V_{oc} , FF , P_{max} , η) et qui sont illustrés dans le **Tableau IV.3**.

Tableau IV.3 : Paramètres photovoltaïques de la cellule Top GaInP simulés sous éclairement AM1.5G.

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	P_m (W/cm ²)	FF (%)	Opt_int	η (%)	EQE_top
Résultats	19,6987	1,40005	2,34143 E-10	84,8985	0,138049	16,9609	1114,16

Dans le but d'utiliser la cellule GaInP comme cellule supérieure de la DJ GaInP/GaAs, il s'avère nécessaire d'améliorer ses performances et cela est assuré par l'optimisation de ses paramètres technologiques (épaisseur et dopage de chaque couche : émetteur, base et BSF).

Enfin, le **Tableau IV.4** résume les paramètres optimaux qui induisent à l'amélioration considérable des performances de notre cellule GaInP en particulier le rendement de conversion photovoltaïque (η).

Tableau IV.4 : Paramètres géométriques et physiques optimaux de la cellule Top GaInP simulés sous éclairement AM1.5G.

	Fenêtre (p) (Al _{0.37} Ga _{0.63}) _{0.51} In _{0.49} P	Emetteur(p) In _{0.49} Ga _{0.51} P	Base(n) In _{0.49} Ga _{0.51} P	BSF(n) (Al _{0.37} Ga _{0.63}) _{0.51} In _{0.49} P
Epaisseur (μm)	0,05	0,08	0,55	0,05
Dopage (cm⁻³)	2,6E17	2,2E18	7,6E17	8,1E20

Tableau IV.5 : Paramètres photovoltaïques optimaux de la cellule Top GaInP simulés sous éclairement AM1.5G.

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	P_m (W/cm ²)	FF (%)	Opt_int	η (%)	EQE_top
Résultats	22,3768	1,49483	2,86189E-10	85,5585	0,138049	20,731	612,755

Nous constatons que notre étude a induit une amélioration significative des paramètres photovoltaïques comparés à d'autres références.

IV.2.2. Cellule solaire inferieure à base d'absorbeur GaAs

La même méthodologie est utilisée dans cette partie où une cellule inférieure à base d'absorbeur GaAs est conçue et simulée en utilisant Silvaco Atlas comme illustré sur la **Figure IV.9** et **Figure IV.10**, puis améliorer son efficacité. Cette cellule est formée d'une fenêtre optique placée en haut de la

cellule à base $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$, suivie d'une part de deux couches de (GaAs) qui servent comme un émetteur (type P) et une base (type N) et d'autre part d'une couche BSF à base $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ suivi d'un substrat à base GaAs. Les paramètres physiques et géométriques utilisés dans la simulation sont donnés au **Tableau IV.6**.

Tableau IV.6 : Paramètres géométriques et physiques de la cellule inférieure GaAs simulés sous éclairage AM1.5G.

	Fenêtre (p) $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	Emetteur(p) GaAs	Base(n) GaAs	BSF(n) $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$	Substrat(n) GaAs
Epaisseur (μm)	0,04	1,00	2	0,1	0,2
Dopage (cm^{-3})	$2,5^{\text{E}17}$	$1,6^{\text{E}17}$	$2,6^{\text{E}19}$	$4,7^{\text{E}18}$	$2,4^{\text{E}17}$

Afin d'évaluer notre cellule en termes d'efficacité et de rendement par l'extraction de ses paramètres photovoltaïques, des simulations doivent être exécutées. Les figures ci-dessous illustrent les résultats de simulations qui mènent à l'extraction de ces paramètres.

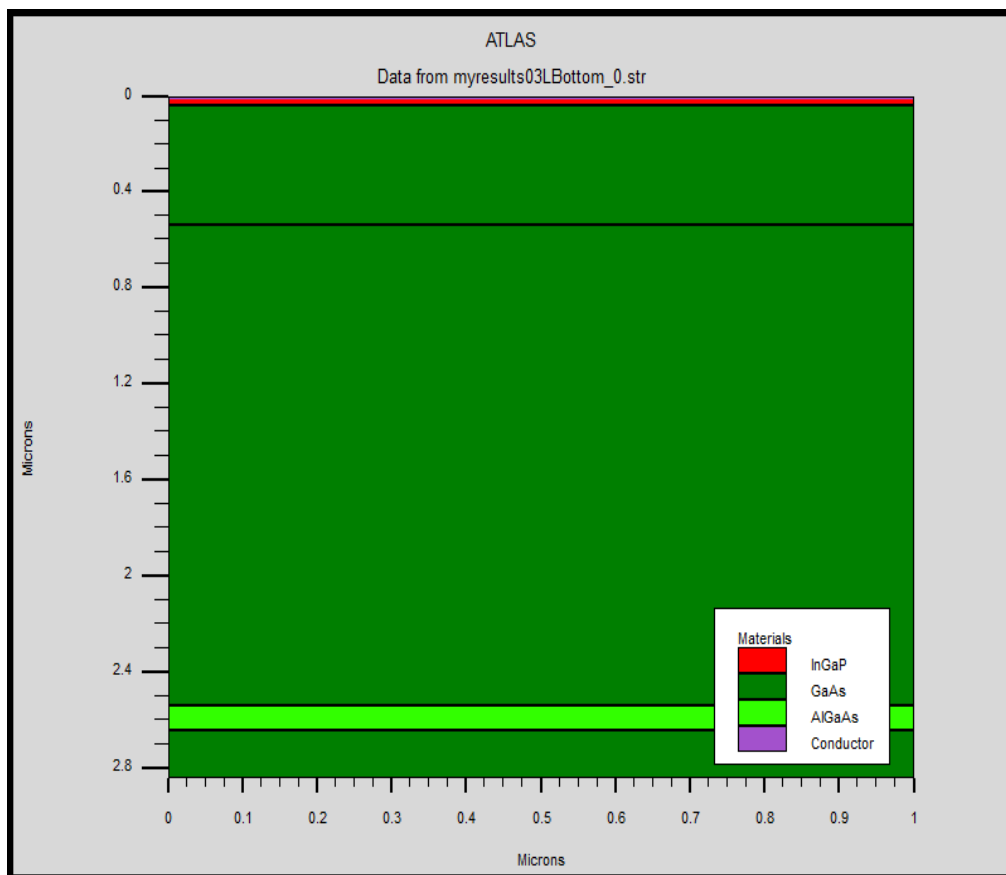


Figure IV.9 : Structure de la cellule solaire inférieure à base de GaAs.

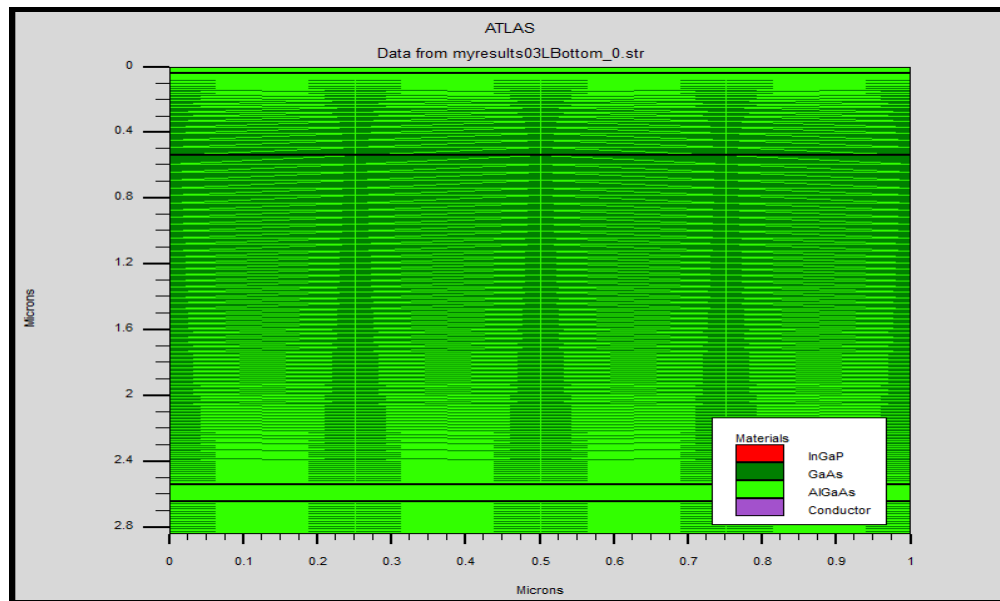


Figure IV.10 : Maillage de la cellule solaire inférieure à base de GaAs.

