

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Electronique

N° : ME/2025



FILIÈRE : Electronique

OPTION : Microélectronique

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

Par:

REGHIOUI Khaola

THÈME

**Conception et optimisation par simulation TCAD d'une
cellule solaire tandem InGaP/GaAs à haute rendement**

Soutenu publiquement le : **29 Juin 2025** devant le jury composé de :

Dr. OUALI Mohammed Assam	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Président
Prof. BOUCHAMA Idris	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Examineur
Dr. HADJAB Moufdi	Université M ^{ed} Boudiaf –M'sila	Rapporteur
Mr. CHETTOUH Salah	Université de Boumerdes	Co-Rapporteur

Année universitaire : **2024 /2025**

Je dédie ce travail à :

A mes très chers parents.

A mes très chers frères et sœurs.

A tous mes amis.

Je dédie ce mémoire.

Khaola

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

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et à témoigner ma profonde gratitude au **Dr. HADJAB Moufdi**, Maître de conférences à l'université de M'sila, qui m'a honoré par son encadrement et accepté la lourde tâche de promoteur. Je lui suis particulièrement reconnaissant pour son dévouement, la qualité de son accompagnement, ainsi que pour m'avoir fait bénéficier pleinement de ses compétences scientifiques et de ses idées éclairées, qui ont grandement contribué à l'orientation et à la réalisation de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à **Mr. CHETTOUH Salah**, doctorant à l'université de Boumerdès, pour sa participation active au co-encadrement de ce mémoire. Son implication, ses conseils précieux et son soutien tout au long de ce travail ont été d'un apport considérable.

Je tiens également à remercier **Dr. OUALI Mohammed Assam**, Maître de conférences à l'université de M'sila qui m'a fait l'honneur d'être le président du jury de mémoire. J'adresse aussi mes vifs remerciements au **Prof. BOUCHAMA Idris**, Professeur à l'université de M'sila, qui m'a fait l'honneur de faire partie du jury d'examen de ce travail

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

Dédicace	
Remerciements	
Table des matières	i
Liste des Abréviations	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Introduction générale	1

Chapitre I : Matériaux III-V : propriétés, applications PV et simulation avec Silvaco-ATLAS

I.1 Introduction	5
Partie 1 : Les cellules photovoltaïques (PV)	
I.2 Définition des cellules photovoltaïques	5
I.3 Historique du photovoltaïque	6
I.4 Le principe de fonctionnement des cellules PV	7
I.5 Fonctionnement d'une cellule solaire	8
I.6 Semi-conducteurs à gaps direct et indirect	9
I.7 Généralité sur le spectre solaire	10
I.7.1 Soleil	10
I.7.2 Structure	10
I.7.3 Le rayonnement solaire	11
I.7.4 Spectre solaire	11
I.8 Conversion photovoltaïque	13
I.9 Caractéristique I-V d'une cellule solaire	13
I.9.1 Caractéristique J-V sous obscurité	14
I.9.2 Caractéristique sous ensoleillement	14
I.9.3 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire dans le cas idéal	16
I.9.4 Caractéristique (J-V) dans le cas réel	18
I.10 Les générations des cellules solaires photovoltaïques	19
Partie II : Les matériaux semi-conducteurs de type III-V	
I.11 Théorie des alliages	20
I.12 Classification des alliages	21
I.12 Définitions des semi-conducteurs III-V	21
I.13 Les alliages de type III-V	22
I.14 Propriétés des matériaux III-V	23
I.15 Structure cristalline des matériaux III-V	25
I.16 Propriétés optiques des semi-conducteurs III-V	26
I.17 Structure des bandes d'énergie	27
Partie III : Logiciel de simulation numérique TCAD-SILVACO	
I.18 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO	28
I.19 Présentation d'Atlas	29
II.19.1 DeckBuild	30
II.19.2 TonyPlot	31
I.20 Ordres de commandes d'Atlas	32
I.21 Spécification de la structure	33
I.21.1 Mesh	34
I.21.2 Régions	34
I.21.3 Electrodes	35
I.21.4 Doping	35
I.22 Spécification des modèles des matériaux	36
I.22.1 Matériau	36
I.22.2 Modèles physiques	36
I.22.3 Illumination (Beam)	37

I.22.4	Contacts	37
I.23	Sélection de la méthode numérique	37
I.24	Spécification des solutions	37
I.25	Analyse des résultats	38
I.26	Conclusion	38
I.27	Références bibliographiques du Chapitre I	40

Chapitre II : Résultats et discussions

II.1	Introduction	43
II.2	Le choix de la structure InGaP/ GaAs	43
II.3	Matériaux et méthodes	44
II.4	La structure de la cellule	45
II.5	paramètres de simulation	46
II.6	Circuit équivalent de la cellule simulé InGaP/GaAs	46
II.7	Le spectre solaire	47
II.8	Simulation de la cellule InGaP/GaAs	48
II.8.1	Simulation de la cellule inferieure GaAs	48
II.8.1.1.	Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante (GaAs)	50
II.8.1.2	Etude de l'effet de dopage de la couche absorbante(GaAs)	52
II.8.1.3	Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon (GaAs)	53
II.8.1.4.	Etude de l'effet de dopage de la couche tampon (GaAs)	55
II.8.1.5.	L'effet de la couche fenêtre sur les caractéristiques de la cellule inferieure (GaAs)	56
II.8.1.6.	L'effet de la couche BSF sur les caractéristiques de la cellule inferieure (GaAs)	56
II.8.1.7	Les caractéristiques J-V de la cellule inferieure (GaAs)	57
II.8.2	Simulation de la cellule supérieure à basede InGaP	58
II.8.2.1.	Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante (InGaP)	60
II.8.2.2	Etude de l'effet de dopage de la couche absorbante(InGaP)	61
II.8.2.3	Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon(InGaP)	63
II.8.2.4.	Etude de l'effet de dopage de la couche tampon (InGaP)	64
II.8.2.5.	L'effet de la couche fenêtre sur les caractéristiques de la cellule supérieure (InGaP)	65
II.8.2.6.	L'effet des doubles couches BSF sur les caractéristiques de la cellule supérieure (InGaP)	66
II.8.2.7	Les caractéristiques J-V de la cellule supérieure (InGaP)	66
II.8.3	Cellule solaire à double jonctions : Structure Tandem (InGaP/GaAs)	67
II.8.3.1.	Présentation de la structure	67
II.8.3.2.	Interprétation	70
II.8.3.3.	Résultats finale	71
II.8.3.4.	L'objectif principal de cette analyse	71
II.9	Conclusion	72
	Conclusion générale	74
	Résumé - Abstract - ملخص	

- TCAD**: Technology Computer-Aided Design
- PV** : Photovoltaïque
- IV** : Courant–Tension (Current–Voltage)
- EQE** : External Quantum Efficiency (Efficacité Quantique Externe)
- IQE** : Internal Quantum Efficiency (Efficacité Quantique Interne)
- J-V** : caractéristiques Densité de courant - Tension
- AM1.5**: Air Mass 1.5 (Spectre solaire standard)
- CVD** : Chemical Vapor Deposition
- PECVD** : Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
- MBE** : Molecular Beam Epitaxy
- V_{co}** : Tension en circuit ouvert (Open-Circuit Voltage)
- J_{co}** : Densité de courant de court-circuit (Short-Circuit Current Density)
- FF** : Facteur de forme (Fill Factor)
- η** : Rendement de conversion (Efficiency)
- InGaP** : Indium Gallium Phosphide
- GaAs** : Gallium Arsenide
- ITO** : Indium Tin Oxide
- ARC** : Anti-Reflective Coating
- BSF** : Back Surface Field
- TCO** : Transparent Conductive Oxide
- SILVACO** : Silicon Valley Corporation
- ATLAS** : Moteur de simulation physique des dispositifs de SILVACO
- DEVEDIT** : Outil de maillage et de structure dans SILVACO
- TONYPlot** : Outil de visualisation graphique des résultats
- DOPING** : Paramètre de dopage (type et concentration)
- MESH** : Maillage de la structure simulée

Figure I.1	a) Cellule solaire monocristalline en Si, b) Panneaux (Champ) PV	6
Figure I.2	Le principe de la cellule photovoltaïque	8
Figure I.3	a) Structure et b) Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I.4	Schéma de principe d'un semi-conducteur à gap direct et d'un semi-conducteur à gap indirect	10
Figure I.5	Radiation spectrale pour différents air masse	12
Figure I.6	Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5	13
Figure I.7	Schéma électrique équivalent de la cellule solaire. a) Modèle à simple exponentielle, b) Modèle à double exponentielle	15
Figure I.8	Caractéristique J(V) de la cellule solaire sous ensoleillement et sous obscurité	16
Figure I.9	Schéma équivalent d'une cellule solaire dans le cas réel	18
Figure I.10	Tableau périodique des éléments	22
Figure I.11	Extrait de la classification périodique des éléments III-V	23
Figure I.12	Évolutions de l'énergie de bande interdite et du paramètre cristallin des alliages de composés III-V	24
Figure I.13	Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc-blende	25
Figure I.14	Première zone de Brillouin d'un cristal Zinc-Blende	26
Figure I.15	Structure de bandes du Phosphure d'Indium au centre de la zone de Brillouin (à titre d'exemple)	27
Figure I.16	Atlas entrées et sorties	29
Figure I.17	Menu de commandes de DeckBuild	31
Figure I.18	interface de DeckBuild	31
Figure I.19	Atlas mesh	34
Figure I.20	Régions créées dans la cellule solaire tandem à base de InGaP/GaAs	35
Figure I.21	Atlas dopage	35
Figure I.22	Atlas dopage	36
Figure II.1	Schéma de la cellule monolithique Tandem GaInP/GaA avec ses paramètres technologiques	45
Figure II.2	Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction (InGaP/GaAs)	47

Figure II.3	Spectre solaire AM1.5G	48
Figure II.4	Structure de la cellule solaire GaAs	48
Figure II.5	Structure de la cellule solaire inferieure GaAs simulée	49
Figure II.6	Maillage de la cellule GaAs	50
Figure II.7	Epaisseur de la couche absorbante de la cellule inferieure GaAs	51
Figure II.8	N_A de la couche absorbante de la cellule inferieure GaAs	53
Figure II.9	Epaisseur de la couche tampon de la cellule inferieure GaAs	54
Figure II.10	N_A de la couche tampon de la cellule inferieure GaAs	55
Figure II.11	Caractéristique J-V de la cellule inférieure à base de GaAs	57
Figure II.12.	Couches de cellules supérieures à base de InGaP détaillées	58
Figure II.13	Structure de la cellule solaire supérieure à base de InGaP	59
Figure II.14	Maillage de la cellule supérieure InGaP	60
Figure II.15	Epaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieureInGaP	61
Figure II.16	N_A de la couche absorbante de la cellule supérieureInGaP	62
Figure II.17	Epaisseur de la couche tampon de la cellule supérieureInGaP	63
Figure II.18	N_D de la couche tampon de la cellule supérieure InGaP	64
Figure II.19	Caractéristique J-V de la cellule InGaP	67
Figure II.20	Schéma de la cellule monolithique Tandem GaInP/GaAs avec ses paramètres technologiques	68
Figure II.21	Structure de la cellule solaire à double jonctions InGaP/GaAs	68
Figure II.22	Maillage de la cellule InGaP/GaAs	69
Figure II.23	Caractéristique J-V de la cellule Tandem InGaP/GaAs	71

Tableau I.1 Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K	23
Tableau II.1 Paramètres majeurs pour le réseau ternaire $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ et quaternaire $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$ correspondant aux matériaux GaAs utilisés dans cette conception	46
Tableau II.2 l'effet de l'introduction de la couche fenêtre dans la structure de la cellule inférieure à base de GaAs	56
Tableau II.3 l'effet de l'introduction de la couche BSF dans la structure de la cellule inférieure à base de GaAs	57
Tableau II.4 l'effet de l'introduction de la couche fenêtre dans la structure de la cellule supérieure à base de InGaP	65
Tableau II.5 l'effet de l'introduction des doubles couches BSF dans la structure de la cellule supérieure à base de InGaP	66
Tableau II.6 l'effet de l'introduction de la jonction tunnel dans la structure de la cellule solaire tandem (InGaP/GaAs) simulés sous éclairement AM1.5G	70

Introduction générale

Actuellement, les technologies liées aux énergies renouvelables, notamment dans le domaine de l'énergie solaire, connaissent un essor remarquable. La recherche à l'échelle mondiale y est particulièrement active, en raison du caractère inépuisable de cette source d'énergie : le soleil. Les efforts de recherche visent principalement à accroître l'efficacité des systèmes et à en réduire les coûts. L'énergie solaire photovoltaïque repose sur la conversion de la lumière en électricité, via un phénomène appelé « effet photovoltaïque ». Ce processus permet de générer de l'électricité à partir du rayonnement solaire, utilisable dans diverses situations impliquant des liquides, des solides ou des gaz. Les matériaux utilisés dans cette technologie sont dits « semi-conducteurs », le plus courant étant le silicium. Ce dernier représente plus de 90 % de la production mondiale de modules photovoltaïques, avec une durée de vie pouvant dépasser 40 ans. L'optimisation des paramètres physiques internes des cellules solaires est essentielle pour en améliorer les performances. Elle permet notamment de maximiser des grandeurs clés telles que le facteur de forme, la tension en circuit ouvert ou encore le courant de court-circuit. L'amélioration du rendement des cellules solaires constitue un enjeu majeur pour les laboratoires de recherche. Le choix judicieux des matériaux ainsi que la structure des cellules jouent un rôle déterminant dans cette quête de performance.

Ce travail de recherche a pour objectif l'optimisation des performances d'une cellule solaire tandem (multicouche) à l'aide du logiciel de simulation Silvaco Atlas. Les matériaux choisis pour cette étude sont des semi-conducteurs de type III-V, notamment InGaP pour la cellule supérieure et GaAs pour la cellule inférieure, en raison de leurs excellentes propriétés optoélectroniques. L'étude porte sur l'optimisation de plusieurs paramètres physiques clés, tels que les épaisseurs des couches actives, les niveaux de dopage, ainsi que l'influence des couches supplémentaires (fenêtres et couches BSF – Back Surface Field). Enfin, les caractéristiques courant-tension (J-V) seront simulées afin d'extraire les paramètres de performance optimaux (tels que le courant de court-circuit, la tension à vide, le facteur de forme et le rendement global) pour la cellule tandem modélisée.

Ce mémoire est divisé en deux chapitres essentiels :

Le premier chapitre présente les bases théoriques des cellules photovoltaïques, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques électriques, ainsi qu'un aperçu des matériaux III-V (notamment InGaP et GaAs) et de leurs applications en optoélectronique et

photovoltaïque. Il se termine par une introduction au logiciel de simulation Silvaco Atlas, utilisé pour modéliser les dispositifs semi-conducteurs.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation d'une cellule solaire tandem InGaP/GaAs à l'aide de Silvaco Atlas. L'objectif est d'optimiser ses performances en variant différents paramètres physiques (épaisseurs, dopage, couches fenêtre et BSF), et d'analyser les caractéristiques courant-tension (J-V) afin d'identifier les meilleures configurations.

Enfin, ce travail se conclura par une synthèse des meilleurs résultats obtenus, mettant en évidence les performances optimales de la cellule tandem simulée.

Chapitre I
***Matériaux III-V : propriétés,
applications PV et simulation avec
Silvaco-ATLAS***

I.1 introduction

Les matériaux semi-conducteurs III-V, formés d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V du tableau périodique (comme GaAs, InP ou AlGaAs), présentent des propriétés électroniques et optiques remarquables, notamment une mobilité élevée des porteurs de charge et une large gamme de bandes interdites. Ces caractéristiques en font des candidats privilégiés pour les applications photovoltaïques à haut rendement, en particulier dans les cellules solaires multi-jonctions et les dispositifs à concentration. Afin d'optimiser leurs performances, la simulation numérique joue un rôle essentiel. Le logiciel Silvaco ATLAS, basé sur une approche TCAD (Technology Computer-Aided Design), permet de modéliser avec précision le comportement électrique et optique de ces matériaux dans des structures de cellules photovoltaïques, en tenant compte de paramètres physiques réalistes tels que la génération/récombinaison, la diffusion ou encore les effets de champ électrique.

Ce chapitre est structuré en trois parties principales :

La première partie est consacrée aux cellules photovoltaïques, en abordant leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques électriques ainsi que les types de structures les plus utilisées.

La deuxième partie traite des matériaux semi-conducteurs III-V, tels que InGaP et GaAs, en mettant en avant leurs propriétés physiques et optoélectroniques ainsi que leurs applications dans le domaine photovoltaïque.

Enfin, la troisième partie est dédiée à la présentation du logiciel de simulation Silvaco Atlas, un outil TCAD performant utilisé pour la modélisation numérique des dispositifs photovoltaïques, en particulier les cellules solaires multicouches.

Partie 1 : Les cellules photovoltaïques (PV)

I.2 Définition des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique capable de convertir la lumière en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle génère une tension continue, proportionnelle à l'intensité lumineuse incidente. Les cellules photovoltaïques les plus courantes sont fabriquées à partir de semi-conducteurs, principalement le silicium (Si). D'autres matériaux sont également utilisés, tels que le

séléniure de cuivre et d'indium (CuInSe_2 , CuInGaSe_2) ou le tellure de cadmium (CdTe), bien que leur usage soit plus limité [1].

Un autre exemple notable concerne les cellules photovoltaïques à base de matériaux III-V, comme l'arséniure de gallium (GaAs) ou l' InGaP , qui se distinguent par leur haut rendement et leur excellente stabilité dans des conditions extrêmes. Ces cellules sont particulièrement utilisées dans les applications spatiales, les concentrateurs solaires ou les cellules tandem multi-jonctions, où la performance est prioritaire sur le coût. Les cellules se présentent généralement sous forme de fines plaques d'environ une dizaine de centimètres de côté et d'une épaisseur proche du millimètre, encadrées par deux contacts métalliques. Pour augmenter la puissance produite, elles sont assemblées en modules solaires photovoltaïques, plus communément appelés panneaux solaires [2, 3].



Figure I.1 a) Cellule solaire monocristalline en Si, b) Panneaux (Champ) PV.

I.3 Historique du photovoltaïque [4, 5]

L'histoire de l'énergie photovoltaïque (PV) remonte à 1839, lorsque le physicien français Antoine César Becquerel mit en évidence le principe de l'effet photovoltaïque. Ce phénomène fut ensuite observé plus précisément en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz. C'est en 1923 qu'Albert Einstein apporta une explication théorique complète de ce phénomène, ce qui lui valut plus tard le prix Nobel.

En 1955, une avancée majeure fut réalisée par les chercheurs Chapin, Fuller, Pearson et Prince des laboratoires Bell Telephone, qui développèrent la première cellule photovoltaïque à haut rendement, atteignant 6 %. Quatre ans plus tard, en 1959, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques fut lancé dans l'espace. En 1973, la première maison équipée d'un système photovoltaïque vit le jour à l'université du Delaware, aux États-Unis. Puis, en 1983, la première voiture propulsée par énergie solaire parcourut plus de 4 000 km à travers l'Australie.

Aujourd'hui, grâce à l'amélioration des rendements de conversion et à la baisse des coûts de fabrication, le marché du photovoltaïque connaît une forte croissance. Au cours des vingt dernières années, il a progressé de 20 à 25 % par an, atteignant une capacité installée de 427 MW en 2002. Toutefois, il ne représente encore qu'une infime part de la production énergétique mondiale, avec une contribution inférieure à 0.1 %.

I.4 Le principe de fonctionnement des cellules PV

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur les propriétés des semi-conducteurs. Lorsqu'ils sont frappés par des photons, ces derniers transmettent leur énergie et déclenchent un déplacement d'électrons. Les photons, particules élémentaires véhiculant l'énergie solaire à une vitesse de 300000 km/s, étaient qualifiés de «grains de lumière» par Albert Einstein dans les années 1920. Lorsqu'un photon heurte un matériau semi-conducteur comme le silicium, il libère des électrons de leurs atomes. Ces électrons, en quête de nouveaux emplacements, se déplacent de manière désordonnée. Toutefois, pour produire un courant électrique, leur mouvement doit être orienté dans une direction unique. Pour cela, on utilise deux types de silicium (Voir la Figure I.2): la face exposée à la lumière est dopée avec du phosphore, qui apporte un surplus d'électrons, tandis que l'autre face est dopée avec du bore, qui en contient moins. Cette différence crée un champ électrique entre les deux couches, transformant la cellule en une sorte de pile : la zone riche en électrons devient la borne négative (N), et celle qui en manque devient la borne positive (P). Sous l'effet des photons, les électrons sont propulsés vers la zone N, tandis que les «trous» migrent vers la zone P. Des contacts électriques placés sur chaque face collectent ces charges, permettant ainsi leur circulation dans un circuit externe sous forme de courant continu. Une couche anti-reflet est également ajoutée pour limiter la perte de photons due à la réflexion de la surface [6, 7].