IV.2.2.1. Caractéristiques électriques et optiques

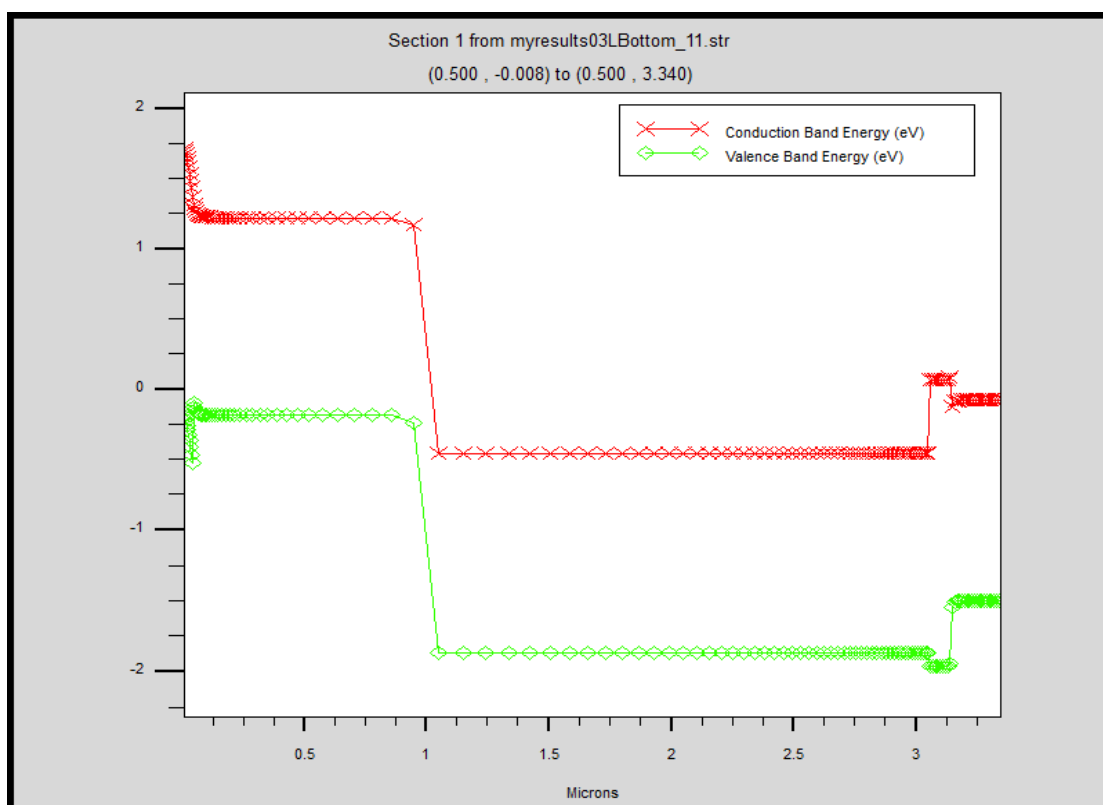


Figure IV.11 : Diagramme de bande de la cellule inférieure GaAs.

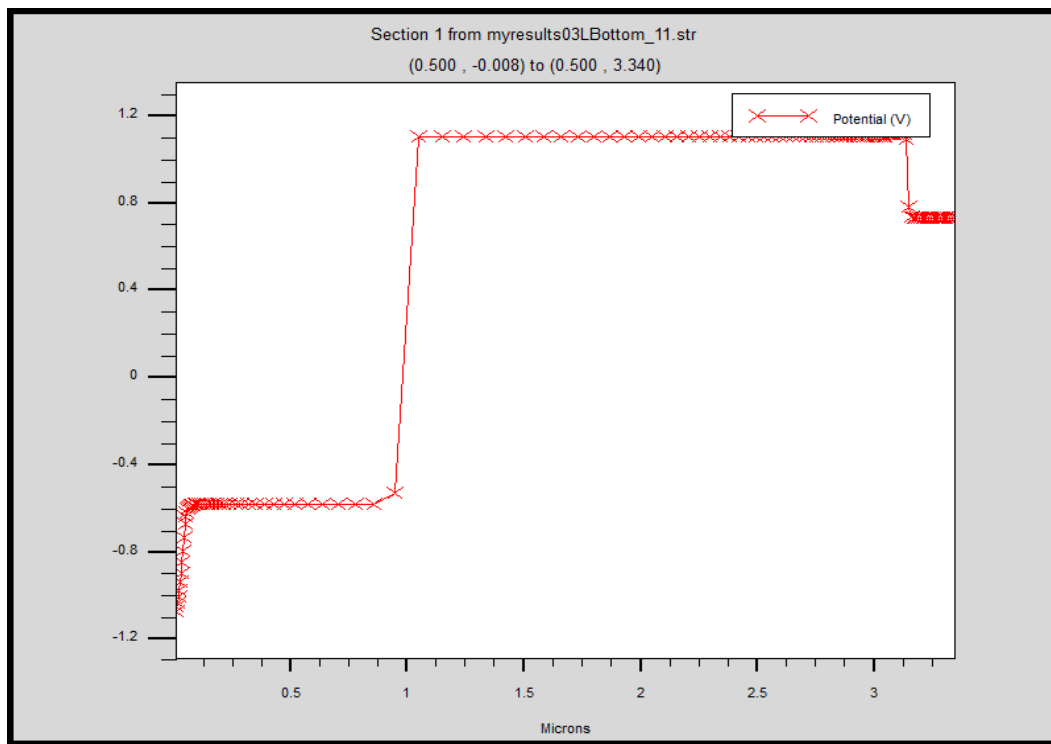


Figure IV.12 : Potentiel de la cellule inférieure GaAs.

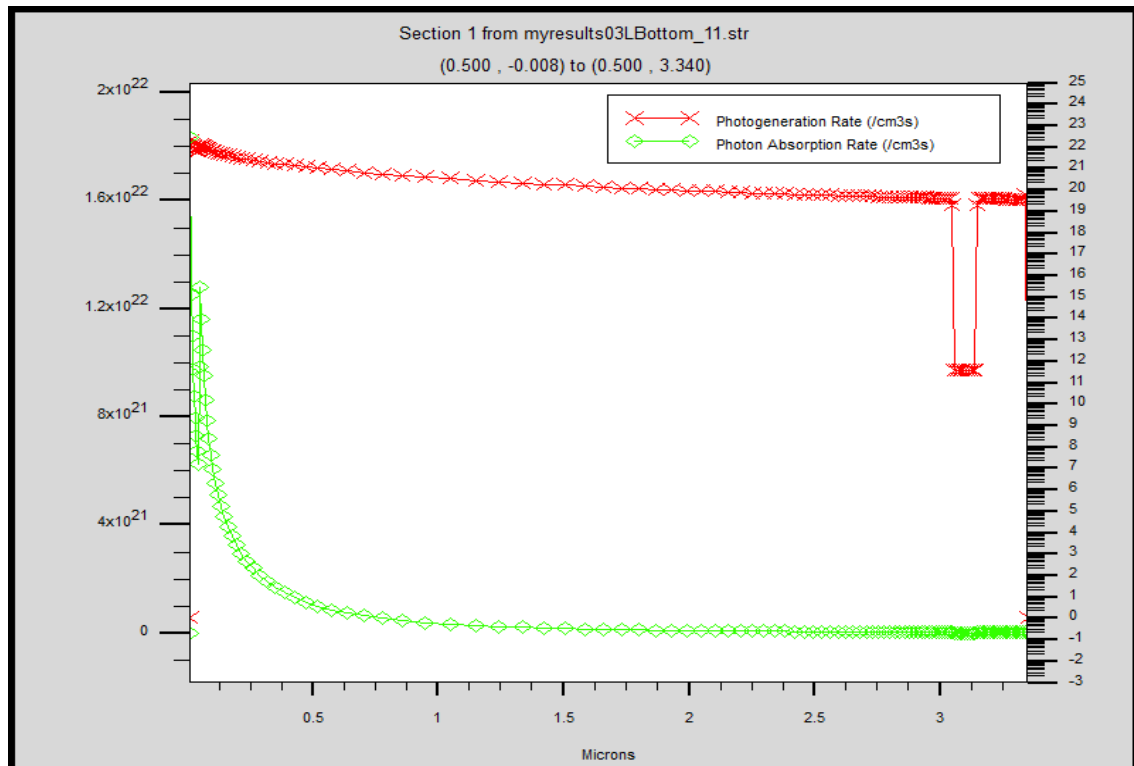


Figure IV.13 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule inférieure GaAs.

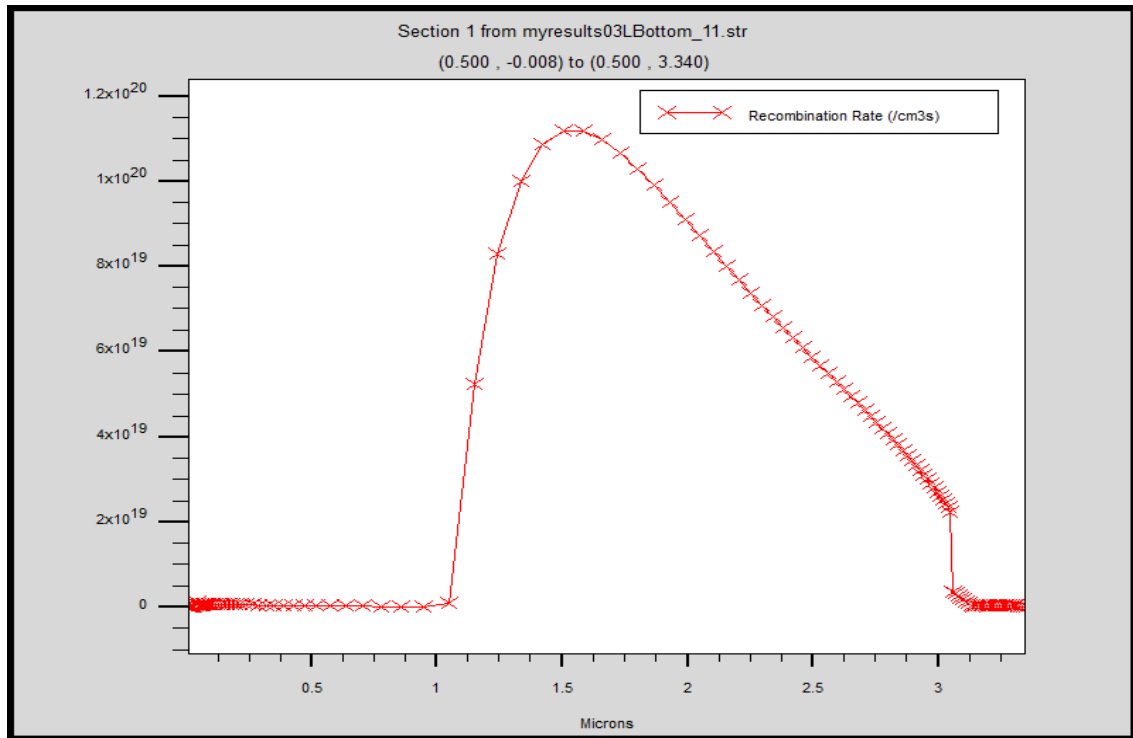


Figure IV.14 :Taux de recombinaison de la cellule inférieure GaAs.