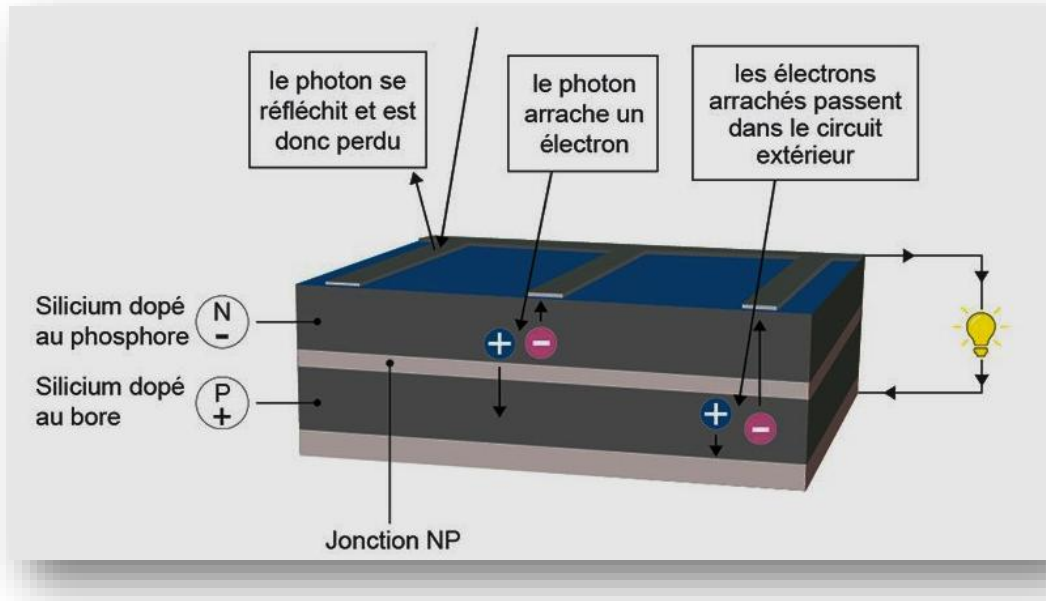


Figure I.2 Le principe de la cellule photovoltaïque [6, 7]

I.5 Fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule solaire peut être considérée comme une jonction p-n soumise à une illumination. Lorsque la région de type n est mise en contact avec celle de type p au sein d'un même monocristal, les électrons majoritaires du côté n diffusent vers la zone p, où ils sont minoritaires, en laissant derrière eux des ions donneurs positifs. Inversement, les trous majoritaires de la région p diffusent vers la zone n, y laissant des ions accepteurs négatifs. Cette diffusion réciproque conduit à la formation d'une zone de charge d'espace (ZCE) au niveau de la jonction, dépourvue de porteurs majoritaires libres, et engendre un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement supplémentaire des porteurs, établissant ainsi l'équilibre thermodynamique. L'ajout de contacts métalliques sur les deux régions (n et p) permet d'obtenir une diode, à condition que ces contacts soient ohmiques (c'est-à-dire qu'ils permettent le passage du courant sans barrière de potentiel). Lorsqu'on éclaire la jonction, les photons dont l'énergie est supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite (gap) excitent les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, créant des paires électron-trou. Si ces paires sont générées dans ou à proximité de la ZCE, le champ électrique interne les sépare efficacement. Enfin, si l'on connecte une charge électrique entre les deux bornes de la cellule, les électrons de la zone n circulent à travers le circuit externe pour rejoindre les trous dans la zone p, ce qui crée une différence de

potentiel (ddp) et un courant électrique dans le circuit, comme illustré sur la figure I.3 [6, 9].

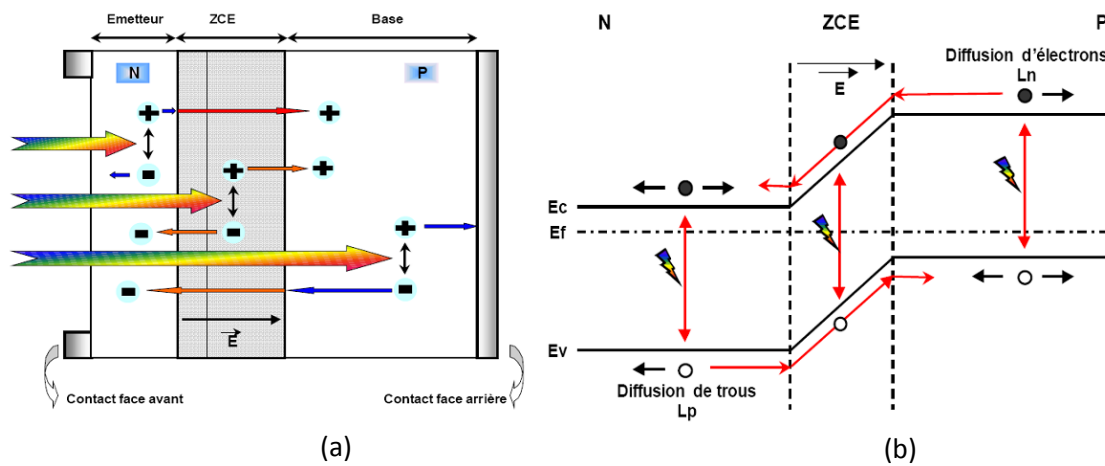


Figure I.3 a) Structure et b) Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [6, 9]

I.6 Semi-conducteurs à gaps direct et indirect

Le courant généré par une cellule solaire provient des transitions optiques entre les bandes d'énergie du semi-conducteur utilisé. Ce dernier se distingue selon la nature de son gap énergétique, qui peut être direct ou indirect. Dans un semi-conducteur à gap direct, les électrons excités et les trous générés possèdent le même vecteur d'onde k , ce qui signifie que le maximum de la bande de valence est aligné avec le minimum de la bande de conduction, facilitant ainsi les transitions optiques. En revanche, dans un semi-conducteur à gap indirect, ces deux niveaux énergétiques ne sont pas alignés : leurs vecteurs d'onde diffèrent, rendant les transitions optiques moins probables sans l'intervention d'un phonon pour conserver l'impulsion. Cette distinction est illustrée dans la Figure I.4. L'absorption optique est donc beaucoup plus faible dans les matériaux à gap indirect que dans ceux à gap direct. Toutefois, ces matériaux présentent l'avantage d'une durée de vie des porteurs plus longue. Par exemple, dans un semi-conducteur à gap direct, cette durée de vie ne dépasse généralement pas 10^{-8} secondes, tandis qu'elle peut être jusqu'à 1000 fois plus élevée dans un semi-conducteur à gap indirect [10].

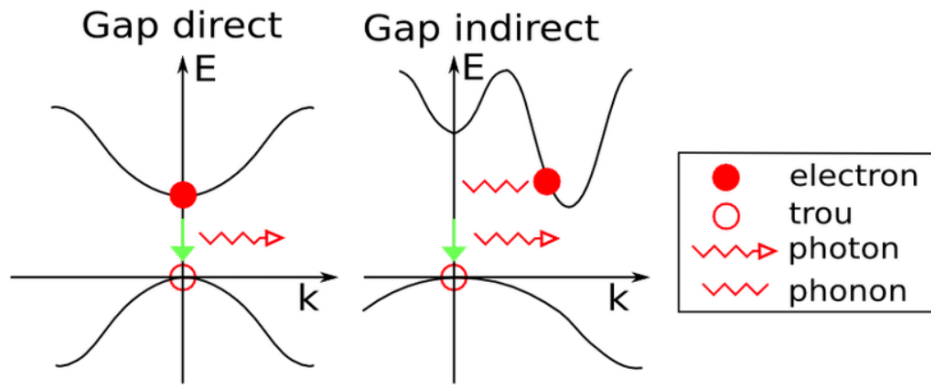


Figure I.4 Schéma de principe d'un semi-conducteur à gap direct et d'un semi-conducteur à gap indirect [8, 10]

I.7 Généralité sur le spectre solaire

I.7.1 Soleil

Le Soleil est une étoile de taille modérée située au centre du système solaire, caractérisée par une activité magnétique intense. De forme presque sphérique, il est constitué de gaz et de plasma. Son diamètre est d'environ 1 392 684 kilomètres, soit 109 fois celui de la Terre, et sa masse atteint 2×10^{30} kg, ce qui équivaut à environ 330 000 fois la masse terrestre. À lui seul, il représente près de 99.86 % de la masse totale du système solaire [11].

I.7.2 Structure

Le noyau du Soleil s'étend du centre jusqu'à environ 0.2 rayon solaire. C'est dans cette région, dont la masse volumique dépasse $150\,000 \text{ kg/m}^3$, que se produit la majeure partie de l'énergie solaire par fusion nucléaire. La zone radiative, qui s'étend de 0.2 à 0.7 rayons solaires, possède une température bien inférieure à celle du noyau, mais conserve une densité élevée. Elle joue un rôle crucial dans le transfert d'énergie par rayonnement du noyau vers les couches externes. Au-delà, de 0.7 à 1 rayon solaire, s'étend la zone convective, où l'énergie est transportée par convection thermique : les gaz chauds remontent vers la surface, se refroidissent, redescendent, puis se réchauffent à nouveau. Cette zone est séparée de la zone radiative par une couche de cisaillement d'environ 3000 km appelée tachocline, qui assure la transition énergétique entre les deux zones. La photosphère, épaisse d'environ 400 km, constitue la surface visible du Soleil. Sa température moyenne est d'environ 6 000 K, et elle est responsable de 99 % de la lumière visible émise par le Soleil. Au-delà de la photosphère se trouve l'atmosphère solaire,

composée de trois régions principales : la chromosphère, la couronne, et l'héliosphère. La chromosphère est séparée de la photosphère par une zone de température minimale, et de la couronne par une zone de transition [12, 13].

I.7.3 Le rayonnement solaire

Le Soleil émet de l'énergie dans toutes les directions sous forme de rayonnement électromagnétique. La Terre en capte une fraction, appelée constante solaire, dont la puissance moyenne au sommet de l'atmosphère terrestre est d'environ 1361 W/m² (et non 1400 W/m² selon les données actuelles). Toutefois, l'atmosphère terrestre, relativement dense, en absorbe une partie (environ 400 W/m²) principalement au niveau des ultraviolets, de l'infrarouge lointain et d'une petite portion du visible. Le rayonnement solaire couvre un spectre électromagnétique continu, allant des ultraviolets (UV) à l'infrarouge (IR), avec un maximum d'intensité dans le domaine visible (environ 500 nm). Les rayons du Soleil mettent en moyenne 8 minutes et 20 secondes ($\approx 8,33$ minutes) pour atteindre la Terre, voyageant à la vitesse de la lumière, soit environ 3×10^5 km/s, sur une distance approximative de 150×10^6 km, qui correspond à 1 unité astronomique (UA) [14].

I.7.4 Spectre solaire

Le développement, l'optimisation et l'analyse des cellules photovoltaïques nécessitent une compréhension approfondie de leur source principale d'énergie : le Soleil. Situé à environ 150 millions de kilomètres de la Terre (soit 1 unité astronomique), le Soleil est l'étoile la plus proche de notre planète. Il est principalement composé de 70 % d'hydrogène et de 28 % d'hélium, les éléments restants étant des traces d'éléments plus lourds. En son cœur, des réactions de fusion thermonucléaire transforment l'hydrogène en hélium, libérant une immense quantité d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le Soleil effectue une rotation sur lui-même en environ 27 jours (variable selon la latitude). Sa masse est environ 330000 fois supérieure à celle de la Terre, et son volume est plus de 1 million de fois plus grand. La température de sa surface visible, la photosphère, est d'environ 6000 °C, tandis que la température en son cœur peut atteindre environ 15 millions de degrés Celsius, condition essentielle à la fusion nucléaire générant les photons solaires. La puissance totale émise par le Soleil est estimée à environ 1.8×10^{17} kW (ou 3.846×10^{26} watts). Vu de la Terre, le Soleil occupe un angle solide d'environ 0.68×10^{-4} stéradians, ce qui signifie que notre planète ne capte qu'environ 2 milliardièmes de l'énergie totale émise. Cette fraction reste néanmoins suffisante pour répondre

largement aux besoins énergétiques mondiaux, si elle est efficacement exploitée. Pour standardiser les conditions d'essai et comparer les performances des cellules photovoltaïques, on utilise le concept d'Air Mass (AM). Il quantifie la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire, selon l'angle θ que fait le Soleil avec la verticale (zénith). Il est défini par la relation : $AM = 1/\cos \theta$ [15, 16]

Ainsi, $AM = 1$ correspond à un Soleil au zénith (midi solaire), tandis que $AM = 1.5$ est couramment utilisé comme condition standard pour les tests des modules solaires [16].

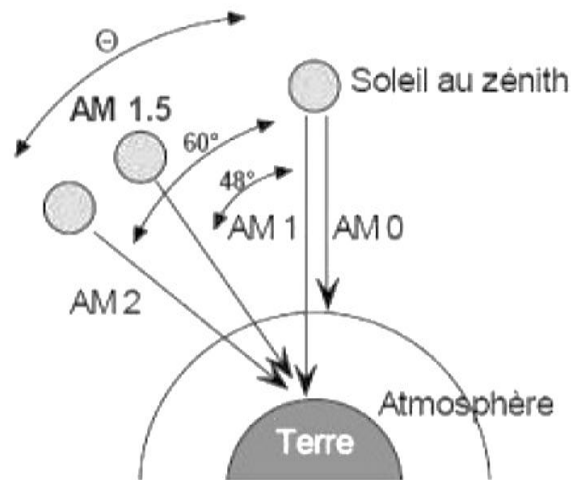


Figure I.5 Radiation spectrale pour différents air masse [17].

Lorsque le Soleil est à la verticale du point d'observation ($\theta = 0^\circ$), on parle de AM1. Le terme AM0 désigne quant à lui l'irradiance solaire en dehors de l'atmosphère, utilisé principalement pour les applications spatiales. Le spectre de référence le plus courant est AM1.5G, où G signifie global, car il inclut à la fois le rayonnement direct et diffus. À l'inverse, AM1.5D ne prend en compte que le rayonnement direct. L'irradiance associée à AM1.5G est de 970 W/m^2 , généralement arrondie à 1 kW/m^2 pour simplifier les calculs [17].

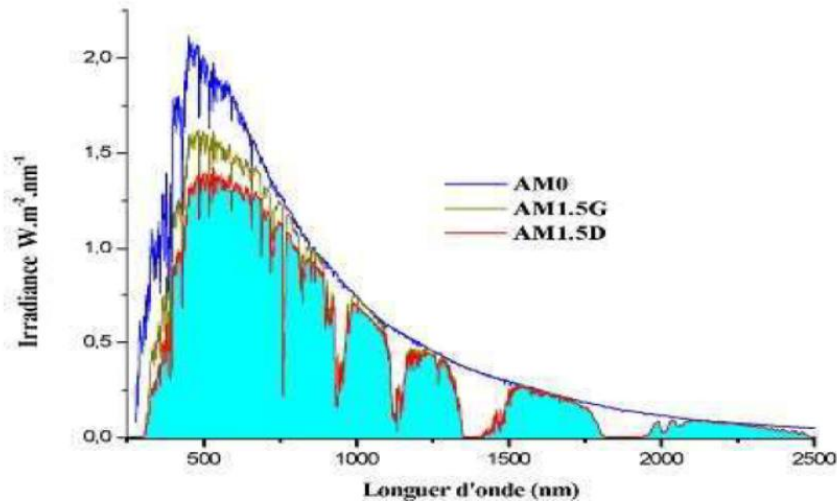


Figure I.6 Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [6, 17].

I.8 Conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque, aujourd'hui largement utilisée, peut-être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique, grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs constitués de composants semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet photovoltaïque. À chaque photon du spectre solaire correspond une énergie E , donnée par la relation : $E=h\nu$, où ν est la fréquence associée à la longueur d'onde du photon, et h est la constante de Planck. Une cellule solaire à base de semi-conducteurs est généralement constituée de deux couches de types de conduction différents : une couche de type p (où les trous sont les porteurs majoritaires) et une couche de type n (où les électrons sont les porteurs majoritaires). Ce dispositif permet de générer un courant électrique vers une charge externe lorsqu'il est exposé à la lumière. Les semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des cellules solaires doivent présenter une bonne stabilité physique afin de garantir la fiabilité des dispositifs dans le temps, et posséder un gap énergétique adapté à l'absorption du spectre solaire, ainsi qu'un coefficient d'absorption élevé pour maximiser l'efficacité de conversion [17].

I.9 Caractéristique I-V d'une cellule solaire [18]

Les performances d'une cellule solaire sont représentées par sa caractéristique courant-tension $I(V)$, qui offre une lecture précise des paramètres essentiels de la cellule, tels que le rendement, les résistances parasites et le facteur de forme. Cette courbe est

également un outil utile pour ajuster et contrôler certains paramètres physiques de la cellule, notamment le dopage et l'épaisseur des différentes couches. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée, à la fois dans l'obscurité et sous illumination. L'exposition à la lumière déplace la courbe I-V vers le bas, dans le quatrième quadrant, en raison du courant photo-généré, ce qui permet la production d'énergie électrique.

I.9.1 Caractéristique J-V sous obscurité

Dans l'obscurité la cellule solaire se comporte comme un composant actif (pas de production de courant). La densité de courant totale traversant la cellule solaire dans l'obscurité est donnée par :

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AK_B T}\right) - 1 \right] \quad (I.1)$$

Où K_B est la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), T la température absolue en degrés kelvin, q la charge élémentaire ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$), A le facteur d'idéalité de la diode et J_0 le résultat de la recombinaison des porteurs minoritaires dans les deux régions quasiment neutres n et p, leur valeur est définie par l'équation (I.2) :

$$J_0 = q \left(\frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} \right) \quad (I.2)$$

Où D_n et D_p sont respectivement les coefficients de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau p et n, n_i la concentration intrinsèque, L_p et L_n la longueur de diffusion du porteur minoritaire dans le matériau p et n et N_D et N_A la concentration des deux régions P et N.

I.9.2 Caractéristique sous ensoleillement

L'analyse du fonctionnement d'une cellule solaire sous ensoleillement peut être abordée selon deux scénarios :

- le cas idéal, dans lequel aucune perte n'est considérée,
- et le cas réel, qui prend en compte l'influence des résistances parasites (série et shunt) sur les performances de la cellule.

Lorsqu'elle est exposée à un spectre solaire contenant des photons d'énergies variées, la cellule solaire génère un photocourant à ses bornes. L'intensité de ce courant dépend directement du flux lumineux incident. La caractéristique courant-densité/tension (J-V) de

la cellule, dans le cas idéal, est décrite par l'équation (I.3), correspondant au modèle à simple exponentielle, qui repose sur l'utilisation d'une seule diode. Dans cette équation, le premier terme à gauche représente le courant de la cellule en absence de lumière (courant d'obscurité, J_{dark}) tandis que le second terme J_L correspond au courant généré par l'illumination.

$$J = J_{01} \left[\exp\left(\frac{qV}{AK_B T}\right) - 1 \right] - J_L \quad (\text{I.3})$$

Le terme J_{01} représente le courant de recombinaison dans les deux régions quasi-neutres N et P. Lorsqu'on prend également en compte la recombinaison dans la zone de charge d'espace (ZCE), le schéma équivalent de la cellule solaire inclut alors deux diodes. Ce modèle est connu sous le nom de modèle à double exponentielle. Le courant en condition d'obscurité est alors exprimé par la formule suivante :

$$J = J_{01} \left[\exp\left(\frac{qV}{K_B T}\right) - 1 \right] + J_{02} \left[\exp\left(\frac{qV}{2K_B T}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.4})$$

$$\text{Sachant que : } J_{02} = \frac{qn_i}{\tau_n + \tau_p} W \quad (\text{I.5})$$

Et W étant la largeur de la zone charge d'espace et τ_n et τ_p les durées de vie des électrons et des trous.

La figure I.7 représente le schéma équivalent de la cellule solaire à simple et double exponentielle.

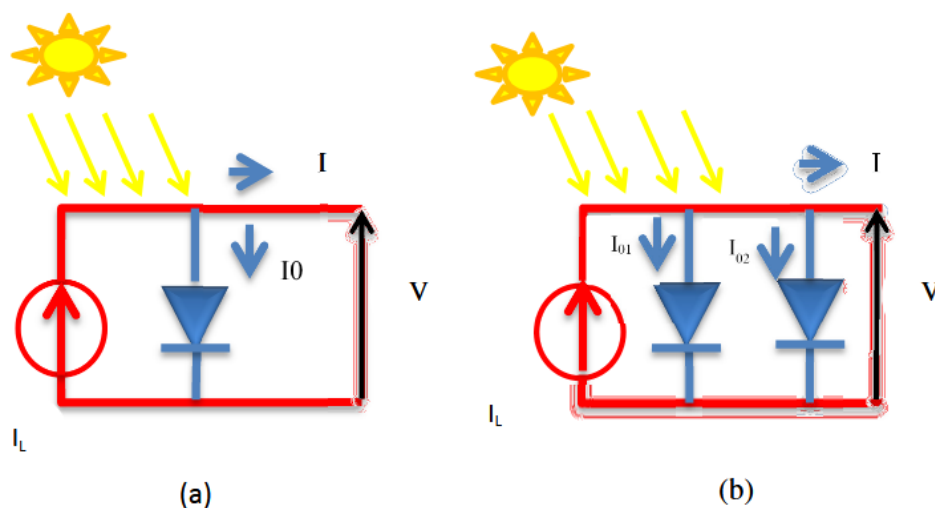


Figure I.7. Schéma électrique équivalent de la cellule solaire. a) modèle à simple exponentielle, b) modèle à double exponentielle.

I.9.3 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire dans le cas idéal [4]

Dans une cellule solaire, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode tandis que sous éclairement la caractéristique à l'allure présentée sur la Figure I.8.

La densité de courant que l'on veut collecter dans le cas d'une cellule photovoltaïque est $J_{\text{éclairement}}$ que l'on notera J dans la suite. La courbe J-V (Figure I.8) permet de déterminer les paramètres électriques de la cellule.

- J_{sc} : Densité de courant de court-circuit
- V_{oc} : Tension de circuit ouvert
- P_{max} : Puissance maximale débitée
- J_{max} : Densité de courant au point de puissance maximale
- V_{max} : Tension au point de puissance maximale

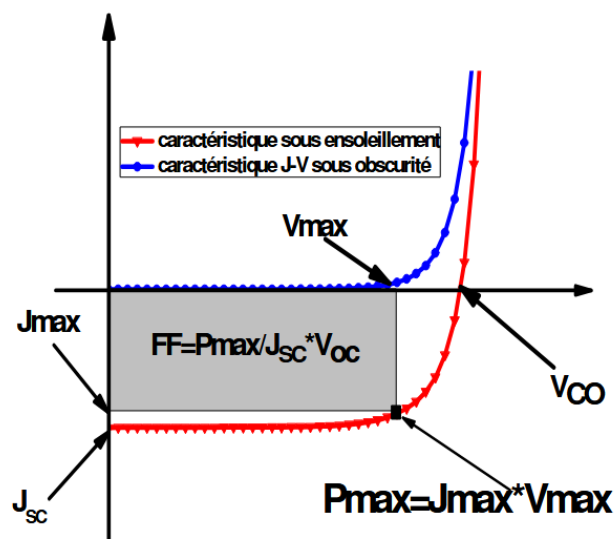


Figure I.8 Caractéristique J(V) de la cellule solaire sous ensoleillement et sous obscurité [18].

Une cellule solaire ne peut être assimilée à aucun générateur classique. On peut en effet la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale et comme une source de courant constante dans la partie horizontale. Une caractéristique fondamentale des cellules solaires est que pour une irradiance et une température donnée, elles n'imposent ni le courant ni la tension de fonctionnement. Seule la courbe J-V est fixée. C'est la valeur de la charge R qui va déterminer le point de fonctionnement. La puissance électrique produite sous éclairement est égale au produit de l'intensité délivrée et

de la tension à ses bornes. Il faut donc adapter R à ces bornes pour la faire fonctionner à P_{\max} .

Puissance maximale, P_{\max} est la puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit $V \cdot J$ est maximum. Si V_{\max} et J_{\max} sont la tension et le courant pour les quels on a ce maximum, la puissance maximale est la surface du plus grand rectangle de coté V_{\max} et J_{\max} qu'on peut inscrire sous la courbe $J(V)$ (Figure I.6).

$$P_{\max} = (JV)_{\max} = V_{\max} \cdot J_{\max} \quad (I.6)$$

La densité de courant de court-circuit (J_{sc}) correspond à la valeur maximum de la densité de courant débitée par la cellule photovoltaïque. Dans ce cas, les deux électrodes qui contactent la zone n et p sont en court-circuit et les porteurs minoritaires vont être drainés par le champ interne. C'est ce courant de porteurs minoritaires qui constitue le courant de court-circuit. La valeur de J_{sc} est limitée par des aspects optiques (absorption limitée du flux lumineux, réflectivité du substrat, absorption dans les couches d'encapsulation du module) et par la longueur effective de diffusion des porteurs minoritaires. A distribution spectrale donnée, ce paramètre dépend aussi de l'irradiance du rayonnement incident.

La tension de circuit ouvert (V_{oc}) correspond à la valeur de tension qui permet de réduire suffisamment la barrière de potentiel V_D pour obtenir un courant global nul. En effet, les porteurs photo-générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction (électron coté n , trou coté p), induisant une auto-polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto-polarisation génère un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au courant des porteurs photo-générés. La V_{oc} est liée au rapport entre J_{sc} et J_s par la relation (I.7), et donc aux recombinaisons des porteurs de charge dans le volume et en surface.

$$V_{oc} = \frac{V}{V_T} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_s} + 1 \right) = V_T \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_s} + 1 \right) \quad (I.7)$$

Le facteur de forme (FF) de la courbe J - V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale égale au produit $J_{sc} \times V_{oc}$. Le FF est limité dans la plupart des cas par des résistances parasites et son expression est donnée par la relation (I.8):

$$FF = \frac{P_{\max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{V_{\max} \cdot J_{\max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (I.8)$$

On en vient donc au paramètre référence pour évaluer la qualité d'une cellule solaire : « **le rendement de conversion (η)** » qui est le rapport entre la puissance fournie par celle-ci et la puissance incidente. Il s'exprime selon la relation (I.9) en fonction des paramètres extraits de la courbe J-V sous éclairage.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\max} \cdot J_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{oc}} \cdot J_{\text{sc}} \cdot \text{FF}}{P_{\text{in}}} \quad (\text{I.9})$$

Le rendement est souvent utilisé comme paramètre pour comparer les performances de différentes cellules solaires. Il est défini comme le rapport entre la puissance fournie par la cellule (soit $J_{\text{sc}} \times V_{\text{co}} \times \text{FF}$) et la puissance incidente fournie par le rayonnement solaire. Le rendement dépend donc du spectre solaire et de l'intensité du rayonnement lumineux, ainsi que de la température de la cellule elle-même. Par conséquent, des normes ont été définies afin de permettre la comparaison des cellules solaires entre elles, ainsi les cellules solaires terrestres sont mesurées sous un rayonnement standardisé AM1.5G à une température de 25 °C. AM1.5 signifie que le coefficient Air Mass a une valeur de 1.5. Ce dernier traduit la réduction de la puissance solaire incidente lorsqu'il traverse l'atmosphère et est absorbé par l'air et la poussière. Le G signifie Global et marque la prise en compte des radiations diffuses et directes. Ainsi la puissance incidente calculée pour un rayonnement AM1.5G est de 970 W.m⁻². Par commodité, le spectre a par la suite été normalisé à une valeur de 1000 W.m⁻² afin de faciliter les calculs.

I.9.4 Caractéristique (J-V) dans le cas réel

En fonctionnement réel, une cellule solaire peut être modélisée comme un générateur de courant associé à une diode, représentant la jonction PN en obscurité. À ce modèle s'ajoutent deux résistances parasites : une résistance série (R_s) et une résistance parallèle ou de shunt (R_{sh}), qui traduisent les pertes internes de la cellule.

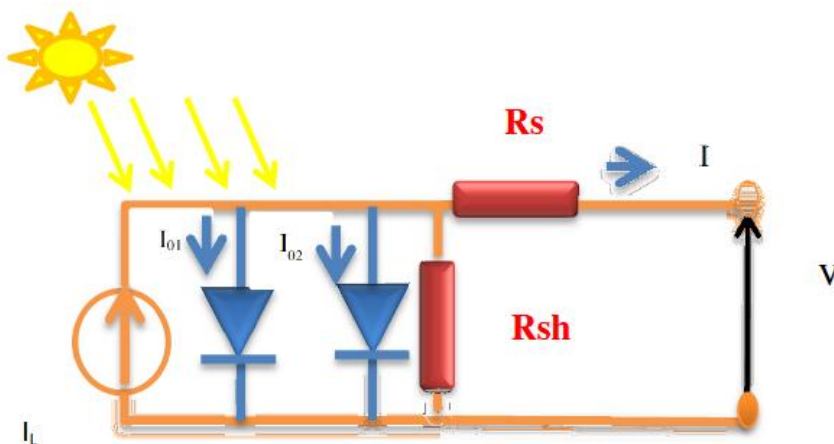


Figure I.9 Schéma équivalent d'une cellule solaire dans le cas réel [18].

I.10 Les générations des cellules solaires photovoltaïques

Au fil des décennies, les cellules photovoltaïques ont évolué en trois générations principales [19, 20] :

1^{re} génération : Cellules en silicium cristallin (c-Si et p-Si) : Ces cellules, représentant encore la majorité du marché (>80 %), sont basées sur le silicium monocristallin ou polycristallin. Elles présentent un rendement élevé (jusqu'à 25 % en laboratoire) mais nécessitent un procédé de fabrication complexe et coûteux, notamment pour obtenir un silicium très pur. Elles offrent une bonne stabilité et durée de vie, mais leur efficacité diminue sous faible éclairage.

2^e génération : Cellules à couches minces (a-Si, CdTe, CIGS) : Conçues pour réduire les coûts de production et la consommation de matière, elles utilisent des films minces déposés sur des substrats flexibles. Les rendements sont plus modestes (6–21 %), mais ces cellules sont légères, souples, et fonctionnent bien sous lumière diffuse. Le CdTe et le CIGS sont les plus performants de cette catégorie. Néanmoins, des problèmes de toxicité (Cd) et de rareté (In, Te) limitent leur développement.

3^e génération : Cellules innovantes et à haut rendement : Cette catégorie regroupe des technologies avancées comme :

- **Les cellules à multijonctions (III-V)** pouvant dépasser 40 % de rendement, surtout en usage spatial ou à concentration.
- **Les cellules organiques (OPV)** à base de polymères, très flexibles et peu coûteuses mais à faible durée de vie.
- **Les cellules hybrides**, combinant production électrique et thermique pour améliorer l'efficacité énergétique globale.

En résumé, chaque génération cherche à améliorer le compromis entre rendement, coût, flexibilité et durabilité, en s'adaptant à des applications variées, allant de l'énergie domestique à l'aérospatiale.

Partie II : Les matériaux semi-conducteurs de type III-V.

Toute matière est composée d'atomes ou de molécules, dont les propriétés dépendent de leur organisation. La classification moderne des états de la matière distingue deux grands types : l'état désordonné, où les particules sont disposées de manière aléatoire (comme dans les gaz, liquides ou solides amorphes), et l'état ordonné, ou cristallin, où les particules sont agencées de façon régulière dans l'espace. La plupart des solides autour de nous appartiennent à cette dernière catégorie [21].

I.11 Théorie des alliages.

La croissance spectaculaire de l'industrie des semi-conducteurs à l'échelle mondiale s'explique par leur rôle central dans la révolution technologique des quarante dernières années. Ces matériaux constituent la pierre angulaire du développement de l'électronique, qui demeure aujourd'hui l'un des marchés les plus vastes et les plus dynamiques au monde. Les semi-conducteurs sont largement utilisés en microélectronique — principalement à base de silicium — ainsi que dans les domaines des radiofréquences, des hyperfréquences, des applications militaires et spatiales, et de l'optoélectronique. La recherche dans le domaine de la microélectronique est particulièrement active et se concentre sur l'exploration de nouveaux matériaux, le développement de procédés innovants et la conception de nouvelles architectures de transistors, afin de répondre à une diversité croissante de besoins : calcul logique, mémoires, électronique analogique, etc.

Par contre les alliages semi-conducteurs représentent un axe fondamental de la recherche scientifique, en raison de la possibilité de moduler l'amplitude du gap énergétique et d'ajuster leurs propriétés physiques selon diverses applications en microélectronique et en optoélectronique. Cet intérêt croissant s'explique par l'élargissement des domaines d'application, notamment avec l'émergence d'une nouvelle génération d'alliages binaires, ternaires et quaternaires de type III-V à base de nitrure, qui se distinguent par leurs remarquables propriétés structurales et électroniques, les rendant particulièrement prometteurs pour la fabrication de dispositifs optoélectroniques à haute performance, malgré une densité très élevée de dislocations ($> 10^{18} \text{ cm}^{-1}$). Les phénomènes physiques liés à ces alliages se manifestent particulièrement à travers les propriétés optiques des puits quantiques et des boîtes quantiques. Bien que le silicium, élément de la quatrième colonne du tableau périodique, constitue la base de plus de 80 % des

applications en microélectronique, son gap énergétique indirect limite ses performances dans les applications optoélectroniques. [22].

I.12 Classification des alliages.

La classification des alliages se fait en combinant des éléments tels qu'A, B, C et D à l'aide des techniques de croissances, on réalise un alliage binaire, ternaire ou quaternaire cristallisant dans la même structure et ayant des paramètres de maille très voisins. Les alliages de façon générale se classent suivant le nombre de constituants dans l'alliage en [23]:

a. Alliage binaire: Il est de la forme AB.

b. Alliage ternaire: Si deux éléments binaires AB et AC sont associés, le composé ainsi formé est un alliage ternaire qui peut être soit:

- Un alliage ternaire anionique de la forme: AB_xC_{1-x} .
- Un alliage ternaire cationique de la forme: $A_xB_{1-x}C$.

c. Alliage quaternaire: On a également dans la gamme des alliages les matériaux quaternaires dont lesquels quatre composés binaires sont associés, ce type d'alliage est caractérisé par deux coefficients stoechiométriques x et y. Ces alliages peuvent être soit:

- Des solutions quadratiques de la forme : $A_{x-1}B_xC_{1-y}D_y$.
- Des solutions triangulaires qui se divisent de leur part en deux classes:
 - Des solutions purement anioniques sous la forme : $AB_xC_yD_{1-x-y}$.
 - Des solutions purement cationiques sous la forme : $A_xB_yC_{1-x-y}D$.

I.12 Définitions des semi-conducteurs III-V.

La croissance rapide de l'industrie des semi-conducteurs à l'échelle mondiale est intimement liée à leur rôle central dans la révolution technologique des quatre dernières décennies. Ces matériaux constituent la base de l'électronique moderne, un secteur qui demeure l'un des marchés les plus dynamiques et les plus influents à ce jour. Les semi-conducteurs sont essentiels dans de nombreux domaines : microélectronique (principalement à base de silicium), radiofréquences, hyperfréquences, applications militaires et spatiales, ainsi qu'en optoélectronique, notamment pour les cellules solaires photovoltaïques. Parmi ces matériaux, les composés III-V occupent une place de choix. Ce sont des matériaux composites élaborés à partir d'un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique (comme le bore, l'aluminium, ou le gallium) combinés à des éléments de la colonne V (tels que l'azote, le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine) dans le

tableau de Mendeleïev (Tableau I.1). Ces composés permettent de moduler finement les propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs, notamment le gap énergétique, ce qui les rend particulièrement adaptés aux dispositifs à haute performance. Parmi les exemples courants de matériaux III-V figurent l'arséniure d'aluminium (AlAs), le nitrure d'aluminium (AlN), le phosphore d'aluminium (AlP), le nitrure de bore (BN) ou encore l'antimoniure d'aluminium (AlSb). La recherche dans ce domaine est très active et vise à développer de nouveaux matériaux, procédés de fabrication et architectures de dispositifs pour répondre à des besoins spécifiques, notamment en matière de rendement, de miniaturisation, de stabilité thermique ou de compatibilité optoélectronique.



Figure I.10 Tableau périodique des éléments.

I.13 Les alliages de type III-V.

Ces dernières années, les semi-conducteurs III-V ont suscité un fort intérêt scientifique et commercial en raison de leurs excellentes propriétés intrinsèques, telles qu'une forte mobilité électronique et un gap direct favorisant l'émission lumineuse. Ces caractéristiques les rendent idéaux pour de nombreuses applications : microélectronique rapide, dispositifs de puissance, radiofréquences, spatial et optoélectronique. Contrairement au silicium, limité par sa faible mobilité et son gap indirect, les matériaux comme GaAs, GaP ou InGaP offrent de meilleures performances. La recherche se concentre sur le développement de nouveaux matériaux et procédés pour améliorer l'efficacité des cellules photovoltaïques à couches minces [24].

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est d'autant plus renforcé par la possibilité de créer des alliages complexes — ternaires, quaternaires, voire quinaires — par substitution partielle d'un élément par un autre du même groupe. Cette flexibilité permet de

moduler la largeur de la bande interdite et d'adapter les propriétés optiques sur une large gamme, ouvrant ainsi la voie à une multitude d'applications, tant en microélectronique de haute vitesse qu'en optoélectronique avancé.

IIIA	IVA	VA
5 10.811 B BORE	6 12.011 C CARBONE	7 14.007 N AZOTE
13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILICIUM	15 30.974 P PHOSPHORE
31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSENIC
49 114.82 In INDIUM	50 118.71 Sn ETAIN	51 121.76 Sb ANTIMOINE
81 204.38 Tl THALLIUM	82 207.2 Pb PLOMB	83 208.98 Bi BISMUTH

↑ III-V ↑

Figure I.11 Extrait de la classification périodique des éléments III-V

I.14 Propriétés des matériaux III-V.

Les matériaux III-V, formés d'éléments des colonnes III et V du tableau périodique, présentent des propriétés électroniques variées selon leur composition. Les composés à base d'éléments légers comme le bore ou l'aluminium possèdent généralement un gap énergétique large et indirect, avec une masse effective élevée, ce qui les rend peu adaptés à l'électronique rapide. En revanche, des semi-conducteurs binaires tels que GaAs, GaSb, InP, InAs ou AlAs, ainsi que leurs alliages ternaires et quaternaires (ex.: $GaxAl_{1-x}As$, $GaxIn_{1-x}As$), offrent d'excellentes performances pour les applications en hyperfréquences grâce à leur mobilité électronique élevée et à la possibilité d'ajuster leurs propriétés par substitution [25].

Le tableau I.1 résume cette situation en donnant l'énergie E_g de bande interdite, la masse effective m^*/m_0 (où m^* et m_0 sont respectivement la masse effective et la masse de l'électron dans le vide) des électrons du bas de la bande de conduction, la mobilité électronique à champ faible μ et le paramètre cristallin a .

Tableau I.1 Propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K [25].

Composé III-V	E_g (eV)	m^*/m_0	μ (cm ² /V.s)	a (Å)
BN	7.5			3.6150
AlP	2.45			5.4510

AlAs	2.16			5.6605
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
BP	2.0			4.5380
GaN	3.36	0.19	380	$a=3.189, c=5.185$
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
GaSb	0.72	0.042	5000	6.0959
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSb	0.17	0.0145	80000	6.4794

A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à caractère métallique. On considérera donc essentiellement les composés à base de gallium (GaAs, GaSb), ou d'indium (InP, InAs et InSb), dont les propriétés sont les plus intéressantes [25]. Le diagramme de la Figure I.12 représente les variations de l'énergie de bande interdite en fonction du paramètre cristallin a qui varie lui-même avec la composition. Les points du graphe figurent la position des composés binaires stœchiométriques, et les lignes représentent l'évolution du gap E_g et du paramètre cristallin a , en fonction de la composition des alliages ternaires. Certaines lignes présentent un point anguleux qui dénote une transition entre un gap direct et un gap indirect. Ce diagramme est donc très important parce qu'il permet de connaître la composition de tout alliage ternaire susceptible d'être déposé en couche mince, par épitaxie, sur un substrat binaire comme GaAs ou InP. Les matériaux III-V offrent donc une grande variété de compositions permettant de modifier leurs propriétés électroniques [26].

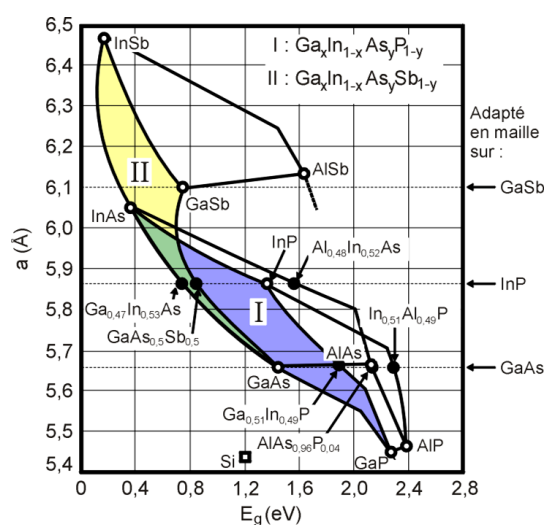


Figure I.12 Évolutions de l'énergie de bande interdite et du paramètre cristallin des alliages de composés III-V [26].

I.15 Structure cristalline des matériaux III-V.

La majorité des matériaux III-V adoptent une structure cristalline de type sphalérite, également appelée "Zinc-Blende", comme illustré à la figure I.13. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de $a\sqrt{3}/4$ [111], où a représente le paramètre de maille du matériau [24]. De ce fait, dans les matériaux III-V, les liaisons atomiques ne sont pas simplement covalentes comme dans le silicium. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III. Dans le cas du phosphore d'indium, le phosphore possède cinq électrons périphériques et l'indium trois. Dans le cristal, chaque atome de phosphore est entouré de quatre atomes d'indium, et chaque atome d'indium est entouré de quatre atomes de phosphore. Il se produit alors un échange d'électrons, et le cristal se construit avec les ions P^+ et In^- , qui ont tous quatre électrons périphériques. Cette répartition est à l'origine du caractère partiellement ionique et partiellement covalent des liaisons (semi-conducteurs polaires), qui sont orientées dans l'espace suivant les axes de symétrie d'un tétraèdre régulier [27].

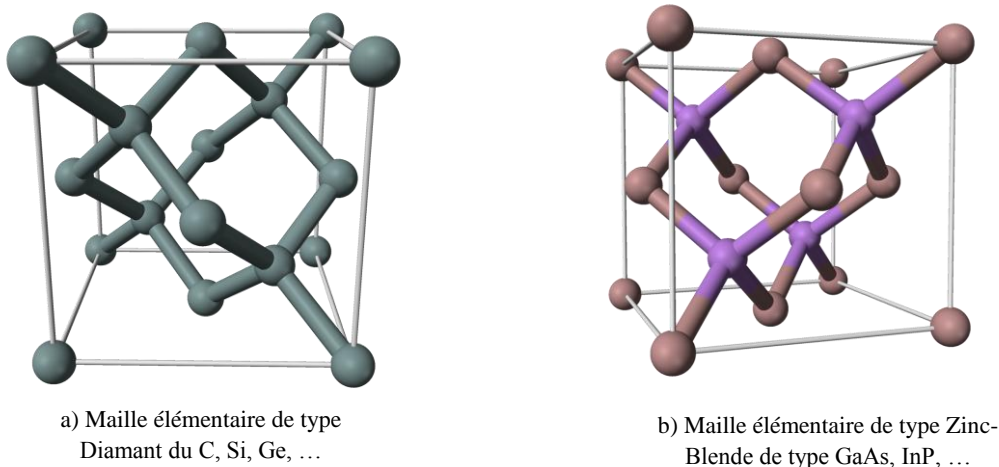


Figure I.13 Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc-blende [24].

Rappelons que la zone de Brillouin des réseaux cfc a la forme d'un octaèdre tronqué par les six faces d'un cube, comme cela est illustré sur la Figure I.14. Elle présente un centre de symétrie à l'origine (noté Γ) et des axes de symétrie:

- Les axes $\langle 100 \rangle$ à symétrie d'ordre 4 (Δ),
- Les axes $\langle 111 \rangle$ à symétrie d'ordre 6 (Λ),
- Les axes $\langle 011 \rangle$ à symétrie d'ordre 2 (Σ).