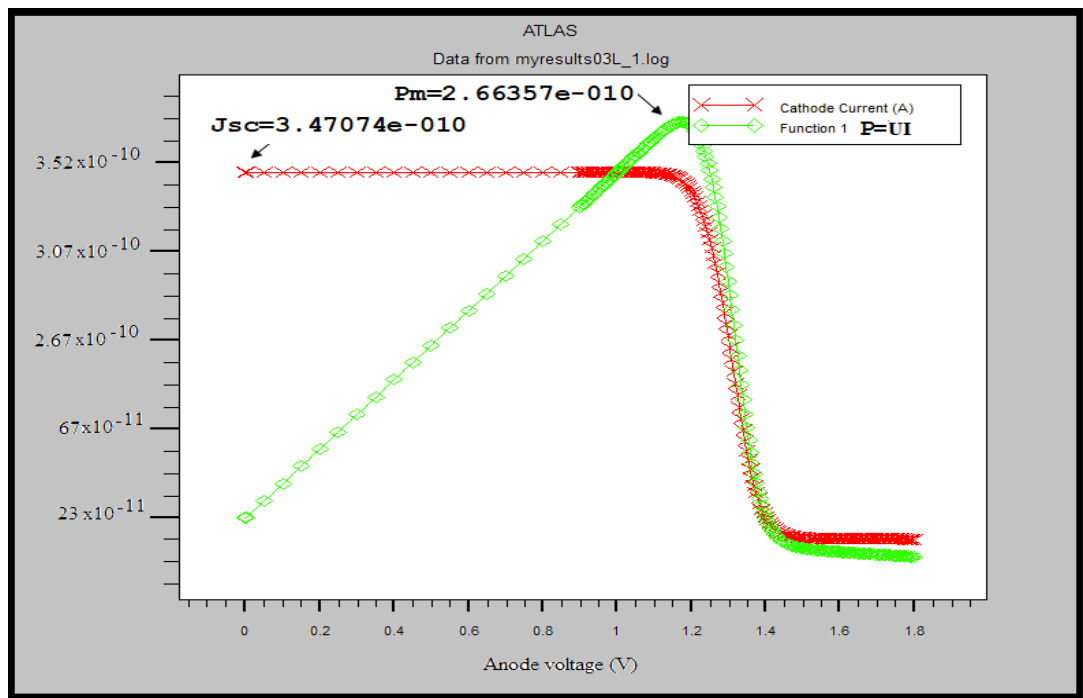


Figure IV.15 : Variation de courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule inférieure GaAs.

L'extraction des paramètres photovoltaïques sous ces conditions des simulations sont présentés dans le **Tableau IV.7**.

Tableau IV.7 : Paramètres photovoltaïques calculés de la cellule inférieure GaAs et simulés sous éclairement AM1.5G.

	Jsc (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	Pm (W/cm ²)	FF (%)	Opt_int	η (%)	EQE_top
Résultats	34,7074	0,916877	2,66357 ^E -10	83,7011	0,138049	19,2944	2,00216 ^E +6

Dans le but d'utiliser la cellule GaAs comme cellule inférieure de la DJ GaInP/GaAs, il s'avère nécessaire d'améliorer ses performances et cela est assuré par l'optimisation de ses paramètres technologiques (épaisseur et dopage de chaque couche : émetteur, base et BSF).

Enfin, le **Tableau IV.8** résume les paramètres optimaux qui induisent à l'amélioration considérable des performances de notre cellule GaAs en particulier le rendement de conversion photovoltaïque (η) (voir **Tableau IV.9**).

Tableau IV.8 : Paramètres géométriques optimaux de la cellule inférieure à base GaAs.

	Fenêtre (p) In _{0,49} Ga _{0,51} P	Emetteur(p) GaAs	Base(n) GaAs	BSF(n) Al _{0,7} Ga _{0,3} As	Substrat(n) GaAs
Epaisseur (μm)	0,04	1,00	2-3	0,5	0,2
Dopage (cm⁻³)	2,5 ^E 17	1,6 ^E 17	2,6 ^E 18	4,7 ^E 18	2,4 ^E 17

Tableau IV.9 : Paramètres photovoltaïques optimaux de la cellule GaAs simulés sous éclairement AM1.5G.

	Jsc (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	Pm (W/cm ²)	FF (%)	Opt_int	η (%)	EQE_top
Résultats	36,7977	0,913864	2,81343 ^E -10	83,6631	0,138049	20,3799	7,31428 E+6

A travers les résultats présentés, nous notons que pour la cellule GaInP la tension V_{co} atteint la valeur 1,49 V supérieur à celle de la cellule GaAs seul qui est de l'ordre de 0,91V. Cette augmentation de la tension est due essentiellement au grand gap d'énergie de l'absorbeur GaInP (1,9eV) par rapport à la faible énergie de gap de l'absorbeur GaAs (1,42 eV). Une amélioration remarquable du rendement de conversion (20,73%) au lieu de (16%).

IV.3. Cellule solaire à double jonctions : Structure Tandem (GaInP/GaAs)

IV.3.1. Présentation de la structure

Une fois l'implantation et la validation des modèles des cellules solaires à base de GaInP et GaAs séparément dans **Silvaco**, nous nous penchons vers l'implantation du modèle d'une cellule tandem à base de (GaInP/GaAs). Nous avons mis en place la cellule (GaInP) au-dessus de la cellule

(GaAs) où deux multi-jonctions P-N connectées entre eux dans le sens inverse par une jonction tunnel (Figure IV.16).

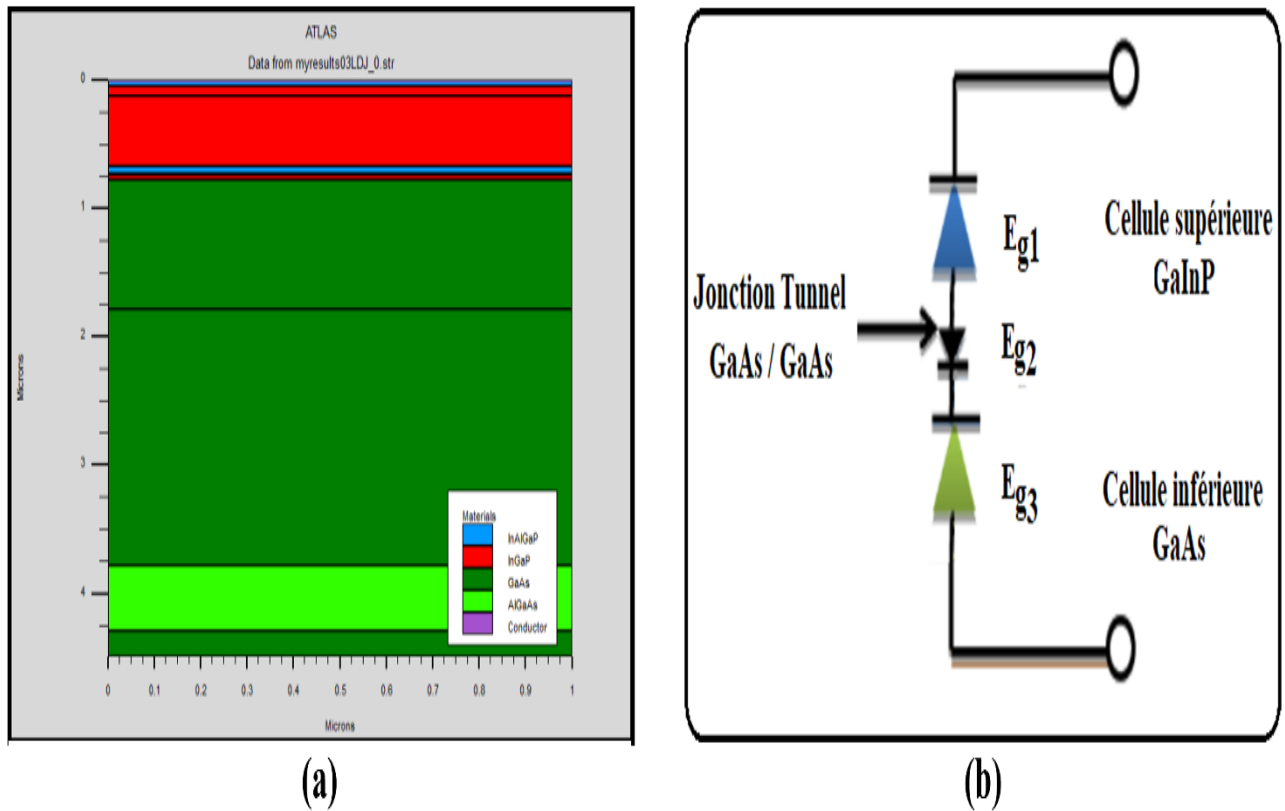


Figure IV.16 : (a) Structure conçue. (b) Circuit électrique équivalent de la cellule tandem GaInP/GaAs avec interconnexion d'une diode tunnel GaAs/GaAs.

De même, le maillage et le dopage sont représentés dans la Figure IV.17. Nous notons qu'on a utilisé un maillage spécial au voisinage de la jonction tunnel en faisant appel à : « *auxiliary quantum tunneling mesh* ».