Les points de rencontre de chacun de ces axes avec les frontières de la zone de Brillouin jouent un rôle essentiel dans la théorie des bandes. On les note généralement de la manière suivante:

- Points X de coordonnées $(2\pi/a, 0, 0)$ sur les axes $\langle 100 \rangle$;
- Points L de coordonnées $(\pi/a, \pi/a, \pi/a)$ sur les axes $\langle 111 \rangle$;
- Points K de coordonnées $(0, 3\pi/2a, 3\pi/2a)$ sur les axes $\langle 011 \rangle$.

Il est à noter que les deux sous-réseaux cfc de la structure Zinc-Blende, du fait de leur décalage $a/4$ [111], ne sont pas centrosymétriques. Il en découle des propriétés physiques différentes suivant les directions cristallographiques considérées. On peut notamment citer l'anisotropie d'attaque chimique et l'anisotropie des caractéristiques mécaniques [27].

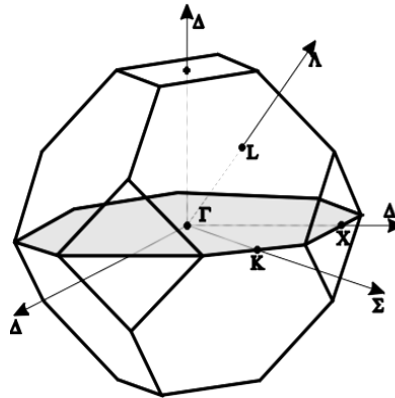


Figure I.14 Première zone de Brillouin d'un cristal Zinc-Blende [27].

II.16 Propriétés optiques des semi-conducteurs III-V.

La fonction diélectrique complexe joue un rôle fondamental dans l'analyse de la réponse optique des semi-conducteurs III-V, tels que le GaAs, l'InP ou l'AlN. Une compréhension approfondie de leurs propriétés optiques est essentielle pour la conception de dispositifs optoélectroniques performants. Ces matériaux se caractérisent notamment par une bande interdite directe, qui facilite l'absorption et l'émission efficaces de photons — un atout majeur pour des applications telles que les diodes électroluminescentes (LED) et les lasers. Leur large plage d'énergies de bande interdite, allant de l'infrarouge à l'ultraviolet, leur confère une grande polyvalence dans le domaine optoélectronique. En outre, les effets de polarisation (spontanée et piézoélectrique), présents dans les structures de type wurtzite, influencent significativement leurs performances optiques. Un indice de réfraction élevé et des effets optiques non linéaires enrichissent encore leur potentiel, notamment en photonique avancée. Toutefois, à forte excitation, l'absorption par porteurs

libres peut dégrader les performances optiques, ce qui impose un contrôle rigoureux des conditions de fonctionnement. Grâce à cet ensemble de propriétés, les semi-conducteurs III-V sont devenus incontournables dans les technologies de pointe, telles que les photodétecteurs, les lasers et autres composants optoélectroniques [28].

I.17 Structure des bandes d'énergie.

La représentation la plus pertinente des surfaces d'énergie accessibles aux électrons s'effectue dans l'espace réciproque, également appelé espace des vecteurs d'onde k [3]. Pour simplifier cette analyse, on examine généralement les variations de l'énergie E en fonction de k , le long des directions de plus haute symétrie dans cet espace. En se limitant à la première zone de Brillouin, la structure de bandes des composés III-V — qui sont au cœur de notre étude — présente une configuration typique illustrée par la figure (I.15), représentant la structure de bandes électronique.

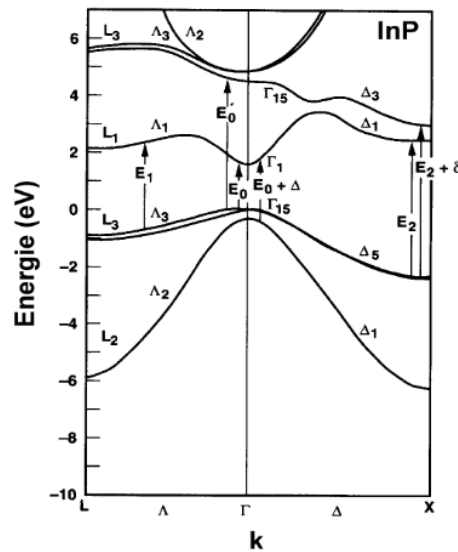


Figure I.15 Structure de bandes du Phosphore d'Indium au centre de la zone de Brillouin (à titre d'exemple).

Dans les semi-conducteurs III-V à transition directe, comme GaAs ou InP, les propriétés électroniques et optiques sont dominées par la bande de conduction minimale et la bande de valence maximale, toutes deux situées au centre de la zone de Brillouin (point Γ). Cette configuration favorise une forte mobilité électronique, grâce à une faible masse effective des électrons. On observe aussi la présence de vallées secondaires (L et X) sur la bande de conduction, associées à des électrons plus lourds et moins mobiles, ce qui influence certains mécanismes de transport [28].

Partie III : Logiciel de simulation numérique TCAD-SILVACO

L'utilisation des technologies de la microélectronique pour la fabrication des composants permet une intégration élevée tout en réduisant les coûts de production. Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) sont des outils essentiels pour modéliser le comportement physique et électrique des composants électroniques. Ils permettent ainsi de réduire les délais et les coûts liés au développement, tout en offrant la possibilité d'explorer et d'optimiser des solutions visant à améliorer les performances des dispositifs. Parmi les simulateurs disponibles sur le marché (ISE, SYNOPSIS, SILVACO, etc.), tous reposent sur un principe de fonctionnement similaire.

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le simulateur TCAD-SILVACO, et plus précisément ses modules ATHENA et ATLAS. Cette partie est consacrée à la présentation du logiciel TCAD-SILVACO, à son mode d'utilisation pour la création de programmes de simulation, à son principe de fonctionnement, ainsi qu'à ses principaux modules : ATHENA, utilisé pour simuler les procédés technologiques, et ATLAS, dédié à la simulation du comportement électrique de la structure. Nous décrirons ensuite les différentes étapes de la simulation du procédé technologique.

I.18 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est une entreprise américaine basée à Santa Clara, en Californie. Elle figure parmi les principaux fournisseurs de solutions logicielles professionnelles pour la simulation par éléments finis et la conception assistée par ordinateur dans le domaine de l'électronique, connues sous le nom de TCAD (Technology Computer-Aided Design). Ces outils sont largement utilisés par les entreprises de microélectronique pour la recherche, le développement et la conception de dispositifs semi-conducteurs. Fondée en 1984 par le Dr. Ivan Pesic, la société visait initialement à répondre aux besoins croissants des concepteurs de circuits intégrés analogiques, en particulier pour des modèles SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) de plus en plus précis. L'intégration de SILVACO dans le domaine TCAD s'est concrétisée en 1989, en s'appuyant sur les travaux de recherche du Département des dispositifs physiques de l'Université de Stanford. C'est à partir de là que les simulateurs Athena (pour les procédés technologiques) et Atlas (pour les dispositifs électroniques 2D et 3D) ont vu le jour [29].

Contrairement à certains outils limités à des composants spécifiques, SILVACO a été conçu de manière générale pour couvrir un large éventail de dispositifs semi-conducteurs, grâce à l'intégration de modèles physiques avancés. Cela lui permet de simuler une grande diversité de composants électroniques avec une grande précision [29].

I.19 Présentation d'Atlas

La simulation précise des dispositifs semi-conducteurs constitue un enjeu majeur tant pour l'industrie que pour les milieux de recherche. Le simulateur ATLAS a été spécifiquement développé pour la modélisation en deux et trois dimensions des composants semi-conducteurs, en tenant compte de leurs propriétés électriques, optiques et thermiques. Il intègre une bibliothèque de matériaux prédéfinis, tout en offrant la possibilité à l'utilisateur d'introduire ses propres matériaux selon ses besoins [30].

ATLAS permet de prédire les performances électriques de la plupart des composants en régime continu (DC), alternatif (AC), transitoire ou en réponse fréquentielle. Au-delà de l'analyse des caractéristiques électriques externes, il fournit des informations détaillées sur les distributions internes telles que les concentrations de porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel électrostatique. Ces données sont essentielles pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ces simulations reposent sur la résolution numérique de l'équation de Poisson ainsi que des équations de continuité des électrons et des trous, sur un maillage bidimensionnel défini par l'utilisateur ou généré automatiquement, représentant la structure du composant étudié [30].

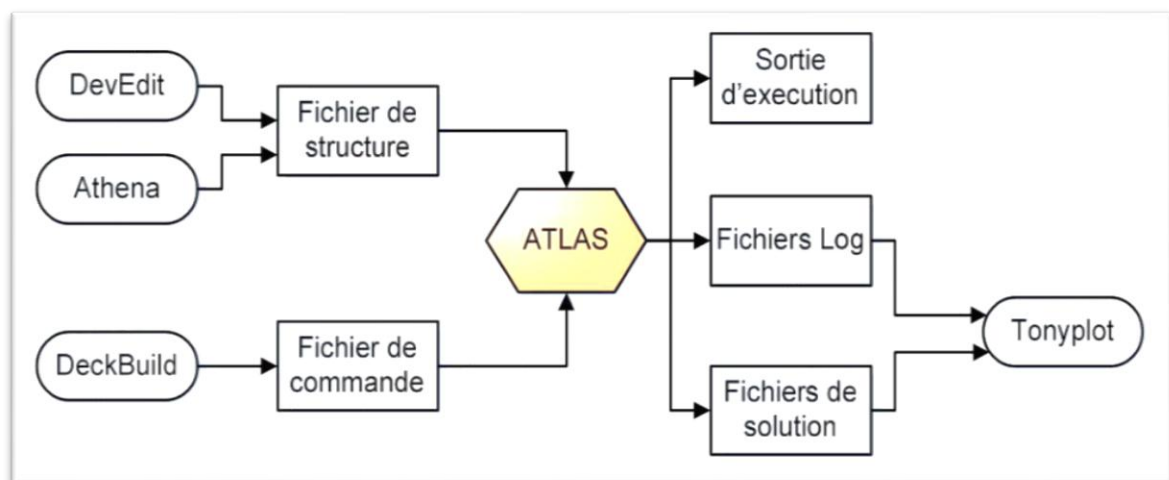


Figure I.16 Atlas entrées et sorties [29].

Le schéma de la Figure I.16 représente les différents types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas » [31] :

A. Fichiers d'entrée :

A.1 Fichier de commande :

- Fichier texte contenant les instructions nécessaires à l'exécution de la simulation dans Atlas.

A.2 Fichier de structure :

- Contient la géométrie du dispositif à simuler.
- Généré à partir des outils **Athena** ou **DevEdit**.

B. Fichiers de sortie :

B.1 Fichier Runtime :

- Affiche l'état de progression de la simulation.
- Signale les erreurs et les messages d'avertissement.

B.2 Fichier Log :

- Enregistre les valeurs de **tensions** et **courants** issus de l'analyse du dispositif.
- Représente le **comportement électrique** du composant.

B.3 Fichier de solution :

- Contient les **données physiques** (2D ou 3D) du dispositif à un état précis de la simulation.
- Inclut les **valeurs des variables solutions** en différents points du composant.

II.19.1 DeckBuild

DeckBuild est un environnement graphique interactif utilisé pour le développement de procédés et la simulation de dispositifs, il comprend (voir la Figure I.17) [32]:

- Une **fenêtre d'édition** pour la création des fichiers d'entrée,
- Une **fenêtre de sortie** pour afficher les résultats et contrôler l'exécution,
- Des **fenêtres contextuelles (pop-up)** spécifiques à chaque simulateur, offrant un accès complet au langage de commande et à l'exécution.

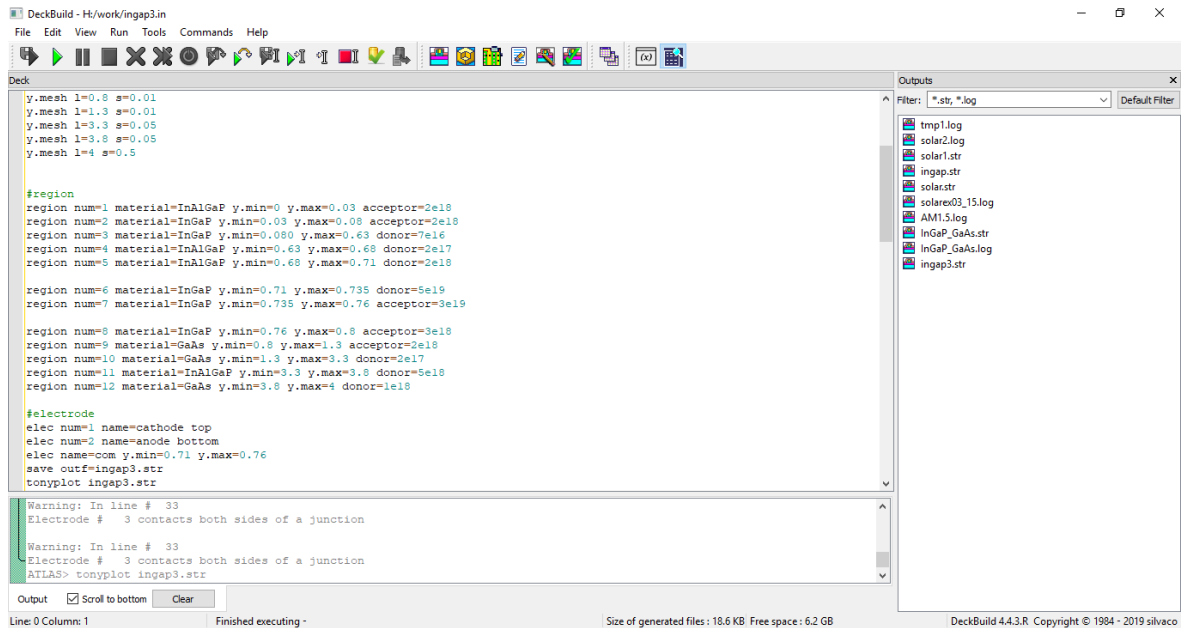


Figure I.17 Menu de commandes de DeckBuild.

II.19.1 TonyPlot

TonyPlot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF, Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). TONYPLOT peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DECKBUILD, VWF ou SPDB [33].

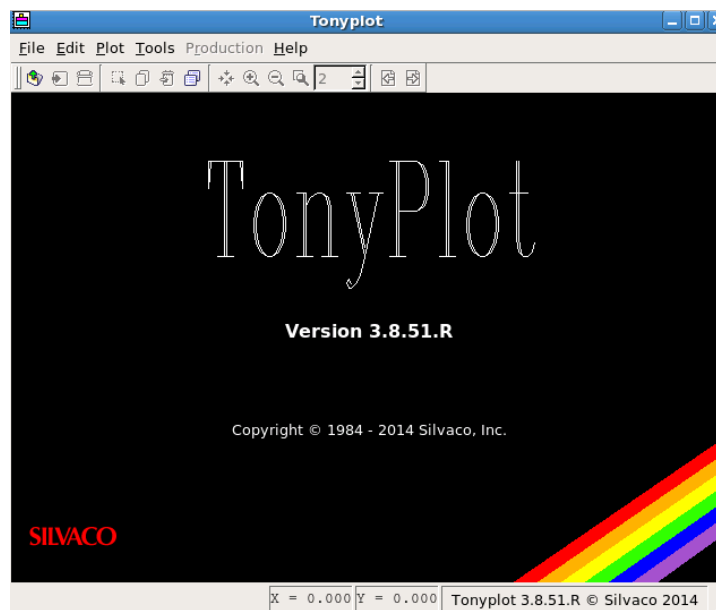


Figure I.18 interface de DeckBuild [33].

I.20 Ordres de commandes d'Atlas

Après avoir présenté l'outil de simulation Atlas de SILVACO-TCAD, ainsi que sa structure interne et son mode de fonctionnement, nous abordons à présent l'organisation des commandes spécifiques à sa logique de programmation. Ces commandes sont regroupées en cinq catégories principales, qui doivent impérativement être ordonnées correctement. Un mauvais agencement entraîne des messages d'erreur et empêche l'exécution correcte du programme. Par exemple, si les paramètres ou modèles de matériaux ne sont pas définis dans l'ordre requis, le simulateur risque de ne pas les reconnaître ni les appliquer [34].

Les commandes fondamentales sont [34]:

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

- ❖ **LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée, qu'elle soit C.C., transitoire ou C.A., générée par la commande SOLVE est sauvée après la commande LOG (donc les informations sauvées sont de type électrique et elles sont, par exemple, en fonction de la tension de polarisation ou de la source de lumière). Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.
- ❖ **SOLVE** : ordonne à Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- ❖ **LOAD** : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conditions initiales à d'autres points de polarisation.
- ❖ **SAVE** : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- ❖ **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou solution.
- ❖ **TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » de post processus graphique des donnés. Elle permet de présenter les solutions trouvées pendant la simulation sous forme de graphe.

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

I.21 Spécification de la structure

Silvaco Atlas reçoit les fichiers d'entrée qui contient les programmes de simulation de DeckBuilt. Atlas est appelé à exécuter ces derniers par la commande suivante : go atlas

Le format des commandes d'Atlas est le suivant [34, 36]:

< STATEMENT > < PARAMETER > = < VALUE >

Exemple : material mat=InGaP nc300=1.30e20

I.21.1 Mesh

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

Le format général pour définir le maillage est :

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

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

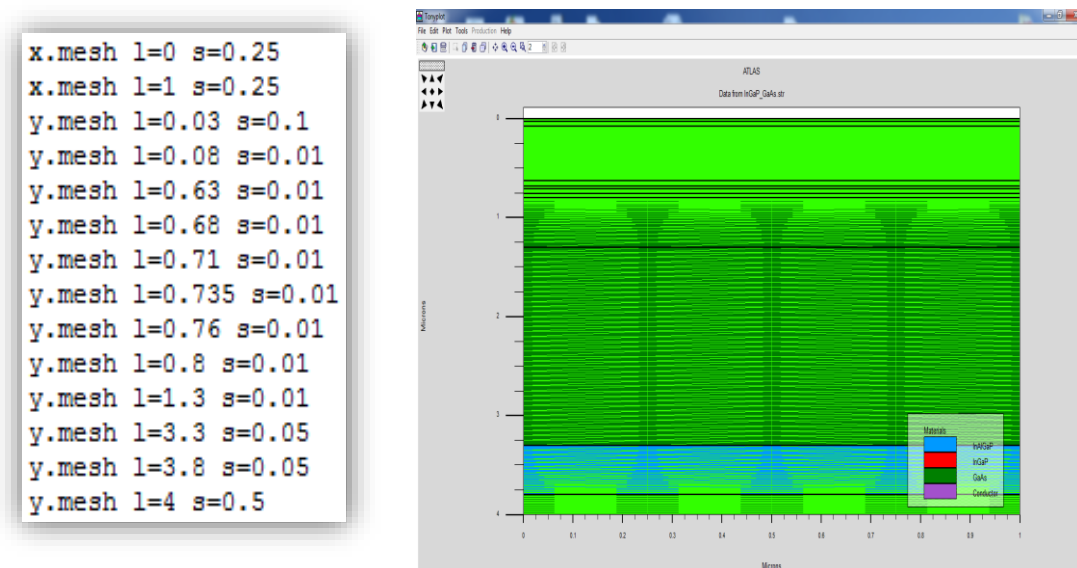


Figure I.19 Atlas mesh [34].

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

I.21.2 Régions

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

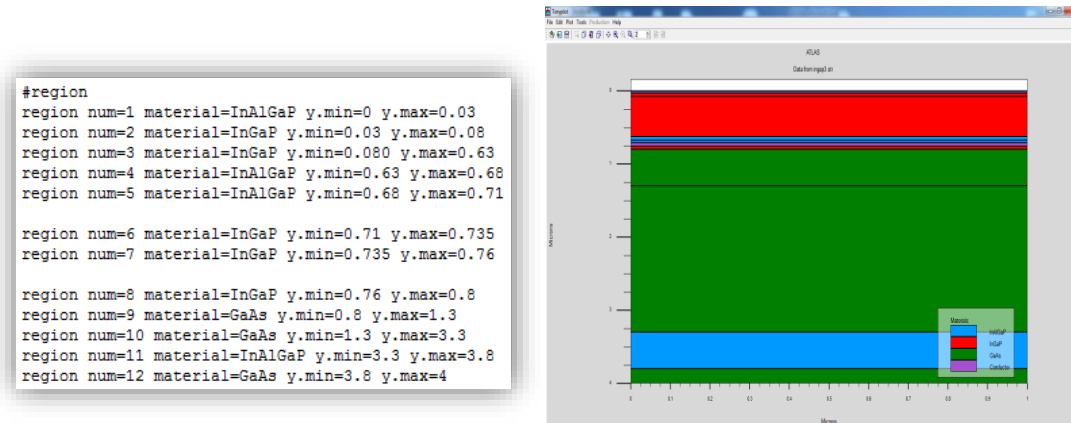


Figure I.20 Régions créées dans la cellule solaire tandem à base de InGaP/GaAs.

I.21.3 Electrodes

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

Le format pour définir les régions est le suivant :

ELECTRODE NAME=<electrode name><position parameters>

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

Electrode num=1 name=cathode top

Electrode num=2 name=anode bottom

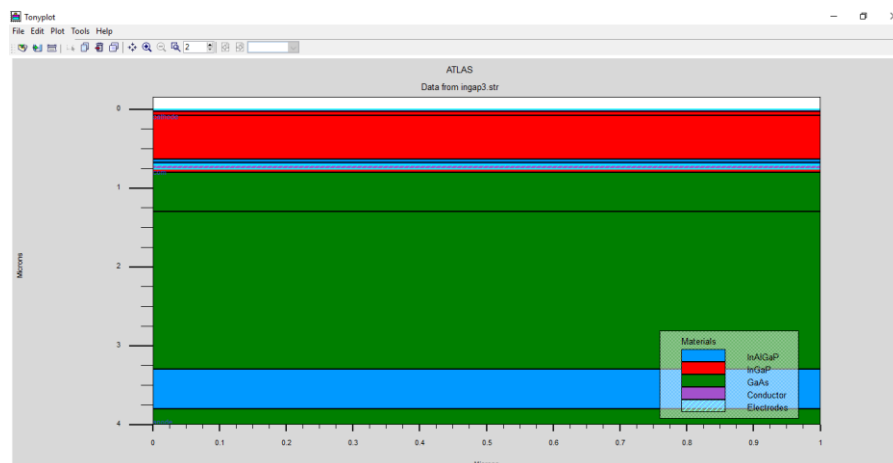


Figure I.21 Atlas dopage.

I.21.4 Doping

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

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

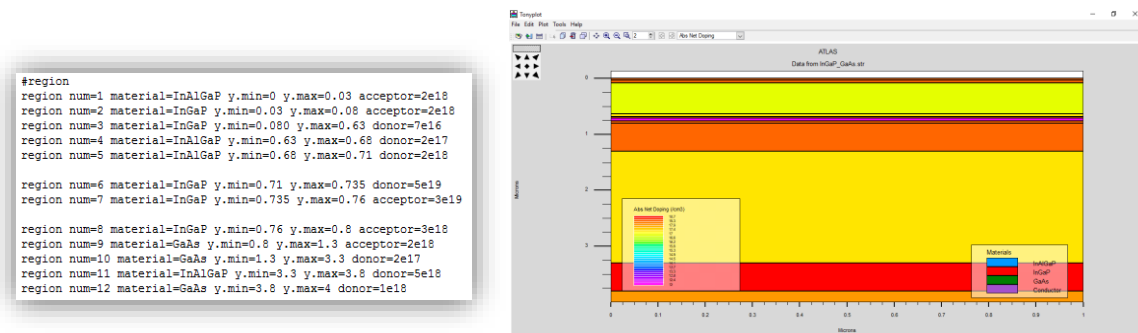


Figure I.22 Atlas dopage.

I.22 Spécification des modèles des matériaux [34, 36]

Après la définition de la structure du dispositif, l'étape suivante consiste à spécifier les modèles des matériaux, répartis en quatre sous-parties :

I.22.1 Matériau

- Utilisation de la commande MATERIAL pour définir les propriétés du matériau.
- Exemple :

```
material mat=InAlGaP mun=2150 mup=141 nc300=1.20e20 nv300=1.28e19
```
- Paramètres typiques :
 - EG300 (gap à température ambiante)
 - MUN / MUP (mobilité des électrons et trous)
 - TAUN0 / TAUP0 (durée de vie de recombinaison)
 - NC300 / NV300 (densités des états)

I.22.2 Modèles physiques

- Commande : MODELS
- Cinq catégories :
 1. Mobilité
 2. Recombinaison
 3. Statistiques des porteurs
 4. Ionisation d'impact
 5. Effet tunnel

- Exemple :

MODELS CONMOB FLDMOB SRH

- CONMOB : dépendance à la concentration
- FLDMOB : dépendance au champ électrique
- SRH : recombinaison Shockley-Read-Hall

I.22.3 Illumination (Beam)

- Pour les dispositifs optoélectroniques (ex : cellules solaires), il est possible de configurer :
 - Sources lumineuses, leur intensité, orientation, et localisation
 - Définition précise du spectre lumineux, polarisation, réflectivité, et tracé de rayons

I.22.4 Contacts

- La commande CONTACT définit les propriétés des électrodes.
- Syntaxe :
CONTACT NAME=anode current
- Permet de spécifier : type de contact, position, conditions aux limites

I.23 Sélection de la méthode numérique [36]

- Le choix de la méthode numérique se fait par la commande **METHOD**.
- Trois techniques de résolution sont disponibles dans **Silvaco Atlas** :
 1. **Gummel (découplée)** : résolution séquentielle des équations, adaptée aux systèmes faiblement couplés.
 2. **NEWTON (entièrement couplée)** : résolution simultanée des équations, adaptée aux systèmes fortement couplés.
 3. **BLOC** : combinaison des méthodes Gummel et Newton pour différentes parties du système.

I.24 Spécification des solutions [34]

Une fois la méthode numérique choisie, on définit les solutions à calculer à l'aide des commandes suivantes :

LOG :

- Enregistre les résultats électriques (DC, AC, transitoires) dans un fichier.
- Exemple :
log outf=InGaP_GaAs.log

SOLVE :

- Lance la résolution pour un ou plusieurs points de polarisation.

SAVE / LOAD :

- **SAVE** : enregistre l'état de la solution (ex. : SAVE OUTF=SOL.STR)
- **LOAD** : recharge une solution enregistrée pour réutilisation (ex. : LOAD INFILE=SOL.STR)

I.25 Analyse des résultats [36]

- Une fois la simulation terminée, les résultats peuvent être :
 - **Visualisés graphiquement** avec la commande **TONYPLOT**
 - **Extraits numériquement** à l'aide de la commande **EXTRACT**

Exemple :

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

I.26 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques et techniques essentielles à la compréhension et à l'analyse des dispositifs photovoltaïques.

Dans une première partie, nous avons défini les cellules solaires photovoltaïques, retracé leur historique, et expliqué en détail leur principe de fonctionnement, depuis l'absorption du rayonnement solaire jusqu'à la génération du courant électrique. Les notions de gap direct et indirect, de spectre solaire, ainsi que la caractéristique courant-tension (I-V) ont été présentées afin de mieux appréhender les performances d'une cellule.

La deuxième partie s'est concentrée sur les matériaux semi-conducteurs de type III-V, qui occupent une place majeure dans le développement des dispositifs photovoltaïques à haute efficacité. Nous avons abordé leur structure cristalline, leur comportement optique, ainsi que leur structure de bandes d'énergie, tout en introduisant la théorie et la classification des alliages.

Enfin, la troisième partie a introduit le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, outil numérique puissant pour la modélisation et l'optimisation des dispositifs à semi-conducteurs. Une attention particulière a été portée sur l'environnement Atlas, en détaillant les étapes clés de simulation : définition de la structure, des modèles physiques, choix de la méthode numérique, spécification des solutions et analyse des résultats.

Ce socle théorique et pratique constitue une base solide pour aborder la simulation avancée de cellules photovoltaïques et explorer de nouvelles configurations de matériaux, en particulier les alliages III-V, dans le cadre d'applications solaires à haut rendement.

I.27 Références bibliographiques du Chapitre I

- [1] N.Guerrou et A.Gouareh, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2021.
- [2] Green, M. A. (2000). Photovoltaics: Technology Overview. *Energy Policy*, 28(14), 989–998.
- [3] A. Luque et S. Hegedus (2011) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2^{ème} ed.) Wiley.
- [4] M. Hadjab, Mémoire de Magister, Université de Sidi Bèl Abbès, 2011.
- [5] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- [6] M. Hadjab, Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bèl Abbès, 2018.
- [7] H. Madani et S. Soltani, Mémoire de Master, Université de M'Sila, 2021.
- [8] T. Mambrini, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud – France, 2014.
- [9] S. Mekliche, Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2017.
- [10] T. Mambrini, Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2015.
- [11] D. A. Vallado (2013) *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, (4^{ème} ed.) Microcosm Press.
- [12] <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/overview>
- [13] E. Chaisson et S. McMillan (2017) *Astronomy: A Beginner's Guide to the Universe* (8^{ème} ed.) Pearson Education.
- [14] NASA. (2024) Solar Radiation & Solar Constant. Retrieved from: <https://www.nasa.gov>
- [15] J. A. Duffie et W. A. Beckman (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes* (4^{ème} ed.) Wiley.
- [16] M. Iqbal (1983) *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press.
- [17] A. Labadi, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2022.
- [18] A. Mahfoud, Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2015.
- [19] <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/types-de-cellules/>
- [20] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/cellules-photovoltaiques.html>
- [21] https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/materiau_iii-v.php4
- [22] A. F. Sekkal-Haddouche, Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2021.
- [23] Y. Bouradja, Mémoire de Magister, Université de Sidi Bèl Abbès, 2009.
- [24] N. Baghdadli, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2013.

- [25] M. El-Moufakkir, Mémoire de Master, Université de Fès, 2012.
- [26] A-R. Karaouzene, Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2009.
- [27] Cours de transistor à effet de champ, <http://www.polytech-lille.fr>
- [28] S. Adachi (2005) Properties of Group-III-V Semiconductors, Wiley.
- [29] ATLAS User's Manuel, Device simulation software", SILVACO International, California. 2011.
- [30] B. Garcia, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2007.
- [31] S. Daniel, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [32] DeckBuild User's Manual, Device simulation software", SILVACO International, California. 2013.
- [33] TonyPlot User's Manual, Device simulation software", SILVACO International, California. 2012.
- [34] S. Chettouh, Mémoire de Master, Université de BBA, 2019.
- [35] K. Zeghdar, Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2014.

Résultats et discussions

II.1 Introduction

L'énergie solaire représente aujourd'hui l'une des principales alternatives aux sources d'énergie fossile, en raison de son caractère renouvelable, propre et abondant. Face aux enjeux énergétiques et environnementaux mondiaux, de nombreux efforts de recherche sont déployés afin d'augmenter le rendement des cellules photovoltaïques tout en réduisant leurs coûts de fabrication.

Parmi les approches prometteuses, la conception de cellules solaires à hétérojonction attire une attention particulière, notamment en raison de leur capacité à minimiser les pertes d'énergie et à améliorer l'efficacité de conversion. Le choix des matériaux semi-conducteurs et la modélisation précise de ces dispositifs sont des éléments essentiels pour optimiser leurs performances.

Dans ce contexte, nous avons étudié et simulé une cellule solaire tandem de type InGaP/GaAs, un système à double jonction présentant un bon appariement de bande interdite et une complémentarité dans l'absorption spectrale. Différents paramètres physiques et technologiques ont été variés lors de la simulation (épaisseur des couches, dopage, largeur de bande interdite, etc.) afin d'évaluer leur influence sur les performances de la cellule (tension en circuit ouvert, courant de court-circuit, facteur de forme, rendement global, etc.).

Les résultats obtenus seront présentés sous forme de graphes et accompagnés d'une analyse détaillée permettant de mieux comprendre l'impact de chaque paramètre sur le comportement de la cellule. Ces travaux s'inscrivent dans une perspective d'optimisation des structures tandem en vue d'un développement de cellules solaires à haut rendement pour des applications aussi bien spatiales que terrestres.

II.2 Le choix de la structure InGaP/ GaAs

Le choix des matériaux semi-conducteurs joue un rôle crucial dans l'amélioration du rendement des cellules solaires. Ce choix dépend principalement de la bande interdite (gap d'énergie). Pour les cellules à jonction simple, le rendement optimal est obtenu avec un gap autour de 1.4 eV, comme c'est le cas du GaAs, qui a permis à la société Alta Devices d'atteindre une efficacité de 28.8 %. Toutefois, ces cellules restent limitées par la théorie de Shockley–Queisser.

Pour dépasser cette limite, on utilise des cellules en tandem, combinant deux jonctions avec des gaps décroissants : entre 1.75 et 1.85 eV pour la jonction supérieure (InGaP) et environ 1.4 eV pour la jonction inférieure (GaAs). Ce choix permet une meilleure absorption du spectre solaire.

Dans notre travail, nous avons simulé une cellule tandem InGaP/GaAs, qui a montré un rendement supérieur à 30 % sans concentration lumineuse, grâce à une absorption étendue et une réduction des pertes par recombinaison. Ce type de cellule est particulièrement prometteur pour les applications nécessitant un rendement élevé, comme dans le domaine spatial.

II.3 Matériaux et méthodes

Dans notre étude, nous avons utilisé des paramètres technologiques et géométriques spécifiques aux jonctions des matériaux InGaP et GaAs, en nous concentrant particulièrement sur les régions actives, à savoir les émetteurs et les bases de chaque jonction. Les principaux paramètres pris en compte incluent l'épaisseur des couches, la présence d'une couche BSF (Back Surface Field) pour réduire la recombinaison des porteurs minoritaires, ainsi que la couche fenêtre, qui permet de limiter l'absorption parasite de la lumière en surface.

Pour optimiser les performances de la cellule tandem InGaP/GaAs, nous avons adopté une approche paramétrique. Ainsi, lors de chaque série de simulations, un paramètre est maintenu constant tandis que les autres sont systématiquement variés dans une plage de valeurs définie. Cette méthodologie permet d'identifier les combinaisons qui maximisent le rendement global de la cellule.

Les deux sous-cellules (InGaP et GaAs) sont interconnectées par une jonction tunnel, qui joue un rôle crucial dans le transfert efficace des charges électriques entre les deux jonctions. L'épaisseur de cette jonction, ainsi que les matériaux sélectionnés pour son émetteur et sa base, ont également été optimisés dans le cadre de notre simulation, car ils influencent fortement la résistance série et le couplage électrique global.

Les résultats de simulation obtenus ont permis de concevoir une structure à double jonction performante, offrant un rendement optimal sous une température standard de 300 K (conditions AM1.5). Les tableaux présentés ci-après récapitulent les meilleures

performances obtenues pour chaque configuration testée, en mettant en évidence l'impact de chaque paramètre sur le rendement de la cellule. Ces résultats constituent une base solide pour le développement de cellules solaires tandem à haut rendement.

II.4 La structure de la cellule

La cellule solaire à hétérojonction InGaP/GaAs se compose de deux sous-cellules : une cellule supérieure, appelée « top cell », et une cellule inférieure, appelée « bottom cell ». Ces deux sous-cellules sont interconnectées par une jonction tunnel de type InGaP/InGaP, assurant le transfert efficace des charges. Les paramètres technologiques de la cellule optimisée sont présentés dans la figure suivante :

Anode	
Fenêtre	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$
Emetteur	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$
Base	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$
BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$
BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$
Diode tunnel	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$
Diode tunnel	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$
Fenêtre	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$
Emetteur	GaAs
Base	GaAs
BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$
Substrat	GaAs
Cathode	

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

II.5 paramètres de simulation

La cellule solaire à hétérojonction InGaP/GaAs est constituée de deux cellules : une cellule supérieure dite « top » et une cellule inférieure dite « bottom ». Les deux cellules sont interconnectées par une jonction tunnel InGaP/InGaP. Les paramètres de la cellule optimisée sont illustrés dans la figure suivante :

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

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

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

La cellule solaire à hétérojonction se compose de deux diodes à jonction p-n (multi-jonctions), reliées entre elles par une jonction p-n inversée, appelée jonction tunnel. Chaque sous-cellule est constituée de matériaux semi-conducteurs possédant des bandes interdites décroissantes, afin d'optimiser l'absorption du spectre solaire.

Dans le cas d'une jonction p-n classique (par exemple, l'épitaxie d'un matériau de type n sur un substrat de type p), la jonction tunnel est formée en inversant les polarités : un matériau fortement dopé de type p⁺ est déposé sur un matériau de type n⁺. Le dopage élevé de cette jonction tunnel permet un transfert rapide des porteurs de charge : les électrons se déplacent de la région n⁺ vers n, et les trous de la région p⁺ vers p, assurant ainsi une continuité efficace du courant entre les deux sous-cellules.

Chaque jonction tunnel est équipée d'électrodes pour permettre la collecte du courant. L'anode, généralement en or, est placée sur la face supérieure de la cellule,

couvrant moins de 8 % de la surface afin de minimiser l'ombrage. La cathode, quant à elle, recouvre la face inférieure de la cellule pour une collecte maximale du courant.

La figure II.2 illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à double jonction de type InGaP/GaAs, intégrant une jonction tunnel assurant l'interconnexion entre les deux sous-cellules.

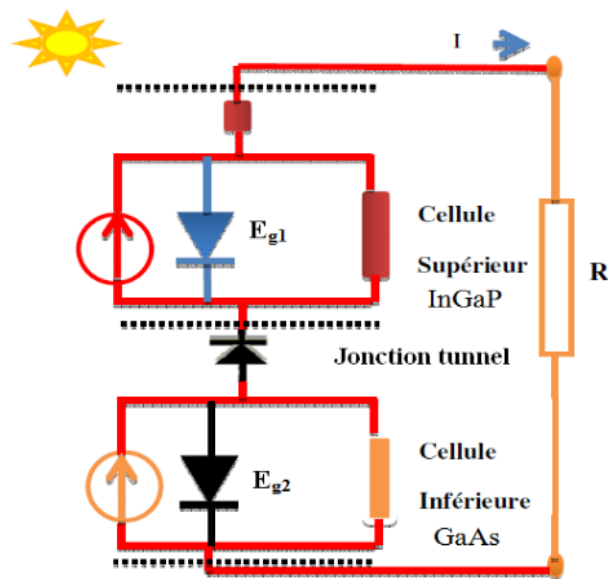


Figure II.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction (InGaP/GaAs).

II.7 Le spectre solaire

La cellule InGaP/GaAs optimisée est exposée à un spectre solaire AM1.5 d'une intensité énergétique de 1000 W/cm^2 , ce qui permet de simuler sa caractéristique courant-tension I-V (courant/tension) et, par conséquent, d'évaluer son rendement.

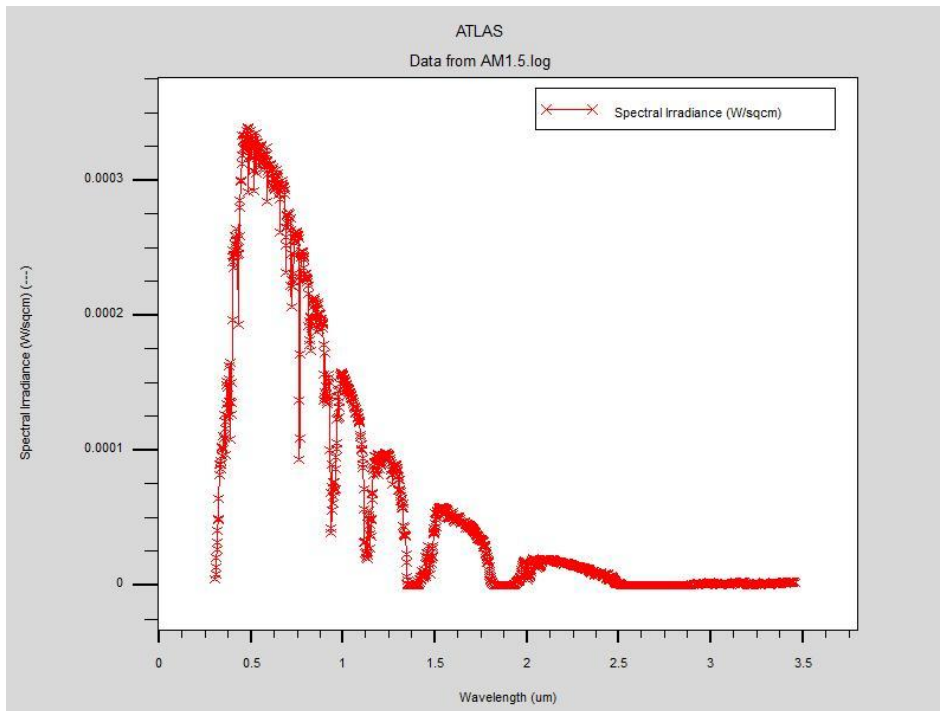


Figure II.3 Spectre solaire AM1.5G.

II.8 Simulation de la cellule InGaP/GaAs

II.8.1 Simulation de la cellule inferieure GaAs

La Figure II.4 illustre la structure de la cellule étudiée à base de GaAs. La couche d’InGaP, utilisée comme fenêtre optique, est positionnée en surface de la cellule. Elle est suivie de deux couches de GaAs jouant respectivement le rôle d’émetteur de type p et de base de type n, puis d’une couche d’InAlGaP de type n servant de barrière de champ arrière (BSF). Les paramètres associés à cette structure sont répertoriés dans le Tableau (II.1).

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

Figure II.4 Structure de la cellule solaire GaAs.

Figure II.5 : Représentation schématique de la structure de la cellule solaire inférieure à base de GaAs, simulée avec le logiciel TCAD SILVACO.

La structure comprend successivement :

- Une couche fenêtre (n-type) assurant une bonne transmission du rayonnement lumineux et servant de contact frontal,
- Une couche tampon destinée à réduire les défauts d'interface et à améliorer la qualité de la jonction,
- Une couche absorbante en GaAs (p-type), principale région de génération des paires électron-trou sous l'effet de la lumière,
- Éventuellement une couche BSF (Back Surface Field) à l'arrière, jouant le rôle de barrière pour repousser les porteurs minoritaires et limiter les recombinaisons,
- Et enfin un contact arrière métallique permettant la collecte du courant.

Cette configuration est optimisée pour maximiser le rendement de conversion tout en assurant une bonne sélectivité spectrale et une réduction des pertes optoélectroniques.