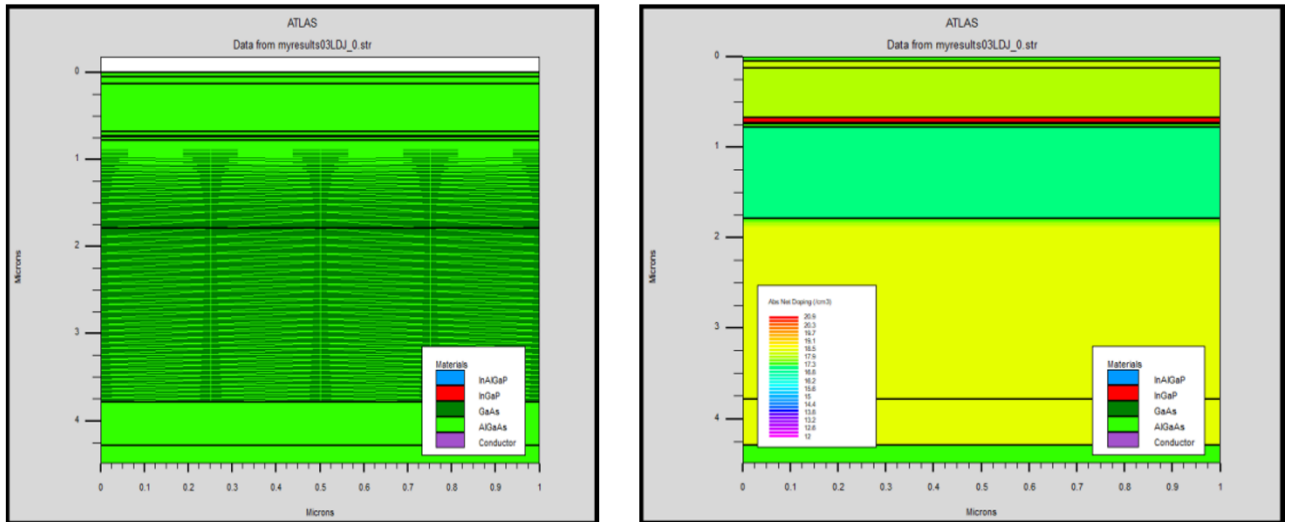


Figure IV.17 : Structure, maillage et dopage de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs.

On a utilisé les deux cellules supérieure et inférieure optimisées sans tenir compte des paramètres géométrique de la jonction tunnel. Les caractéristiques électriques et optiques obtenues avec une épaisseur de $0,008\mu\text{m}$ et un dopage de $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ de la jonction tunnel sont représentés sur les figures ci- dessous.

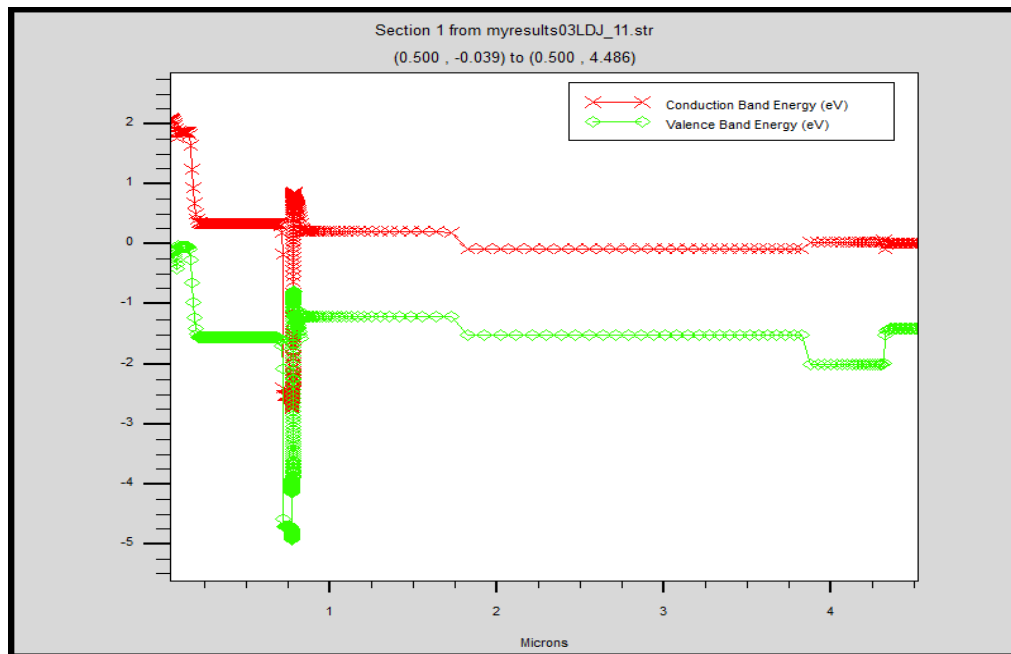


Figure IV.18 : Diagramme de bande de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs.

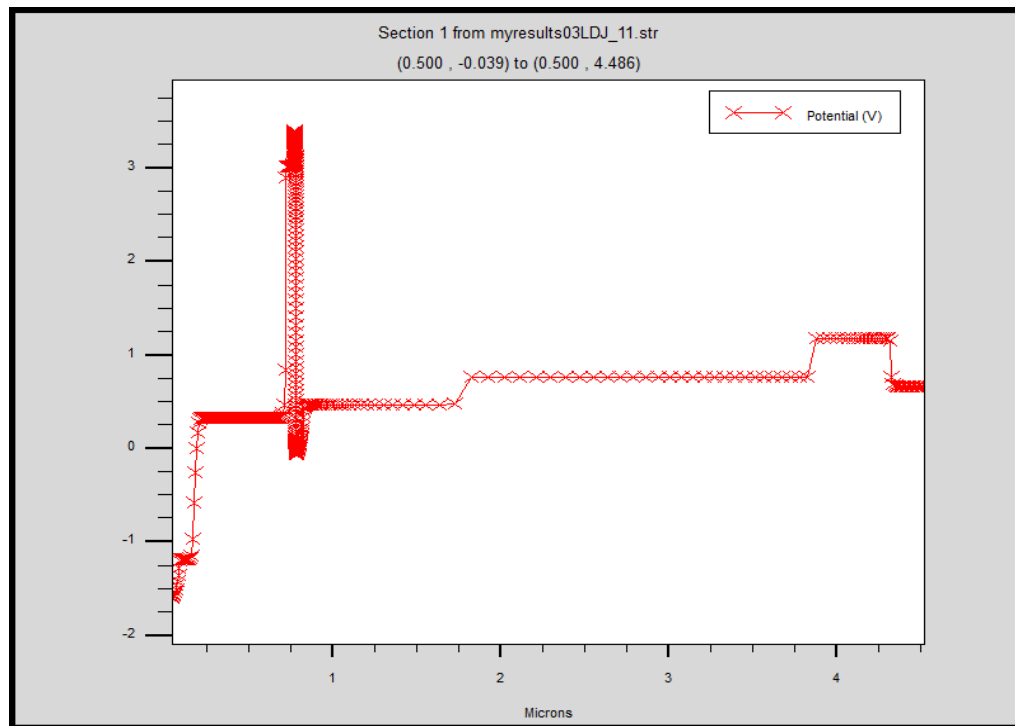


Figure IV.19 : Potentiel de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs.

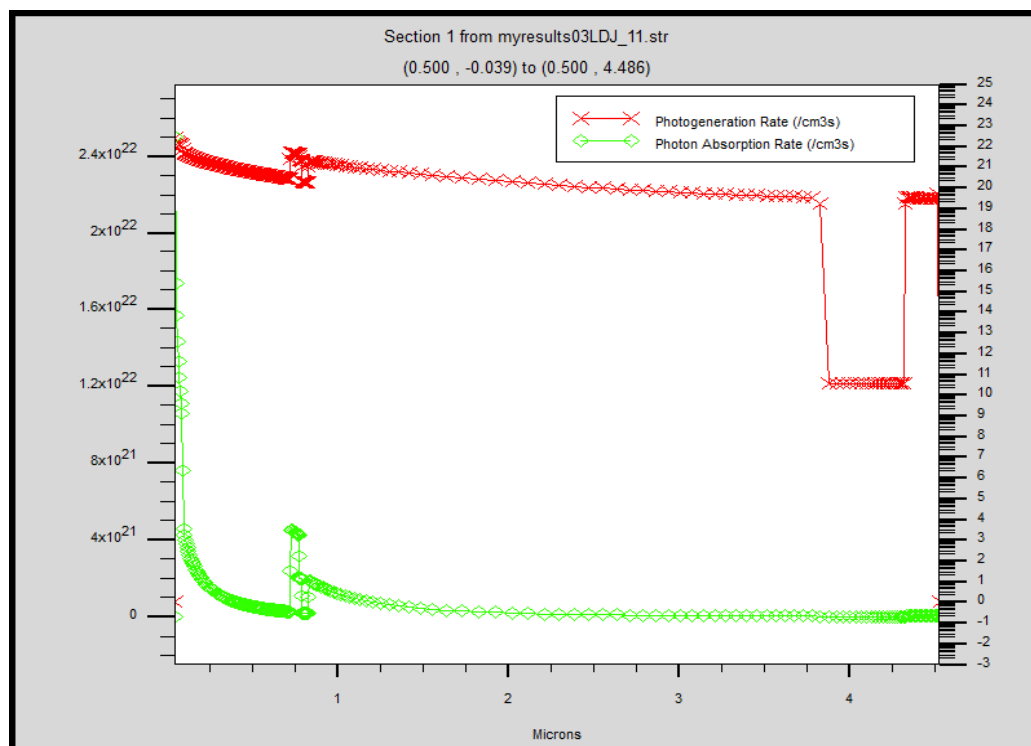


Figure IV.20 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs.