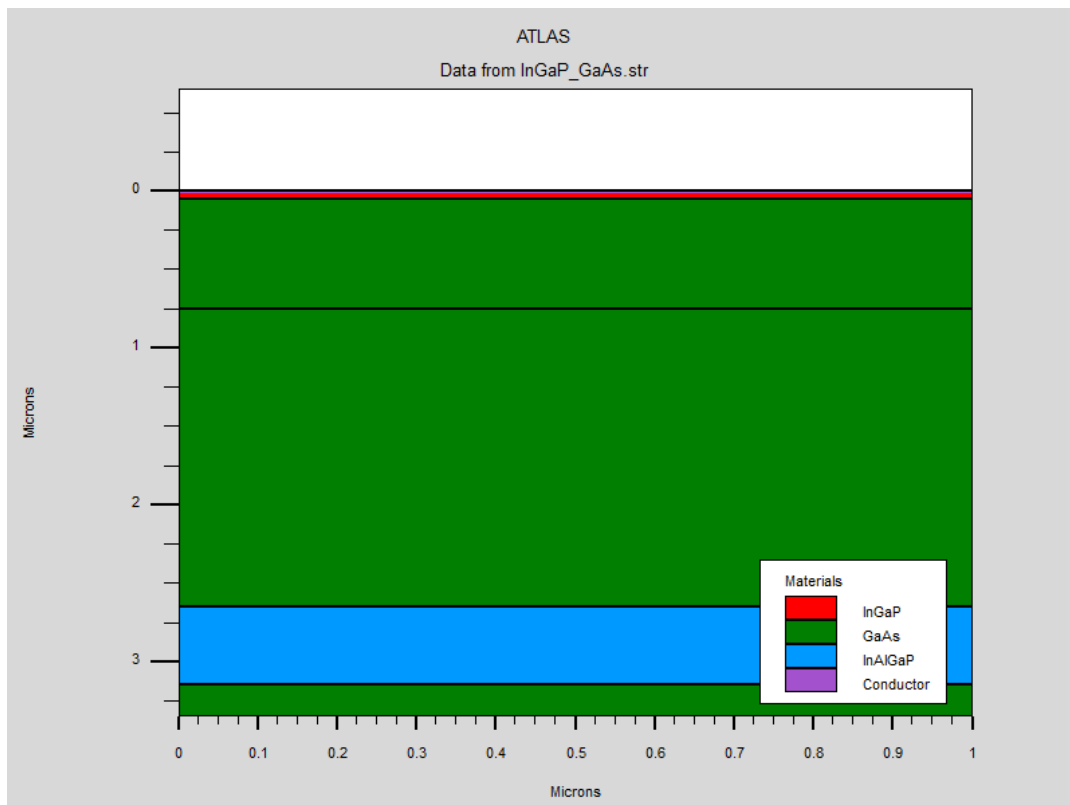


Figure II.5 Structure de la cellule solaire inférieure GaAs simulée.

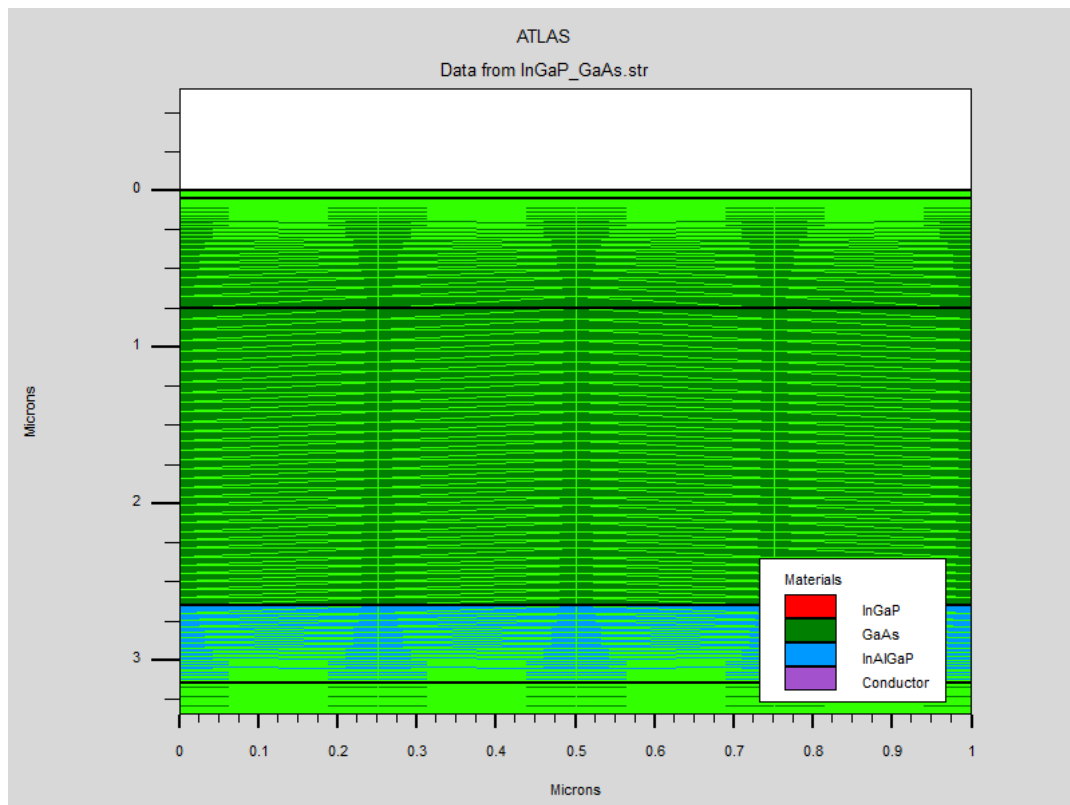


Figure II.6 Maillage de la cellule GaAs.

Figure II.6 : Maillage numérique de la cellule solaire à base de GaAs, généré dans l'environnement de simulation TCAD-SILVACO. Le maillage 2D est finement ajusté aux interfaces critiques entre les différentes couches (fenêtre, tampon, absorbante, BSF), permettant une résolution précise des équations de Poisson et de transport des porteurs. Une densité de maillage plus élevée est utilisée dans les zones à forts gradients de potentiel et de concentration, afin d'assurer la convergence numérique et une précision optimale des résultats liés aux caractéristiques électriques et optiques de la cellule.

II.8.1.1 Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante (GaAs)

Dans la suite de cette section, nous allons étudier l'influence de l'épaisseur de la couche absorbante de la structure inférieure basée sur le GaAs sur les performances photovoltaïques du dispositif. Cette analyse portera particulièrement sur les paramètres clés tels que le courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) ainsi que le rendement de conversion global. L'objectif est de déterminer l'épaisseur optimale permettant de maximiser l'absorption de la lumière tout

en assurant une extraction efficace des porteurs, afin d'améliorer les performances de la cellule solaire. Cette étude sera réalisée à l'aide de simulations numériques sous TCAD-SILVACO, permettant d'observer l'évolution de ces paramètres en fonction de différentes configurations d'épaisseur de GaAs.

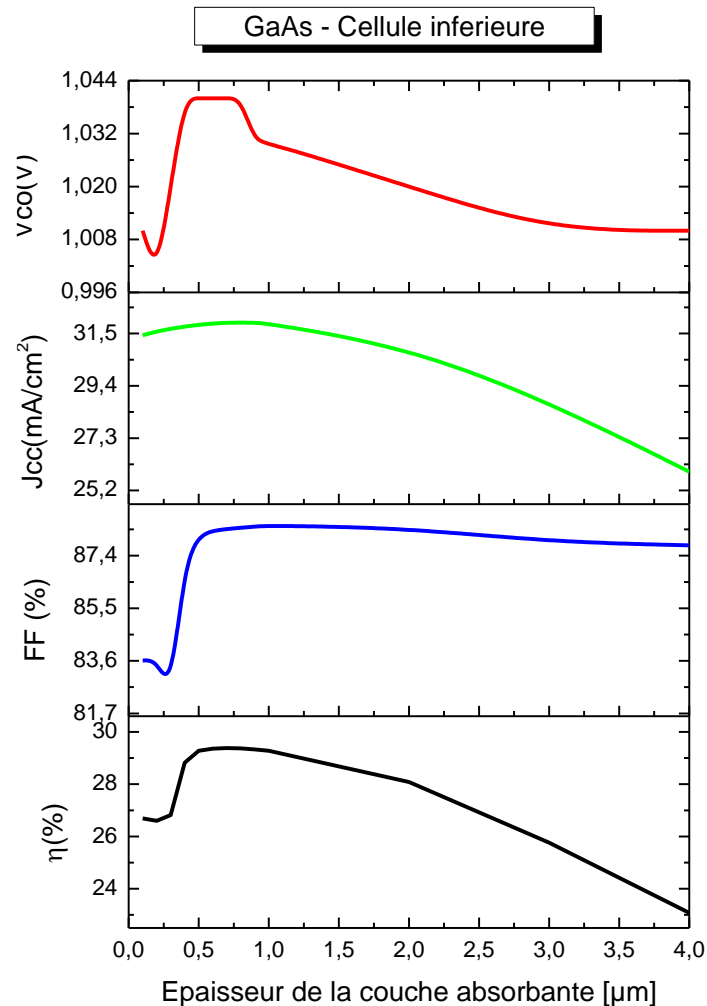


Figure II.7 Epaisseur de la couche absorbante de la cellule inferieure GaAs

Les courbes montrent que la performance de la cellule GaAs s'améliore avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante jusqu'à environ 0,5 – 1 μm, où les meilleures valeurs de tension (V_{oc}), courant (J_{sc}) et rendement (η) sont atteintes. Au-delà de cette épaisseur, ces paramètres diminuent progressivement à cause des recombinaisons et de la collecte moins efficace des porteurs. Ainsi, cette épaisseur représente un compromis optimal entre absorption lumineuse et minimisation des pertes, le meilleur rendement est 29,38 % qui correspond la valeur de l'épaisseur de la couche absorbante = 0,7 μm.

II.8.1.2 Etude de l'effet de dopage de la couche absorbante (GaAs)

Dans la suite de notre travail, nous allons examiner l'effet du dopage de la couche absorbante de la structure inférieure à base de GaAs sur les performances photovoltaïques du dispositif. Cette étude vise à analyser l'impact de la concentration dopante sur les paramètres électriques essentiels, notamment le courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion. Le dopage joue un rôle crucial dans la génération et la collecte des porteurs de charge, influençant ainsi directement le comportement électrique de la cellule. Grâce à des simulations numériques réalisées, nous évaluerons différentes concentrations de dopants afin d'identifier la valeur optimale qui maximise l'efficacité de la cellule solaire.

Figure II.8 présente les courbes qui montrent que la performance de la cellule GaAs dépend fortement de la concentration de dopage dans la couche absorbante. La tension (V_{co}) augmente puis diminue légèrement, tandis que le courant (J_{cc}) diminue avec le dopage, ce qui entraîne une variation du rendement (η) atteignant un maximum (29.11 %) à une concentration optimale qu'est t'égale $= 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Cela reflète un équilibre entre l'amélioration du champ électrique interne et la réduction des pertes par recombinaison, permettant ainsi un dopage optimal pour un rendement maximal.

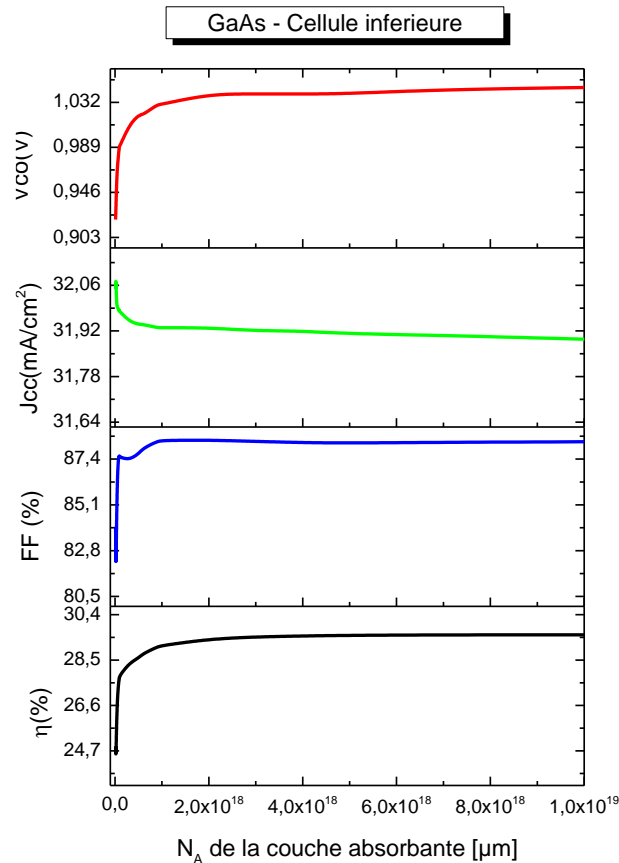


Figure II.8 N_A de la couche absorbante de la cellule inferieure GaAs.

II.8.1.3 Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon (GaAs)

Une autre étape importante de notre étude concerne l'analyse de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur les performances de la cellule solaire. La couche tampon joue un rôle intermédiaire crucial entre l'absorbeur et la couche frontale, en facilitant la formation de la jonction p-n et en réduisant les défauts d'interface. Dans cette optique, nous allons examiner l'impact de différentes épaisseurs de la couche tampon sur les paramètres clés tels que le courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement global. À l'aide de simulations numériques, nous identifierons l'épaisseur optimale permettant de minimiser les pertes de recombinaison et d'améliorer l'efficacité du dispositif photovoltaïque.

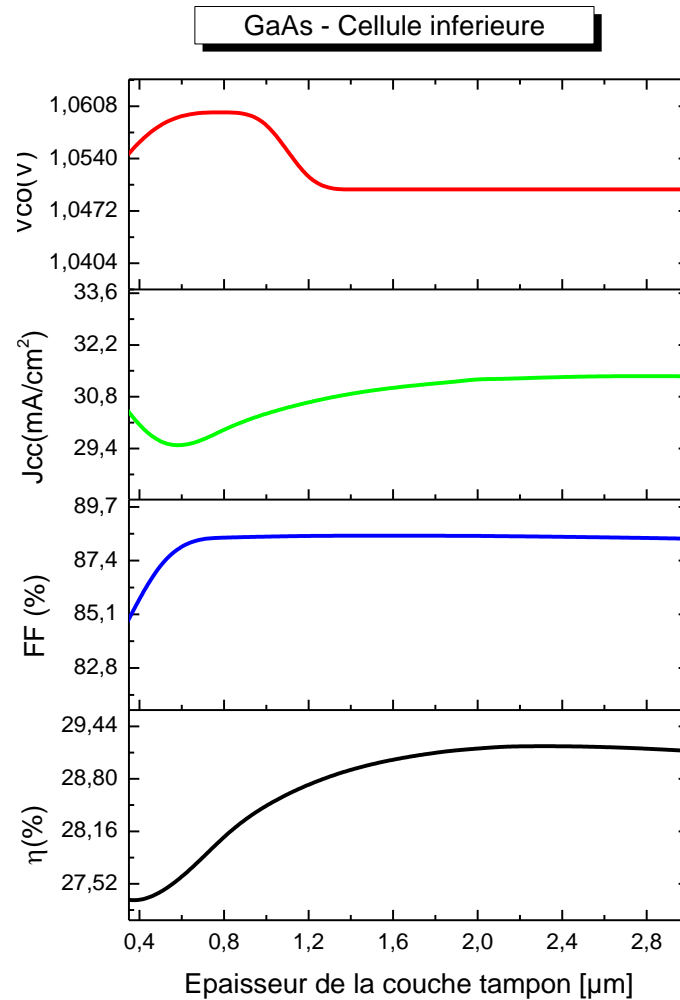


Figure II.9 Épaisseur de la couche tampon de la cellule inférieure GaAs.

À travers les courbes obtenues, il apparaît clairement qu'une épaisseur de la couche tampon est égale à 1.9 μm permet d'obtenir de bons résultats en termes de performance photovoltaïque, avec un rendement atteignant près de 29.16 %. Cette plage d'épaisseur assure une tension de circuit ouvert (V_{co}) stable, un courant de court-circuit (J_{cc}) élevé, ainsi qu'un facteur de forme (FF) optimisé (88%). Elle constitue un bon compromis entre la transmission efficace de la lumière incidente et la limitation des pertes par recombinaison à l'interface, ce qui améliore significativement l'efficacité globale de la cellule.

II.8.1.4 Etude de l'effet de dopage de la couche tampon (GaAs)

Dans la continuité de notre analyse, nous allons étudier l'effet du dopage de la couche tampon dans la cellule inférieure à base de GaAs sur les performances photovoltaïques du dispositif. Le niveau de dopage de cette couche influence fortement la formation de la jonction, la réduction des défauts interfaciaux, ainsi que le transport des porteurs entre les différentes couches. À travers des simulations numériques menées, nous analyserons l'impact de différentes concentrations dopantes sur les principaux paramètres de performance : le courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion. Cette étude vise à déterminer une concentration optimale permettant de minimiser les pertes de recombinaison et d'améliorer l'efficacité globale de la cellule.

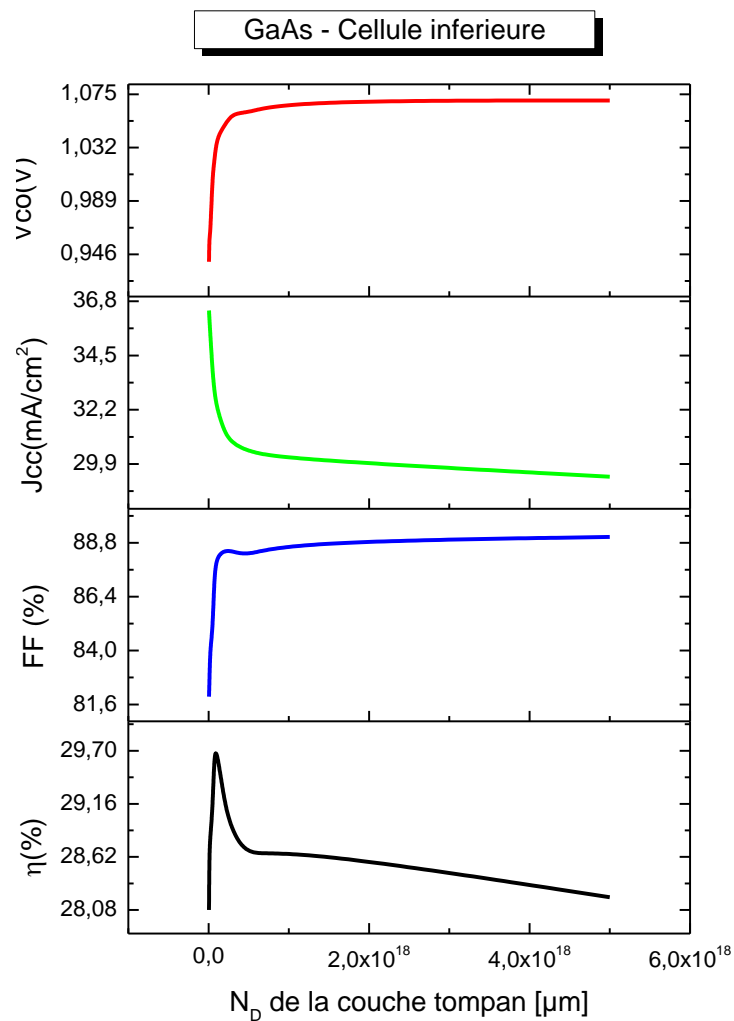


Figure II.10 N_A de la couche tampon de la cellule inférieure GaAs.

À travers les courbes illustrées, il est évident qu'un dopage de $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ dans la couche tampon permet d'obtenir de très bonnes performances, avec un rendement atteignant 29.73 %. Ce niveau de dopage optimise le transfert des porteurs de charge tout en limitant les recombinaisons, ce qui se traduit par une amélioration significative du rendement global de la cellule.

II.8.1.5 L'effet de la couche fenêtre sur les caractéristiques de la cellule inférieure (GaAs)

Dans ce qui suit, nous allons étudier l'effet de la couche fenêtre sur les caractéristiques de la cellule inférieure à base de GaAs, en particulier son influence sur les paramètres de performance photovoltaïque tels que le rendement (η), le courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF).

Tableau II.2 présente l'effet de l'introduction d'une couche fenêtre dans la structure de la cellule inférieure à base de GaAs a montré un impact significatif sur les performances photovoltaïques. En effet, la comparaison entre deux configurations – avec et sans couche fenêtre – révèle une augmentation remarquable du rendement, passant de 12.88 % sans couche fenêtre à 29.11 % avec. Cette amélioration s'explique par le rôle crucial de la couche fenêtre, qui permet une meilleure transmission de la lumière, une réduction des pertes par recombinaison de surface, ainsi qu'un alignement plus favorable des bandes d'énergie, ce qui favorise la collecte efficace des porteurs. Ainsi, l'ajout de cette couche constitue une étape essentielle dans l'optimisation de la cellule solaire GaAs.

Tableau II.2 : l'effet de l'introduction de la couche fenêtre dans la structure de la cellule inférieure à base de GaAs

Résultats	η (%)	FF (%)	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (v)
Avec couche fenêtre	29.11	88.34	31.93	1.03
Sans couche fenêtre	12.88	87.93	15.16	0.93

II.8.1.6 L'effet de la couche BSF sur les caractéristiques de la cellule inférieure (GaAs)

Nous allons à présent examiner l'effet de la couche BSF (Back Surface Field) sur les caractéristiques de la cellule inférieure à base de GaAs. Cette couche, placée à l'arrière de l'absorbeur, joue un rôle essentiel dans la réduction des recombinaisons des porteurs minoritaires au niveau du contact arrière, ce qui peut améliorer de manière

significative des paramètres tels que le courant de court-circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement global (η) de la cellule.

Tableau II.3 l'effet de l'introduction de la couche BSF dans la structure de la cellule inférieure à base de GaAs

Résultats	η (%)	FF (%)	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (v)
Avec couche BSF	29.11	88.34	31.93	1.03
Sans couche BSF	25.48	87.70	28.72	1.01

Les résultats obtenus montrent que l'ajout d'une couche BSF dans la cellule inférieure à base de GaAs entraîne une amélioration notable des performances photovoltaïques. En effet, le rendement passe de 25.48 % sans BSF à 29.11 % avec BSF, ce qui traduit une réduction significative des pertes par recombinaison au niveau de la face arrière. La couche BSF agit comme une barrière de potentiel, renvoyant les porteurs minoritaires vers la jonction active, ce qui améliore leur collecte et augmente ainsi l'efficacité globale de la cellule.

II.8.1.7 Les caractéristiques J-V de la cellule inférieure (GaAs)

La Figure II.11 illustre la caractéristique courant-densité de tension (J-V) de la cellule GaAs simulée sous l'éclairement standard AM1.5G.

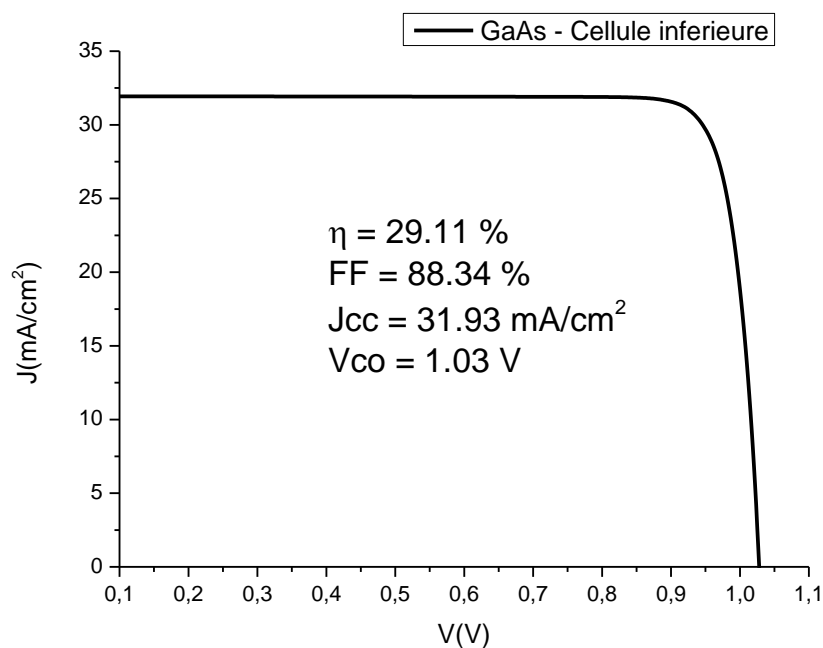
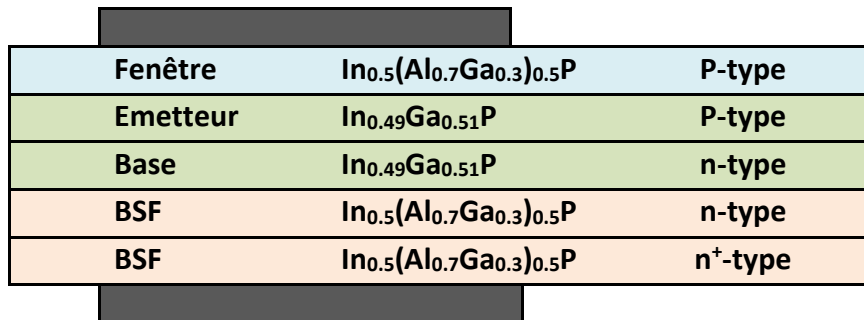


Figure II.11 Caractéristique J-V de la cellule inférieure à base de GaAs

Cette courbe révèle une tension de circuit ouvert (V_{co}) relativement faible, de l'ordre de 1.03 V, ainsi qu'un courant de court-circuit (J_{cc}) de 31.93 mA/cm², conduisant à un rendement maximal de 29.11 %.

II.8.2 Simulation de la cellule supérieure à base de InGaP

La Figure II.12 présente la structure de la cellule étudiée à base d'InGaP. La couche d'InAlGaP, agissant comme fenêtre optique, est placée au sommet de la cellule. Elle est suivie de deux couches d'InGaP assurant respectivement les fonctions d'émetteur (type p) et de base (type n). À l'arrière, une double couche de BSF en InAlGaP, de type n^-n^+ , est intégrée afin de réduire significativement la diffusion des porteurs minoritaires. Les paramètres physiques et géométriques utilisés pour la simulation sont répertoriés dans le Tableau II.1.



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

Figure II.12. Couches de cellules supérieures à base de InGaP détaillées.

Figure II.13 présente la structure simulée de la cellule solaire supérieure à base de InGaP, conçue dans le cadre d'une architecture en tandem avec le simulateur SILVACO-ATLAS. La structure comporte, du haut vers le bas :

- Une couche fenêtre en InAlGaP (type n), mince et hautement dopée, permettant une bonne transmission du spectre lumineux incident tout en minimisant les pertes par réflexion et absorption superficielle.
- Une couche émettrice en InGaP (type p), assurant la séparation initiale des paires électron-trou générées.
- Une couche base en InGaP (type n), de plus faible dopage, dans laquelle se produit l'essentiel de la génération photocaractéristique.
- Une double couche BSF (Back Surface Field) en InAlGaP (type n^-n^+), utilisée pour créer un champ de répulsion des porteurs minoritaires, réduisant ainsi les

recombinaisons à l'interface arrière et améliorant l'efficacité de collecte des charges.

L'ensemble de ces couches est optimisé pour maximiser le rendement de conversion dans la plage spectrale haute, notamment dans le cadre d'une configuration tandem où la cellule InGaP est située au-dessus de la cellule inférieure (type GaAs).

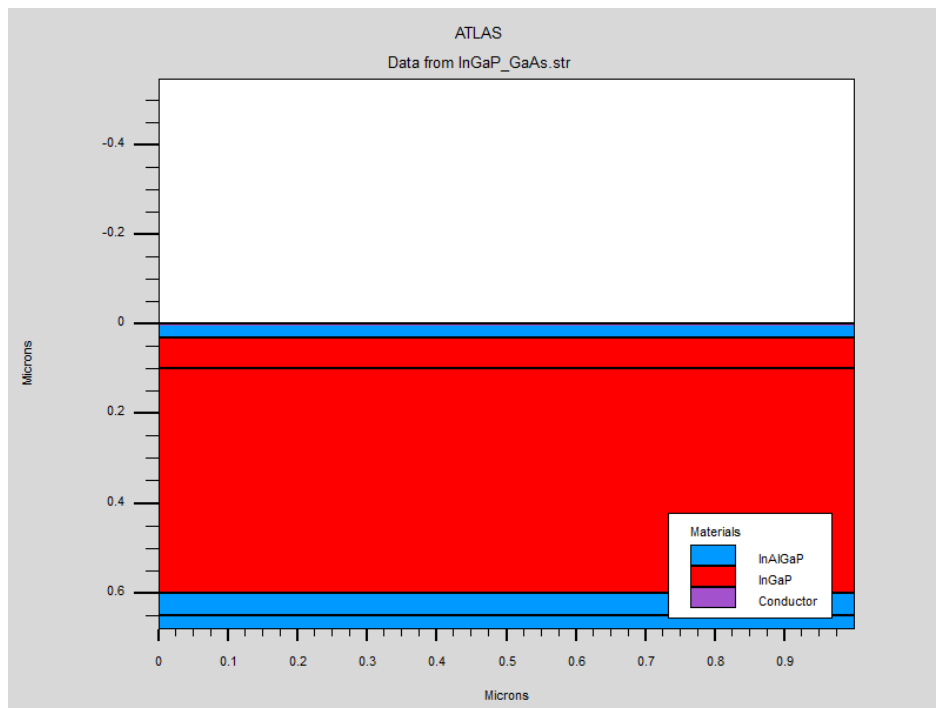


Figure II.13 Structure de la cellule solaire supérieure à base de InGaP.

Figure II.14 présente le maillage numérique de la cellule solaire supérieure à base de InGaP, généré à l'aide du simulateur TCAD-SILVACO. Ce maillage bidimensionnel (2D) est soigneusement adapté à la géométrie des différentes couches de la structure (fenêtre InAlGaP, émetteur et base InGaP, BSF InAlGaP). Une densité de points de maillage plus élevée est utilisée aux interfaces critiques (jonction p-n, frontières des couches BSF), afin de garantir une résolution précise des équations physiques (Poisson, continuité des porteurs) et une convergence numérique stable. Ce maillage joue un rôle essentiel dans la précision des résultats de simulation, notamment pour l'évaluation des distributions de potentiel, de champ électrique et de densité de courant au sein de la cellule.

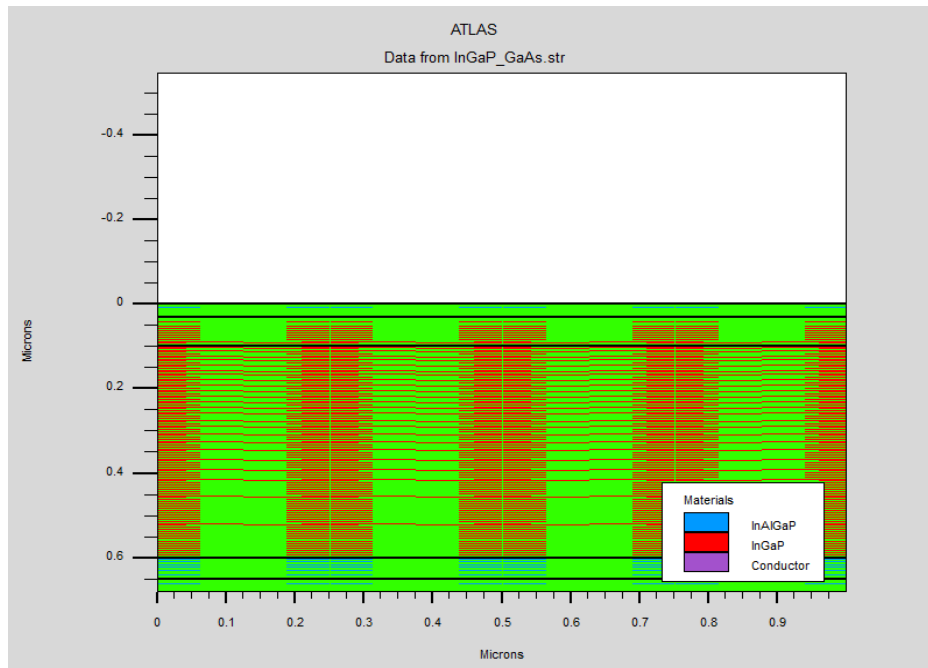


Figure II.14, Maillage de la cellule supérieure InGaP.

II.8.2.1 Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante (InGaP)

Dans ce qui suit, nous allons étudier l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante de la cellule solaire supérieure à base d'InGaP sur ses performances photovoltaïques, en utilisant le simulateur SILVACO-ATLAS. Cette étude permet d'analyser comment la variation de l'épaisseur de cette couche active influence des paramètres essentiels tels que la tension de circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (J_{cc}), le facteur de forme (FF) et le rendement global (η).

Les résultats de simulation dans la figure II.15 montrent qu'à une épaisseur optimale de $0.07 \mu\text{m}$ pour la couche absorbante de la cellule supérieure à base d'InGaP, on obtient des performances photovoltaïques satisfaisantes avec un rendement de 17.38 %, un facteur de forme (FF) de 82.73 %, une tension de circuit ouvert (V_{oc}) de 1.24 V, et un courant de court-circuit (J_{cc}) de 16.89 mA/cm^2 . Ces résultats confirment l'importance du dimensionnement précis de la couche absorbante pour optimiser l'efficacité de la cellule.

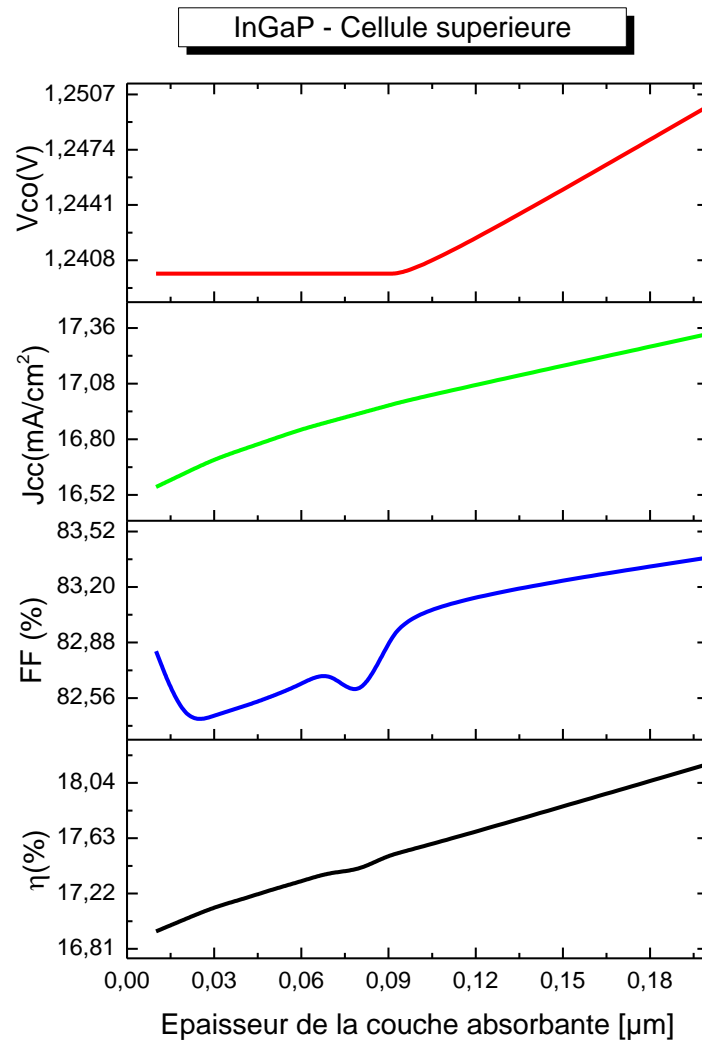


Figure II.15 Epaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieure InGaP.

II.8.2.2 Etude de l'effet de dopage de la couche absorbante (InGaP)

Dans la suite de cette étude, nous allons examiner l'effet du dopage de la couche absorbante de la cellule solaire supérieure à base d'InGaP sur ses performances photovoltaïques, en utilisant le simulateur SILVACO-ATLAS. L'objectif est d'analyser l'impact de la concentration dopante sur des paramètres clés tels que la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (J_{cc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η), afin de déterminer la valeur de dopage optimale pour une performance maximale.

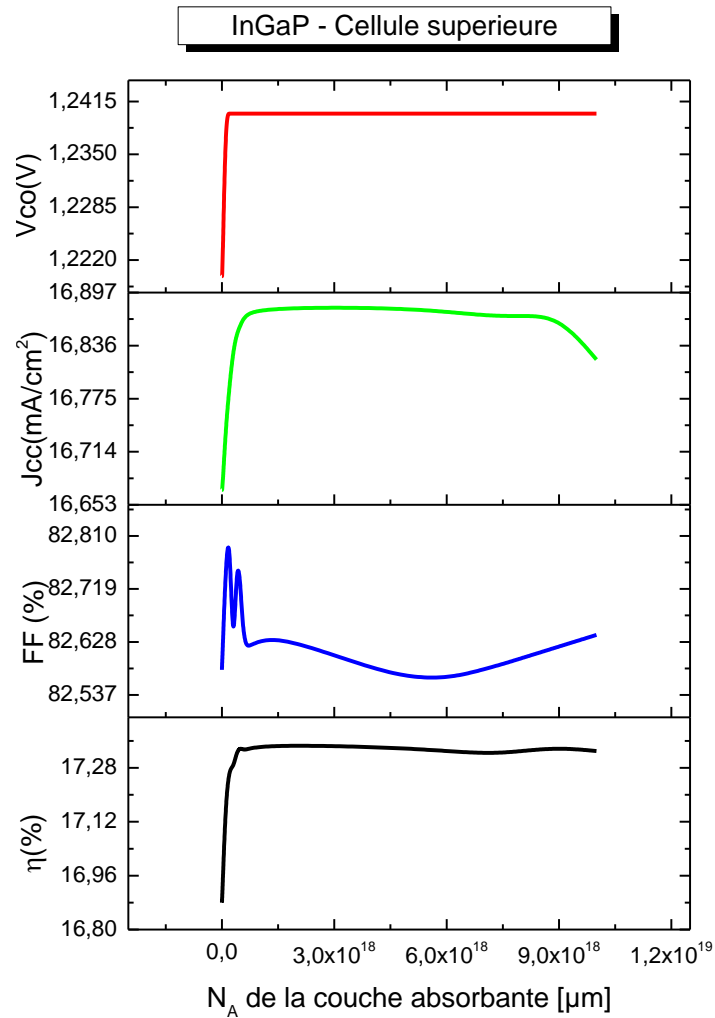


Figure II.16. N_A de la couche absorbante de la cellule supérieure InGaP

D'après les résultats présentés dans la Figure II.16, une valeur optimale de dopage de la couche absorbante fixée à $N_A = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ permet d'obtenir de bonnes performances photovoltaïques pour la cellule supérieure à base d'InGaP. En effet, les paramètres obtenus sont les suivants : rendement = 17.35 %, facteur de forme (FF) = 82.66 %, tension de circuit ouvert (V_{oc}) = 1.24 V, et courant de court-circuit (J_{cc}) = 16.88 mA/cm^2 . Ces résultats indiquent que ce niveau de dopage assure un équilibre optimal entre la collecte efficace des porteurs et la réduction des pertes par recombinaison, contribuant ainsi à une efficacité de conversion maximale.

II.8.2.3 Etude de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon (InGaP)

Dans la suite de cette étude, nous allons analyser l'effet de l'épaisseur de la couche tampon de la cellule solaire supérieure à base de InGaP sur ses performances photovoltaïques, en utilisant le simulateur SILVACO-ATLAS. L'objectif est d'évaluer comment la variation de cette épaisseur influence des paramètres clés tels que la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (J_{cc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η).

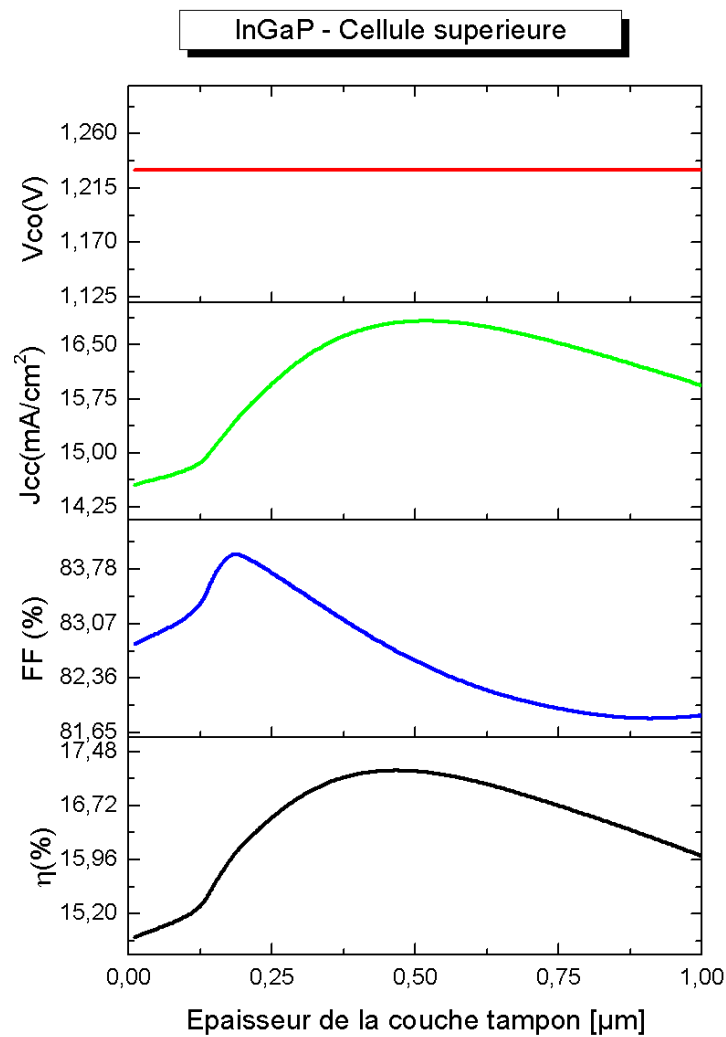


Figure II.17 Epaisseur de la couche tampon de la cellule supérieure InGaP

D'après les résultats présentés dans la Figure II.17, l'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon de la cellule solaire supérieure à base d'InGaP, simulée avec Silvaco Atlas, montre qu'une valeur optimale de 0,5 μm permet d'obtenir les meilleures performances photovoltaïques. À cette épaisseur, on enregistre un rendement de

17.23 %, un facteur de forme (FF) de 82.57 %, une tension de circuit ouvert (V_{oc}) de 1.23 V, et un courant de court-circuit (J_{cc}) de 16.86 mA/cm². Ces résultats confirment que l'ajustement de l'épaisseur de la couche tampon contribue significativement à l'optimisation des performances en réduisant les recombinaisons indésirables et en améliorant la collecte des charges.

II.8.2.4 Etude de l'effet de dopage de la couche tampon (InGaP)

Dans la suite de cette étude, nous allons examiner l'effet du dopage donneur (ND) de la couche tampon de la cellule solaire supérieure à base d'InGaP sur ses performances photovoltaïques, en utilisant le simulateur SILVACO-ATLAS. L'objectif est d'analyser comment la variation de la concentration dopante influe sur des paramètres clés tels que la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (J_{cc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η).

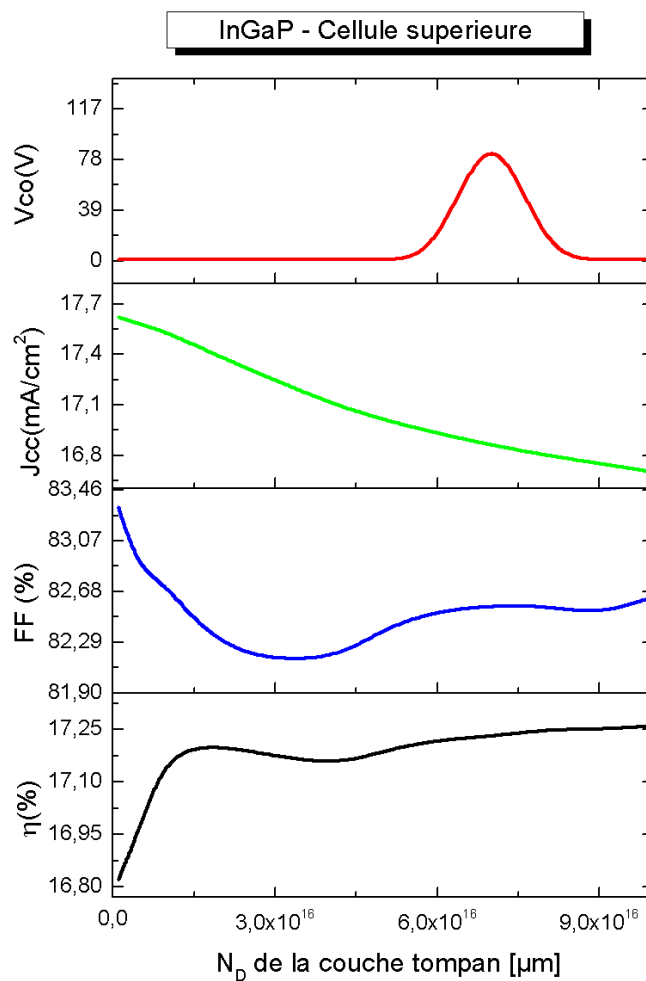


Figure II.18 N_D de la couche tampon de la cellule supérieure InGaP.