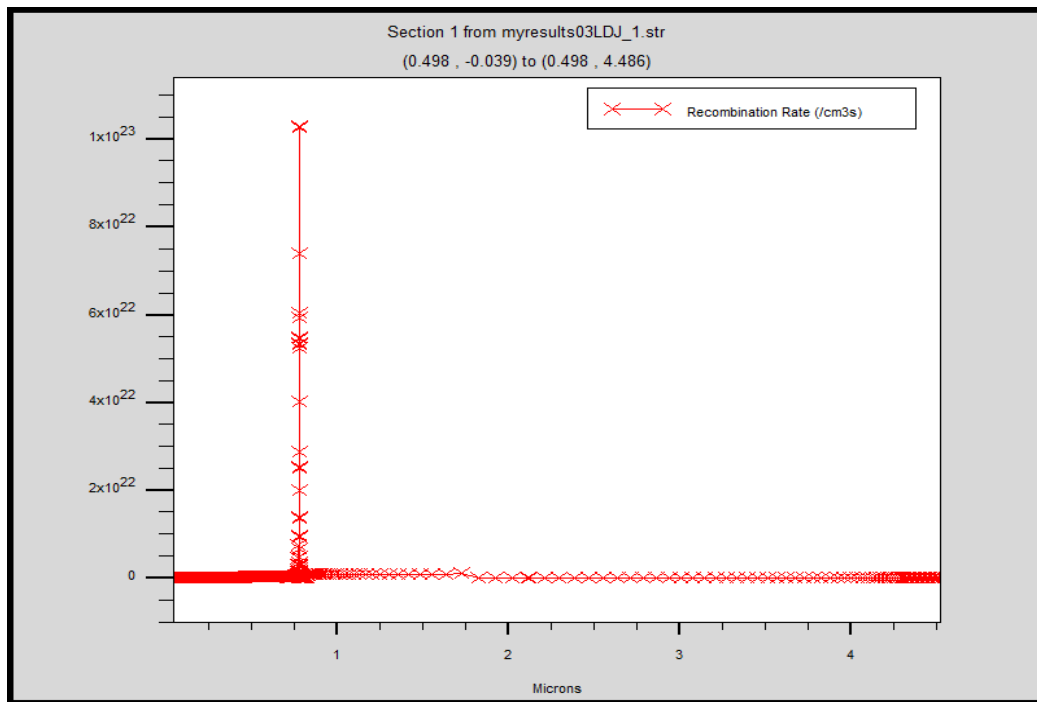


Figure IV.21 : Taux de Recombinaison de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs.

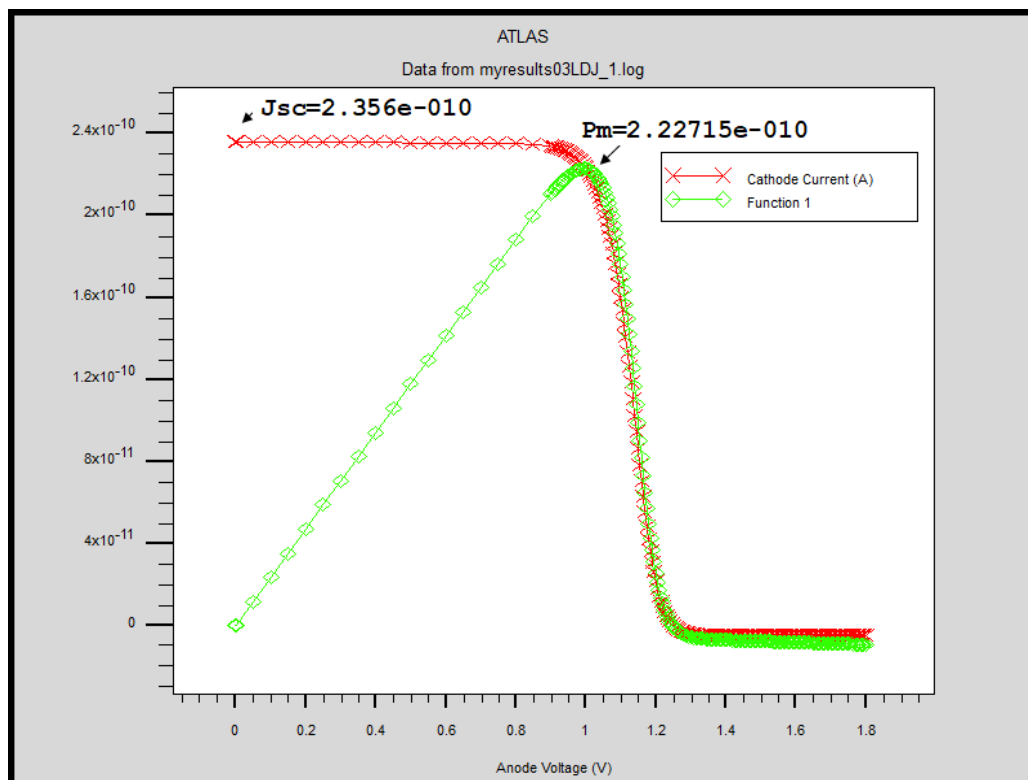


Figure IV.22 : Variation de courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs.

L'extraction des paramètres photovoltaïques sous ces conditions des simulations sont présentés dans le **Tableau IV.10**.

Tableau IV.10 : Paramètres photovoltaïques calculés de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs et simulés sous éclairement AM1.5G.

	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	Pm (W/cm ²)	FF (%)	Opt_int	η (%)	EQE_top
Résultats	23,56	1,24887	2,22715E-10	75,6932	0,138049	16,133	0,240728

A travers la caractéristique (J-V) sous l'éclairement AM1.5G et le **Tableau IV.10**, nous remarquons que le rendement de conversion de la cellule tandem DJ (16,13%) est inférieur aux ceux des deux cellules optimisées GaInP et GaAs respectivement. Cela nous mène à conclure qu'on n'a pas encore atteint le bon rendement de la DJ souhaité. Dans ce contexte, nous allons étudier l'effet de l'épaisseur allant de 0,008μm à 0,0025μm et le dopage de 10¹⁷cm⁻³ à 10²⁰cm⁻³ de la jonction tunnel afin d'améliorer la cellule tandem.

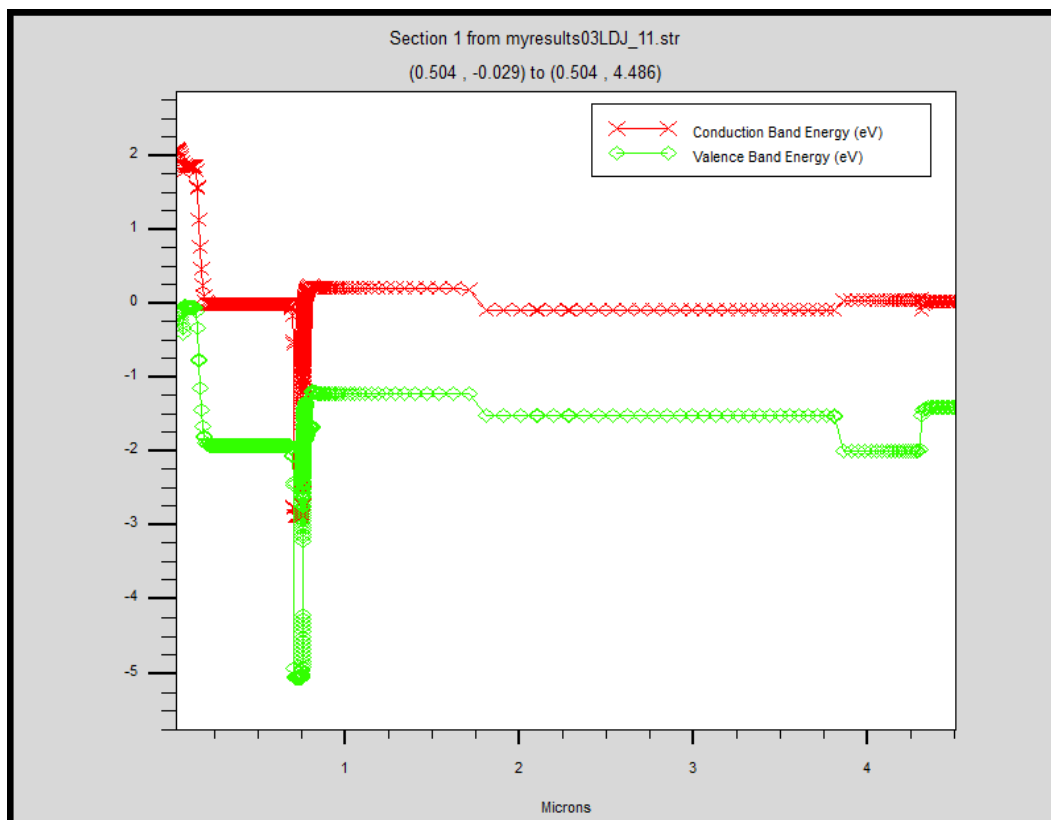


Figure IV.23 : Diagramme de bande de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée.

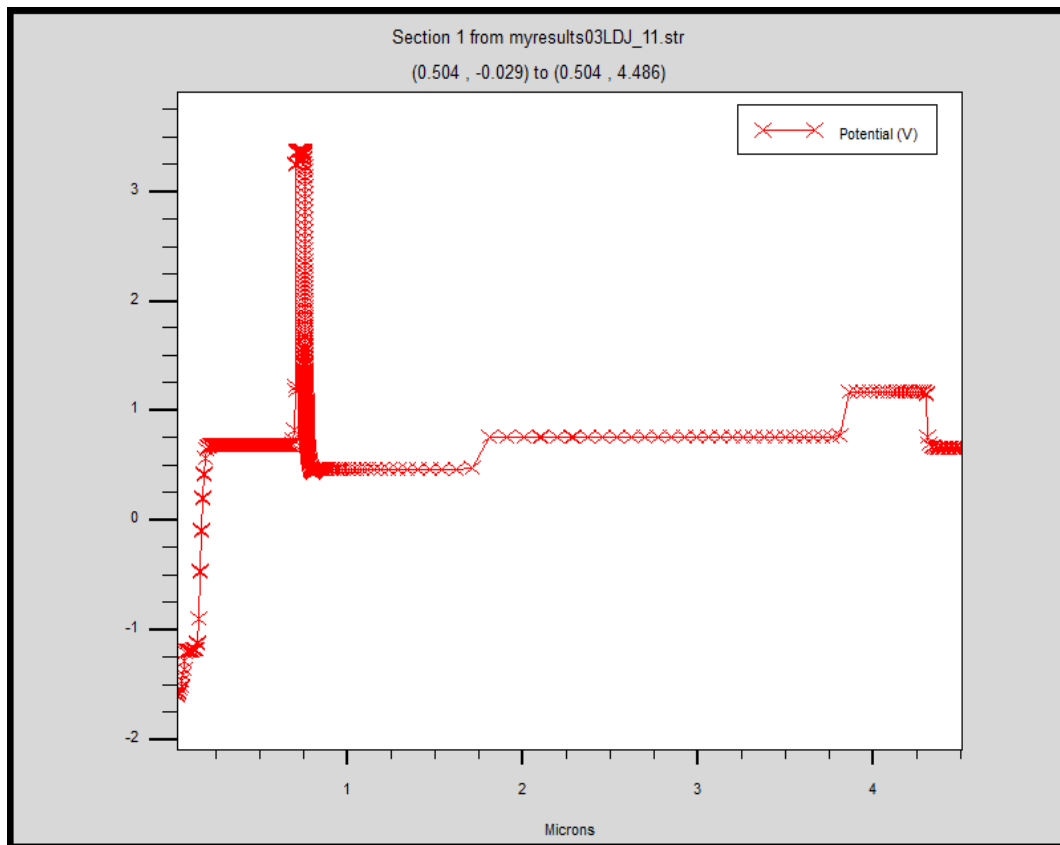


Figure IV.24 : Potentiel de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée.

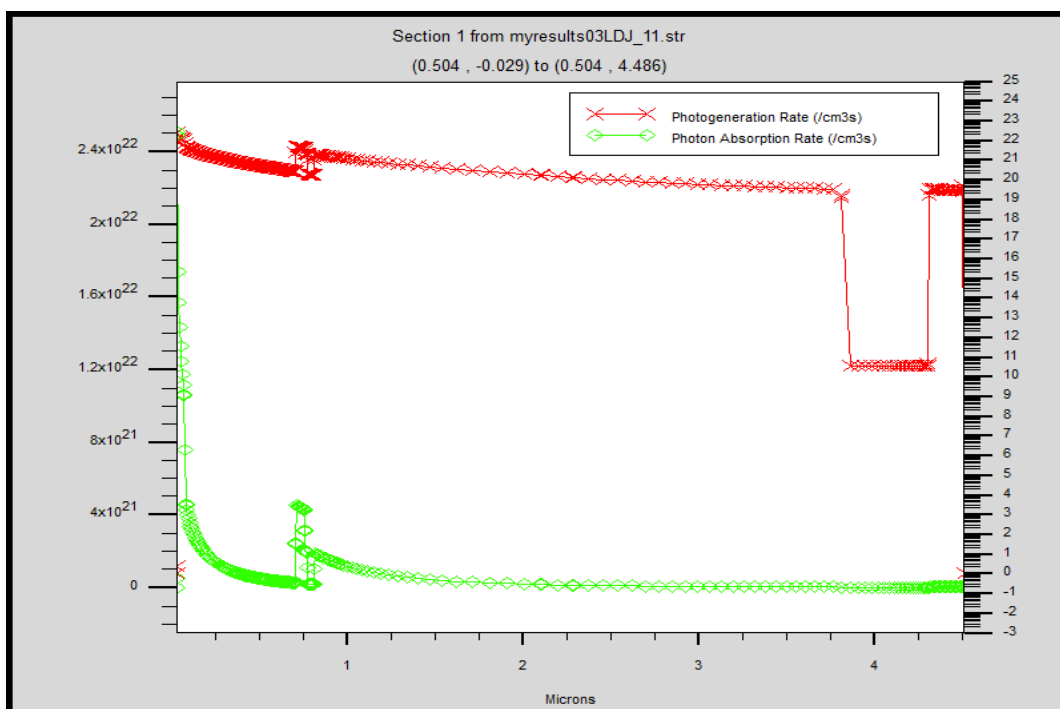


Figure IV.25 : Taux de génération et d'absorption des photons de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée.

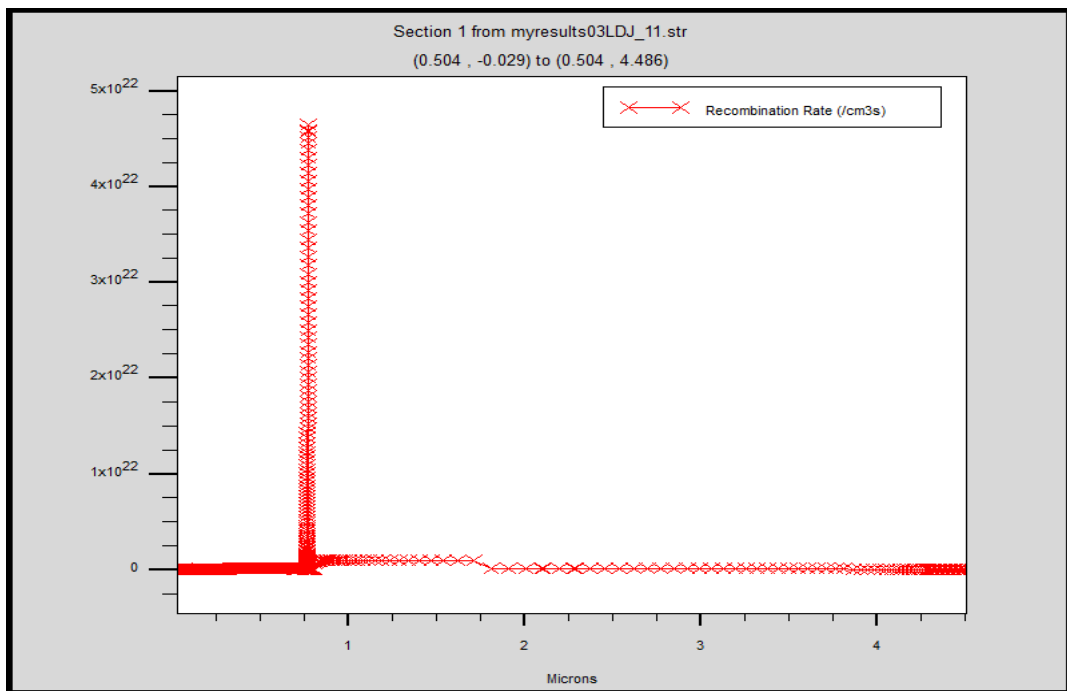


Figure IV.26 : Taux de recombinaison de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée.

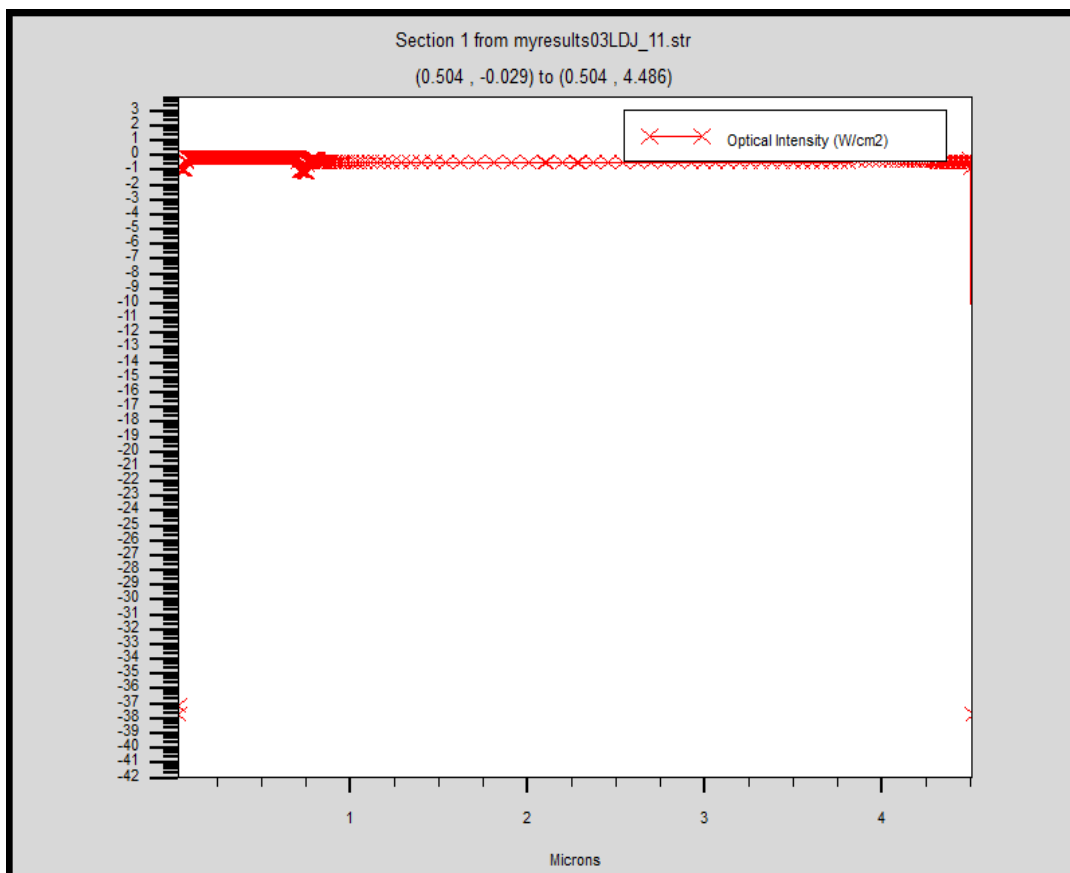


Figure IV.27 : Intensité optique de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée.

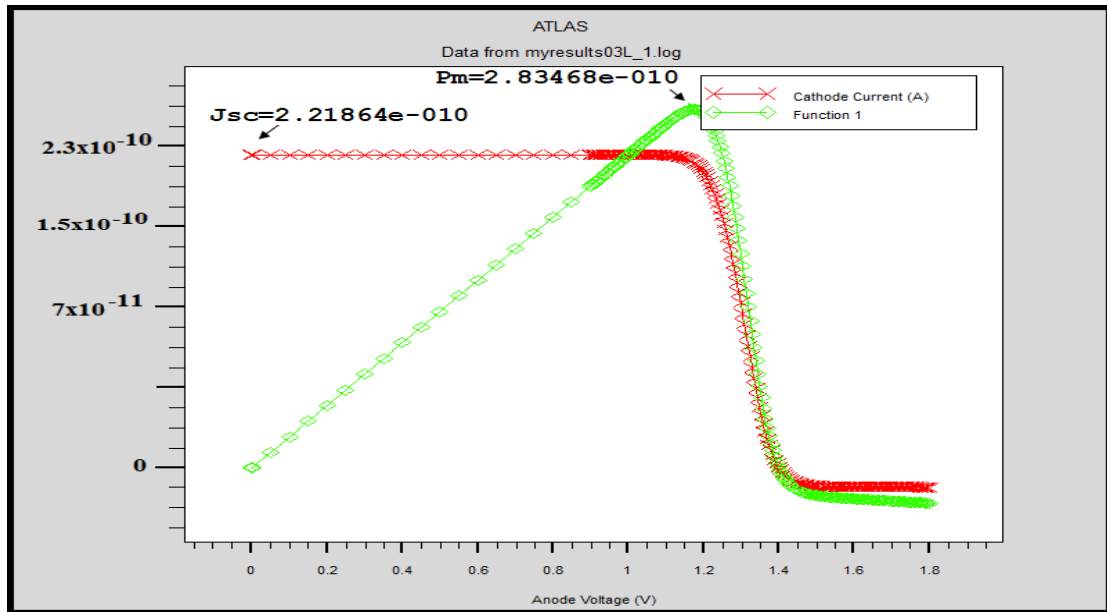


Figure IV.28 : Courant de conduction en fonction de la profondeur, Caractéristiques (J-V) et (P-V) de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée.

L'extraction des paramètres photovoltaïques sous ces conditions des simulations sont présentés dans le **Tableau IV.11**.

Tableau IV.11 : Paramètres photovoltaïques optimaux de la cellule GaAs simulés sous éclaircment AM1.5G.

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{max} (W/cm ²)	FF (%)	Opt_int	η (%)	EQE_top
Résultats	22,1864	1,49449	2,83468E-10	85,4917	0,138049	20,5339	137,387

Une série de résultats de simulation nous a mené à déduire que l'épaisseur 0,008 μ m et le dopage de 10¹⁸cm⁻³ induit une amélioration remarquable du rendement de la cellule GaInP/GaAs.

Nous notons que le courant de court-circuit J_{sc} calculé de la cellule tandem (InGaP/GaAs) qui circule à travers les deux cellules est le minimum des deux courants J_{sc} relatives au deux cellules, cela est en concordance avec la théorie des cellules tandem.

En se référant aux **Tableau IV.10** et **Tableau IV.11**, nous constatons que le dopage de la jonction tunnel a un effet considérable sur la jonction tunnel en particulier si le dopage est excessif, cela induit un déplacement de porteurs libres. Pour pallier ce problème, il faut ajouter des électrodes [48] à chaque jonction tunnel.

A partir des figures **Figure IV.5** et **Figure IV.13**, on peut remarquer des rendements différents pour les deux absorbeurs GaAs et InGaP, cela est dû à leur taux d'absorption importants.

Nous pouvons aussi constater qu'on a pu obtenir des rendements de l'ordre 20(%) pour les trois cellules étudiées (cellule InGaP seul, GaAs seul et tandem InGaP /GaAs). A cet effet, nous pourrions conclure qu'il ya d'autre mécanismes qui se manifestent et qu'on n'a pas bien pris en compte : fraction molaires x et y, gamme d'absorption du spectre solaire, ...).

IV.4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre IV est l'implantation et la validation du modèle numérique d'une cellule tandem GaInP/GaAs construit dans le logiciel Silvaco Atlas.

Notre stratégie consiste en premier lieu de valider le modèle des cellules supérieure et inférieure constituant la cellule tandem DJ en assurant la compilation et la convergence de la solution. En deuxième lieu optimiser chaque cellule séparément afin d'améliorer leurs performances et cela est assuré par l'optimisation de ses paramètres technologiques (épaisseur et dopage de chaque couche : émetteur, base et BSF).

Enfin on élargie notre objectif par la validation du modèle numérique de la cellule tandem DJ double-jonction afin de l'évaluer en terme d'efficacité et de rendement par l'extraction de ses paramètres photovoltaïques.

A travers les résultats de simulation obtenus, nous avons pu mettre en évidence l'effet des paramètres fondamentaux du matériau choisis d'une part et les coordonnées de nos structures (l'épaisseur, dopage) sur leur caractéristiques électrique et optique qui nous ont induit à l'extraction des paramètres photovoltaïques (J_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF , η , EQE).

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ces dernières années, le développement de l'énergie photovoltaïque connaît un réel essor et afin d'être en adéquation avec le marché, il s'avère nécessaire en particulier en Algérie de prendre en compte la contrainte imposée et d'utiliser une source d'énergie économique, peu polluante et protéger ainsi l'environnement.

De plus, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques ont reçu une grande attention ces dernières années. L'amélioration du rendement de conversion photovoltaïque nécessite l'amélioration des mécanismes mis en jeu dans le processus de fabrication, Cependant, la complexité des mécanismes physiques au sein de ces systèmes rend la simulation un outil primordial et essentiel pour l'analyse des performances et l'optimisation de la conception.

Le travail présenté dans ce mémoire s'est inscrit dans le contexte actuel des recherches visant l'amélioration des performances des cellules solaires et la compréhension des sciences fondamentales des matériaux.

Les résultats de simulation présentés dans ce mémoire nous a permis de mieux cerner les contours les performances des cellules solaires (simple, double jonction, multi-jonctions) et de comprendre la nécessité de leurs optimisations par une comparaison rigoureuse de leurs paramètres. Ceux-ci par l'exploitation des caractéristiques électrique et optiques J-V, P-V qui nous ont induits à l'extraction des paramètres photovoltaïques (J_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF , η , EQE) de nos cellules.

On a pu alors mettre en évidence l'effet des paramètres fondamentaux du matériau choisis d'une part et les coordonnées de nos structures (l'épaisseur, dopage) sur leur caractéristiques électrique et optique.

On a conclu pour l'améliorer des paramètres de nos cellules solaires à savoir :

- L'épaisseur de l'émetteur a un effet considérable sur le rendement de conversion, plus l'émetteur est mince, plus le passage des photons à la base est consisté.
- La couche BSF aussi doit être fortement dopés 10^{19} cm^{-3} , afin d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison à la surface, cela favorise le passage des paires électron-trou aux contacts.

- La couche fenêtre a un effet considérable sur le rendement énergétique. Son objectif est de réduire la réflexion minimale de l'onde incidente, pour la totalité du spectre solaire et représenter une bonne tenue mécanique aux contraintes du milieu ambiant.
- A travers la caractéristique (J-V) sous l'éclairement AM1.5G, nous remarquerons que pour la cellule GaInP la tension V_{oc} atteint la valeur 1,49 V supérieur à celle de la cellule GaAs seul qui est de l'ordre de 0,91V. Cette augmentation de la tension est due essentiellement au grand gap d'énergie de l'absorbeur GaInP (1,9eV) par rapport à la faible énergie de gap de l'absorbeur GaAs (1,42eV). Une amélioration remarquable du rendement de conversion (20,731%) au lieu de (17,78%) dans la littérature.
- Il est clair aussi de noter que la diminution de l'épaisseur de l'ordre de 0,008 μ m et le dopage élevé de la jonction tunnel influe considérablement sur le confinement des porteurs et éventuellement augmente la largeur de la zone de déplétion et diminue le courant tunnel.

Ce travail de simulation présenté reste incomplet car on n'a pas étudié tous les mécanismes qui mènent à l'amélioration et l'optimisation des cellules solaires en particulier à base des matériaux III-V. Ainsi notre simulation ouvre également le chemin à d'autres études de simulation par exemple : l'influence des fractions molaires des matériaux ternaires (x) et quaternaire (x et y), de la température.

Références bibliographiques

- [1] B. Equer, *Energie solaire photovoltaïque*, vol. 1. Paris: Ellipses Editions Marketing, 1993.
- [2] S. Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. Vienna: Springer Vienna, 1984.
- [3] « Le tableau périodique des éléments ».
- [4] I. Mallem, « Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO », Université Mohamed Khider-Biskra, 2014.
- [5] B. Garcia Jr, « Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas », 2007.
- [6] A. F. Meftah, N. Sengouga, A. M. Meftah, et S. Khelifi, « Numerical simulation of the effect of the Al molar fraction and thickness of an $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ window on the sensitivity of a $\text{p}^+\text{-n-n}^+$ GaAs solar cell to 1 MeV electron irradiation », *Renew. Energy*, vol. 34, n° 11, p. 2426-2431, 2009.
- [7] B. P. Sullivan, « The effect of temperature on the optimization of photovoltaic cells using Silvaco ATLAS modeling », 2010.
- [8] A. Ricaud, *Convertisseurs photovoltaïques*. 2007.
- [9] S. Almosni, « Growth, structural and electro-optical properties of GaP/Si and GaAsPN/GaP single junctions for lattice-matched tandem solar cells on silicon », INSA de Rennes, 2015.
- [10] I. Silvaco, « ATLAS user's manual device simulation software », St. Clara CA, 2010.
- [11] J. Nelson, « The Physics of Solar Cells ». World Scientific, 2003.
- [12] A. J. McEvoy, T. Markvart, et L. Castañer, *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Waltham, MA: Academic Press, 2012.
- [13] 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 », Université de Cheikha Anta Diop de Dakar, 2004.
- [14] T. Desrues, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière », Lyon, INSA, 2009.
- [15] N. Benabdallah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », Université Aboubekr Belkaid, Telemcen, 2006.
- [16] L. Zighed, « Etude de l'influence de nouveaux films antiréfléchissants sur la conversion photovoltaïque », Université de Mentouri, Constantine, 2007.
- [17] M. Orgeret, *Les Piles solaires: Le composant et ses applications*. Masson, 1985.
- [18] D. A. Ahmari, M. T. Fresina, Q. J. Hartmann, D. W. Barlage, M. Feng, et G. E. Stillman, « InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistor grown on a semi-insulating InGaP buffer layer », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 18, n° 11, p. 559-561, 1997.
- [19] S. Chettouh et S. hatout, « Etude du rendement de cellule solaire hétérojonction à base InGaP/GaAs par simulation », Université de Mohamed El-Bachir Ellbrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2019.
- [20] W.-S. Lour, J.-H. Tsai, L.-W. Lai, et W.-C. Liu, « Influence of channel doping-profile on camel-gate field effect transistors », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 43, n° 6, p. 871-876, 1996.
- [21] P. F. Liao, P. Kelley, et others, *Quantum Well Lasers*. Academic Press, 1993.
- [22] B. Brousse, « Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique », Limoges, 2004.
- [23] J. Royer, E. J. Schiller, et Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français,

- Le pompage photovoltaïque: manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens.* Québec: Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français, 1998.
- [24] N. Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités », INSA de Lyon, 2005.
- [25] K. Hamadouche et N. Kebci, « Etude et caractérisation d'un module photovoltaïque au silicium monocristallin », Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2018.
- [26] « Caractéristique courant-tension d'une cellule ». http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/caracteristique-courant-tension-cellule.php (consulté le 25 juin, 2021).
- [27] J. Lavery, « Quantum tunneling model of a pn junction in Silvaco », 2008.
- [28] F. Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Université Ferhat Abbès, Sétif, 2018.
- [29] « Schéma de panneau photovoltaïque et schémas d'installations », 2017. <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaique.html> (consulté le 29 juin, 2021).
- [30] R. Maouedj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah », Université de Tlemcen, 2005.
- [31] Jean Paul Goyheix, « De l'électricité à partir du soleil ». <http://sulfate.ch/Energie/A PARTIR DU SOLEIL.htm> (consulté le 30 juin, 2021).
- [32] A. Maoucha, « Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique », Batna, Université El-Hadj Lakhdar. Faculté de Technologie, 2011.
- [33] S. Learning, « Énergie solaire - Informations générales », p. 1-13, 2006.
- [34] A. Damerval et B. Patrice, « Portail pédagogique : physique chimie - cellule photovoltaïque (acnantes.fr) », 2014. <https://www.pedagogie.ac-nantes.fr/physique-chimie/enseigner/experiences-et-manipulations/cellule-photovoltaïque-798847.kjsp> (consulté le 27 mai, 2021).
- [35] C. Clément, « Nouveau record pour une cellule solaire CIGS flexible », 2011. <https://www.industrie-techno.com/article/nouveau-record-pour-une-cellule-solaire-cigs-flexible.11511> (consulté le 27 mai, 2021).
- [36] « Les cellules photovoltaïques », 2020. <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques/> (consulté le 01 juill, 2021).
- [37] L. Nancy, « Dye-Sensitized Solar Cells Reach 12.3% Efficiency », 2011. https://www.solarnovus.com/dye-sensitized-solar-cells-reach-123-efficiency_N3827.html (consulté le 01 juill, 2021).
- [38] A. Luque et S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2003.
- [39] B. Burnett, « The basic physics and design of III-V multijunction solar cells », *US Dep. Energy Natl. Cent. Photovolt.*, 2002.
- [40] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009.
- [41] M. Yamaguchi, « Present status of R\&D for super-high-efficiency III--V compound solar cells in Japan », in *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany. WIP, Munich, Germany*, 2002, p. 2144.
- [42] D. M. Caughey et R. E. Thomas, « Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field », *Proc. IEEE*, vol. 55, n° 12, p. 2192-2193, 1967.
- [43] G. Masetti, M. Severi, et S. Solmi, « Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-, phosphorus-, and boron-doped silicon », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 30, n° 7, p. 764-769, 1983.
- [44] C. Canali, G. Majni, R. Minder, et G. Ottaviani, « Electron and hole drift velocity measurements

- in silicon and their empirical relation to electric field and temperature », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 22, n° 11, p. 1045-1047, 1975.
- [45] « Site officiel de Silvaco ». <https://silvaco.com/> (consulté le 02 juill, 2021).
- [46] S. Device Simulation, « Manual, ATLAS User's », *R SILVACO Int. St. Clara CA*, 2015.
- [47] L. Amer et L. Imadali, « Simulation et analyse des propriétés et des paramètres de fonctionnement des lasers à semi-conducteurs simple et double hétérojonction AlGaAs/GaAs », Université de Béjaia, 2021.
- [48] N. J. Ekins-Daukes *et al.*, « Controlling radiative loss in quantum well solar cells », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 46, n° 26, p. 264007, 2013.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire s'est inscrit dans le contexte actuel des recherches visant l'amélioration des performances des cellules solaires et la compréhension des sciences fondamentales des matériaux. Notre stratégie présentée dans ce mémoire consiste à la modélisation, l'implantation et la validation du modèle numérique d'une cellule tandem GaInP/GaAs construit dans l'environnement Silvaco et qui met l'accent sur l'utilisation des paramètres fondamentaux des matériaux binaire GaAs, ternaires $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ et $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ et quaternaires $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{In}_y\text{P}$.

Une méthodologie de simulation est utilisée qui consiste en premier lieu à l'étude de la cellule solaire d'une seule jonction à base des absorbeurs (GaInP), et (GaAs) séparément, en vue d'optimiser par simulation leur caractéristiques physiques et géométriques des différentes couches constituant chaque cellule. En deuxième lieu, les paramètres optimisés de chaque cellule seront pris en compte pour l'optimisation de la cellule DJ. Pour cela, on a analysé l'influence de divers paramètres en particulier les paramètres de la base, de l'émetteur, et de la surface arrière (BSF), ainsi que l'épaisseur et le dopage de la jonction tunnel de la DJ utilisant Silvaco Atlas.

Les résultats de simulation présentés dans ce mémoire nous a permis de mieux cerner les contours les performances des cellules solaires (simple, double jonction, multi-jonctions) et de comprendre la nécessité de leurs optimisations. Ceux-ci par l'exploitation des caractéristiques électrique et optiques J-V, P-V qui nous ont induit à l'extraction des paramètres photovoltaïques (J_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF, η , EQE) de nos cellules.

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

Abstract

The work presented in this thesis is part of the current context of research aimed at improving the performance of solar cells and understanding basic materials science. Our strategy presented in this thesis consists in the modeling, the implantation and the validation of the numerical model of a GaInP / GaAs tandem cell built in the Silvaco environment and which emphasizes the use of the fundamental parameters of binary materials. GaAs, ternary $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ and $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{P}$ and quaternary $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{In}_y\text{P}$.

A simulation methodology is used which consists first of all in the study of the solar cell of a single junction based on absorbers (GaInP), and (GaAs) separately, in order to optimize by simulation their physical and geometric characteristics. of the different layers that make up each cell. Second, the optimized parameters of each cell will be taken into account for the optimization of the DJ cell. For this, we analyzed the influence of various parameters in particular the parameters of the base, the emitter, and the back surface (BSF), as well as the thickness and the doping of the tunnel junction of the DJ using Silvaco Atlas.

The simulation results presented in this thesis have enabled us to better understand the contours of the performance of solar cells (single, double junction, multi-junction) and to understand the need for their optimizations. These by the exploitation of the electrical and optical characteristics J-V, P-V which induced us to extract the photovoltaic parameters (J_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF, η , EQE) of our cells.

Keywords : Solar cell, Double junction, tunnel junction, BSF, GaInP, GaAs, TcadSilvaco.