D'après la Figure II.18, l'étude de l'effet du dopage ND de la couche tampon de la cellule solaire supérieure à base d'InGaP, réalisée avec SILVACO ATLAS, montre qu'une valeur optimale de dopage de $N_D = 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ permet d'obtenir les meilleures performances photovoltaïques. À ce niveau de dopage, les résultats de simulation indiquent un rendement de 17.25 %, un facteur de forme (FF) de 82.57 %, une tension de circuit ouvert (V_{oc}) de 1.24 V, et un courant de court-circuit (J_{cc}) de 16.80 mA/cm². Ces performances soulignent l'importance du contrôle précis de la concentration dopante dans la couche tampon pour minimiser les recombinaisons et améliorer la collecte des porteurs, contribuant ainsi à une meilleure efficacité globale de la cellule.

II.8.2.5 L'effet de la couche fenêtre sur les caractéristiques de la cellule supérieure (InGaP)

Nous allons étudier l'effet de la couche fenêtre sur les caractéristiques de la cellule solaire supérieure à base d'InGaP, en nous intéressant particulièrement à son influence sur les principaux paramètres de performance photovoltaïque, tels que la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (J_{cc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η).

Tableau II.4 l'effet de l'introduction de la couche fenêtre dans la structure de la cellule supérieure à base de InGaP

Résultats	V_{co} (v)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Avec couche fenêtre	17.35	82.66	16.88	1.24
Sans couche fenêtre	13.74	81.85	13.94	1.20

Les résultats de simulation mettent en évidence l'importance de la couche fenêtre dans la cellule solaire supérieure à base d'InGaP. En effet, l'ajout de cette couche permet une amélioration significative des performances. Avec la présence de la couche fenêtre, le rendement de conversion atteint 17.35 %, contre seulement 13.74 % en son absence. Cette différence s'explique par le rôle essentiel de la couche fenêtre dans la réduction des pertes optiques, la minimisation des recombinaisons de surface et l'amélioration de la collecte des porteurs photogénérés, ce qui contribue globalement à optimiser le comportement photoélectrique de la cellule.

II.8.2.6 L'effet des doubles couches BSF sur les caractéristiques de la cellule supérieure (InGaP)

Nous allons étudier l'effet des doubles couches BSF (Back Surface Field) sur les caractéristiques de la cellule solaire supérieure à base d'InGaP, en analysant leur influence sur les performances photovoltaïques, notamment en termes de réduction des recombinaisons en surface arrière, d'amélioration de la collecte des porteurs et d'optimisation du rendement global de la cellule.

Tableau II.5 l'effet de l'introduction des doubles couches BSF dans la structure de la cellule supérieure à base de InGaP

Résultats	Vco (v)	Jcc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Avec couche BSF	17.35	82.66	16.88	1.24
Sans couche BSF	13.14	81.62	13.15	1.22

Les simulations montrent que l'intégration de doubles couches BSF (Back Surface Field) dans la cellule solaire supérieure à base d'InGaP permet d'améliorer notablement ses performances. En effet, avec les doubles couches BSF, le rendement de conversion (η) atteint 17.35 %, alors qu'il chute à 13.14 % en leur absence. Cette amélioration s'explique par la capacité des couches BSF à réduire efficacement les recombinaisons à l'arrière de la cellule, ce qui améliore la collecte des porteurs photogénérés et, par conséquent, la performance globale de la cellule.

II.8.2.7 Les caractéristiques J-V de la cellule supérieure (InGaP)

La Figure II.19 présente la caractéristique courant-densité de courant en fonction de la tension (J-V) simulée pour la cellule solaire supérieure à base d'InGaP, sous éclairage standard AM1.5G. Cette courbe met en évidence les bonnes performances électriques de la cellule. En effet, les principaux paramètres extraits de cette simulation sont : un rendement de conversion (η) de 17.35 %, un facteur de forme (FF) de 82.66 %, un courant de court-circuit (Jcc) de 16.88 mA/cm², et une tension de circuit ouvert (Vco) de 1.25 V. Ces résultats confirment l'efficacité de la structure optimisée et sa capacité à fonctionner efficacement dans la plage des cellules solaires à haut rendement.

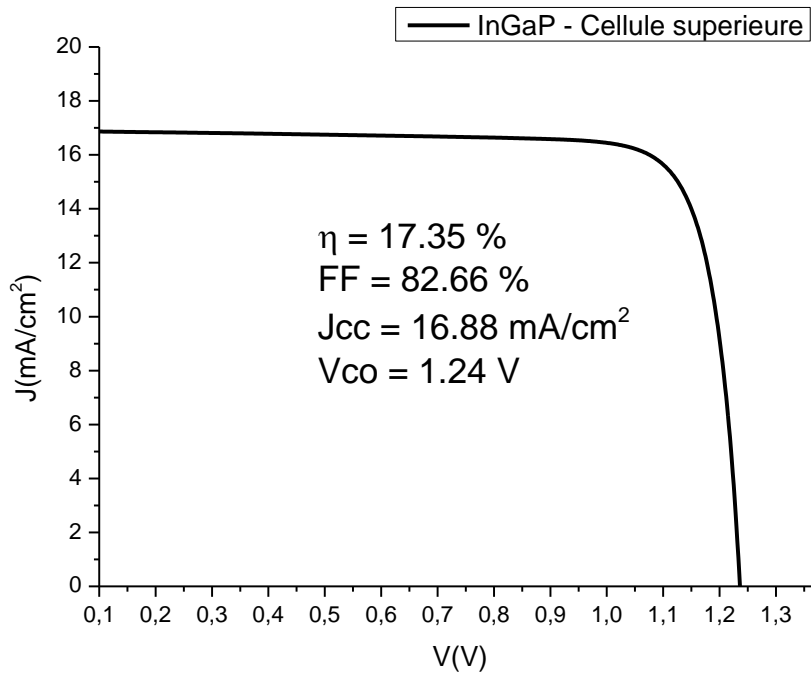


Figure II.19 Caractéristique J-V de la cellule InGaP.

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

II.8.3.1 Présentation de la structure

La cellule solaire tandem à hétérojonction InGaP/GaAs est composée de deux sous-cellules monolithiquement empilées afin d'optimiser la capture du spectre solaire (Figure II.20). La cellule supérieure (top cell), réalisée en InGaP (Indium Gallium Phosphide), est conçue pour absorber le rayonnement dans la gamme du visible et de l'ultraviolet proche, grâce à son large gap énergétique ($\sim 1.9 \text{ eV}$). Elle est constituée d'une couche fenêtre en InAlGaP, d'une couche émettrice p-type, d'une couche absorbante n-type, et de couches BSF (Back Surface Field) qui réduisent la recombinaison des porteurs.

La cellule inférieure (bottom cell) est basée sur GaAs (Gallium Arsenide), un matériau à gap plus étroit ($\sim 1.42 \text{ eV}$), adapté à l'absorption du rayonnement infrarouge proche. Elle comprend également une couche fenêtre, une couche émettrice, une couche absorbante, ainsi qu'une couche BSF optimisée pour améliorer la collecte des charges.

Les deux cellules sont reliées électriquement par une jonction tunnel InGaP/InGaP, dopée très fortement n^{++}/p^{++} , permettant un transfert efficace des porteurs entre les deux étages sans perte de tension significative.

Les paramètres géométriques et électriques optimisés de l'ensemble des couches (épaisseurs, types et niveaux de dopage) sont illustrés dans la figure suivante, qui détaille la structure complète de la cellule tandem, simulée à l'aide du logiciel Silvaco Atlas (Figure II.21)

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

La cellule InGaP (top) avec double couche BSF

Diode Tunnel

La cellule GaAs (Bottom)

Figure II.20 Schéma de la cellule monolithique Tandem GaInP/GaAs avec ses paramètres technologiques.

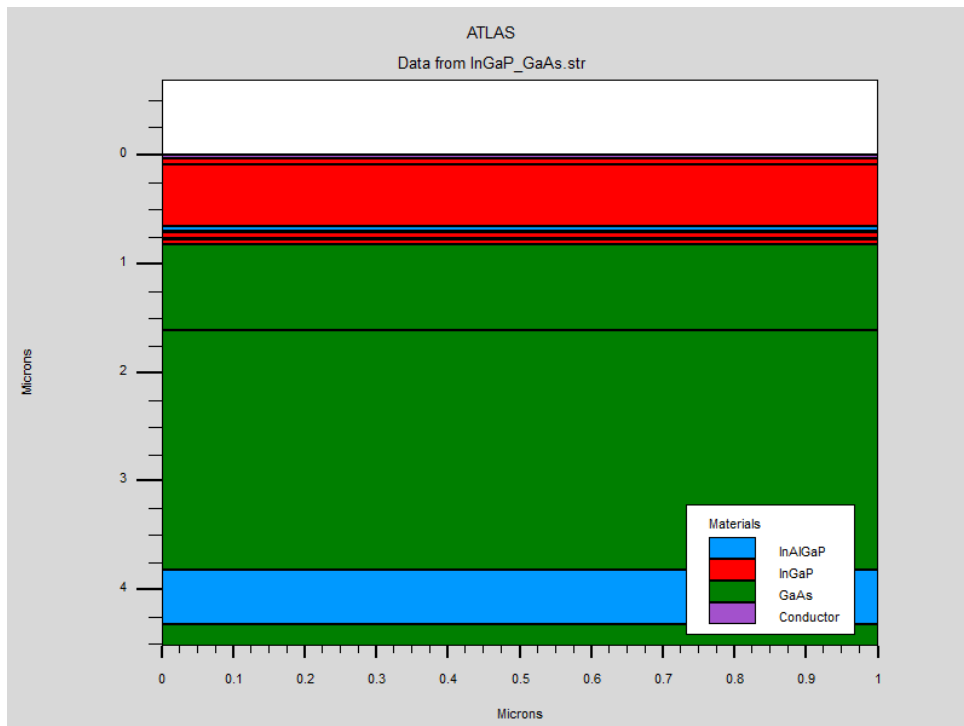


Figure II.21 Structure de la cellule solaire à double jonctions InGaP/GaAs.

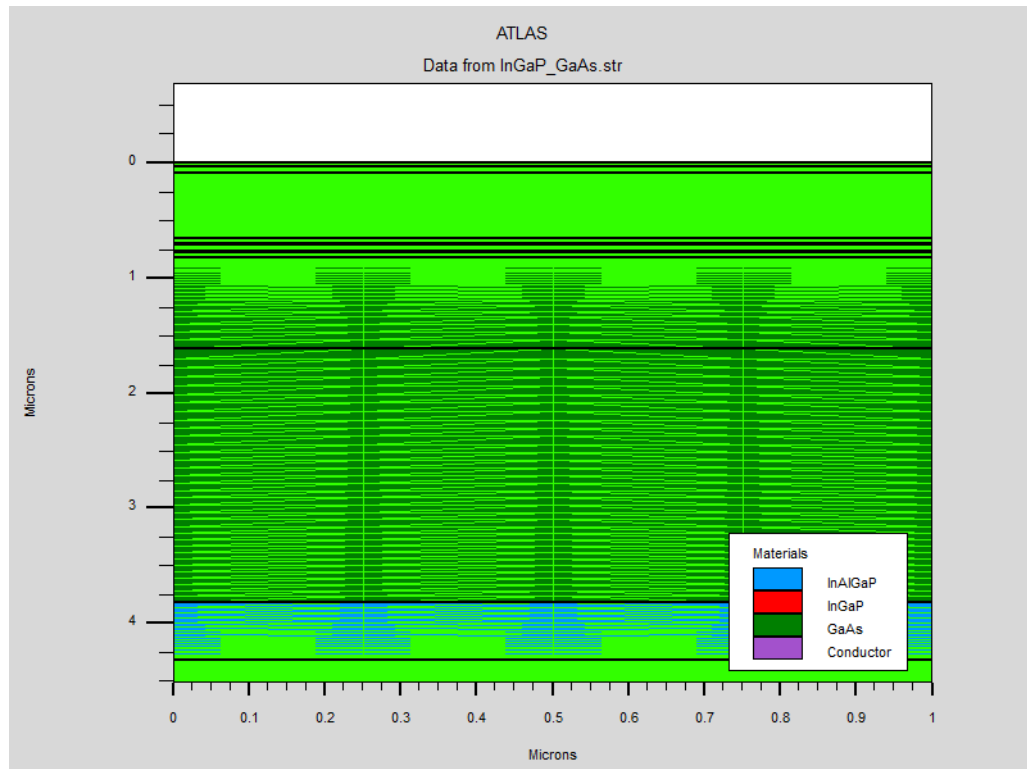


Figure II.22 Maillage de la cellule InGaP/GaAs.

Cette structure (de la figure II.22) est modélisée numériquement à l'aide du maillage, qui divise la cellule en un réseau fin permettant une simulation précise des phénomènes électriques et optiques, contribuant ainsi à l'optimisation des performances de la cellule

Dans cette étude, nous avons analysé l'effet de l'introduction d'une jonction tunnel InGaP/InGaP entre les deux sous-cellules de la structure tandem InGaP/GaAs. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative des performances photovoltaïques grâce à cette jonction. En effet, avec la jonction tunnel, le rendement global de la cellule atteint 30,21 %, contre seulement 21,00 % en son absence. Cette amélioration s'explique par le rôle crucial de la jonction tunnel dans la connexion électrique efficace des deux sous-cellules, permettant un transfert optimal des porteurs de charge tout en minimisant les pertes ohmiques et les recombinaisons à l'interface. Ainsi, l'intégration de la jonction tunnel constitue une étape essentielle pour le bon fonctionnement et l'optimisation des cellules solaires tandem.

Tableau II.5 l'effet de l'introduction de la jonction tunnel dans la structure de la cellule solaire tandem (InGaP/GaAs) simulés sous éclairage AM1.5G

Résultats	η (%)	FF (%)	Jcc (mA/cm ²)	Vco (v)
Avec jonction tunnel	30.21	88.86	14.85	2.29
Sans jonction tunnel	21.00	91.11	10.44	2.20

II.8.3.2 Interprétation

1. Cellule supérieure InGaP (courbe bleue) :

- Tension de circuit ouvert (Voc) \approx 1,25 V
- Courant de court-circuit (Jco) \approx 17 mA/cm²
- Le courant est limité car InGaP a un **large gap** (\sim 1.9 eV) et absorbe principalement les photons à haute énergie (UV-visible), ce qui génère moins de porteurs.

2. Cellule inférieure GaAs (courbe rouge) :

- Voc \approx 1,05 V
- Jsc \approx 31 mA/cm²
- GaAs a un **gap plus faible** (\sim 1.42 eV), ce qui permet de capter plus de photons dans l'infrarouge proche, générant un **courant plus élevé**, mais une tension plus faible que l'InGaP.

3. Cellule tandem InGaP/GaAs (courbe noire) :

- Voc \approx somme des Voc individuels \rightarrow ici \approx 1,25 V + 1,0 V = 2,25 V (confirmé par la courbe)
- Jsc \approx limité par la sous-cellule qui génère le moins de courant \rightarrow ici \approx 17 mA/cm² (comme la cellule InGaP)
- Cela reflète bien le **principe de fonctionnement d'une cellule tandem en série**, où le **courant est limité par la sous-cellule la moins génératrice**, tandis que la **tension s'additionne**.

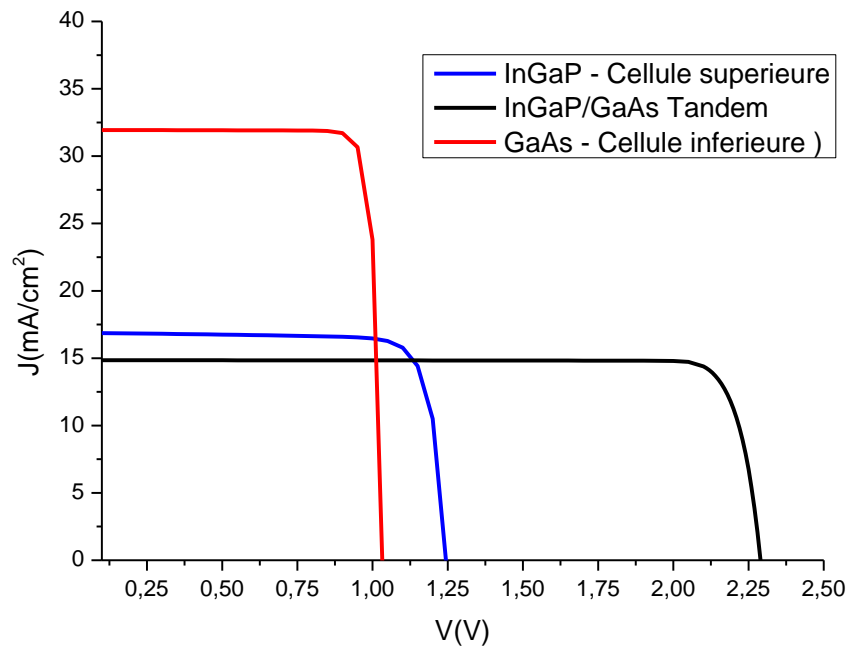


Figure II.23 Caractéristique J-V de la cellule Tandem InGaP/GaAs.

II.8.3.3 Résultats finale

- La courbe noire (tandem) montre une **meilleure efficacité globale** grâce à la **combinaison des deux sous-cellules**, permettant une meilleure utilisation du spectre solaire.
- Le **rendement** du tandem est supérieur à celui des cellules individuelles, car il bénéficie à la fois :
 - d'une **tension élevée** (somme des Voc),
 - d'une **bonne couverture spectrale** (visible et IR),
 - et d'une **limitation du courant bien maîtrisée** par l'équilibrage des sous-cellules.

II.8.3.4 L'objectif principal de cette analyse

La cellule solaire tandem InGaP/GaAs représente une solution innovante pour améliorer le rendement de conversion de l'énergie solaire, en optimisant l'utilisation du spectre du rayonnement solaire. Cette amélioration est rendue possible grâce à l'association de deux matériaux semi-conducteurs à bandes interdites différentes : la couche supérieure en InGaP capte les photons à haute énergie (lumière bleue), tandis que la couche inférieure en GaAs absorbe les photons à plus faible énergie (lumière

rouge et infrarouge). Cette répartition spectrale permet de minimiser les pertes thermiques dues aux photons non adaptés à la bande interdite et d'augmenter la tension de sortie grâce à la connexion en série des deux sous-cellules. L'analyse menée a pour objectif principal d'optimiser l'efficacité énergétique globale de cette structure tandem tout en réduisant les coûts de fabrication, en s'appuyant sur un choix judicieux des matériaux utilisés dans les différentes couches fonctionnelles. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence cruciale des propriétés optiques et électroniques des matériaux sur les performances de la cellule, notamment en termes d'absorption lumineuse, de transport des charges et de réduction des pertes résistives.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude approfondie de la cellule solaire tandem InGaP/GaAs à double jonction, en analysant séparément les performances des sous-cellules supérieure (InGaP) et inférieure (GaAs), ainsi que leur intégration via une jonction tunnel. Les simulations réalisées à l'aide du logiciel SILVACO-ATLAS ont permis d'optimiser divers paramètres technologiques, notamment l'épaisseur et le dopage des couches absorbantes, tampons, BSF et fenêtres, afin d'obtenir des performances photovoltaïques maximales.

Les résultats ont montré que :

- La cellule GaAs présente un courant élevé mais une tension modérée.
- La cellule InGaP offre une tension élevée mais un courant plus faible, dû à son large gap.
- L'association des deux en structure tandem, avec introduction d'une jonction tunnel InGaP/InGaP, permet d'atteindre un rendement élevé de 30.21 %, contre 21.00 % sans la jonction.

La jonction tunnel joue un rôle déterminant dans le transfert efficace des porteurs et la connexion série des deux sous-cellules, assurant un fonctionnement optimal du tandem. L'analyse des courbes J-V confirme que la tension s'additionne entre les deux étages, tandis que le courant est limité par la sous-cellule la moins génératrice, en accord avec les principes physiques des cellules tandem. Ainsi, cette étude met en évidence le potentiel remarquable de l'architecture InGaP/GaAs pour les cellules

solaires à haut rendement, tout en soulignant l'importance de l'optimisation structurelle et électrique de chaque sous-couche pour atteindre des performances supérieures.

Conclusion générale

Ce travail a permis de développer une approche complète, alliant théorie, modélisation numérique et analyse des performances, autour des cellules solaires photovoltaïques à haute efficacité, notamment les structures tandem à base de matériaux III-V.

Dans le premier chapitre, nous avons posé les fondements théoriques indispensables à la compréhension des cellules solaires. Nous avons commencé par définir le fonctionnement des cellules photovoltaïques, depuis l'absorption du rayonnement solaire jusqu'à la génération du courant électrique par effet photovoltaïque. Les notions essentielles telles que le spectre solaire, le type de gap (direct ou indirect), et la caractéristique courant-tension (I-V) ont été présentées afin d'analyser finement les performances d'un dispositif photovoltaïque.

Par la suite, nous avons exploré la famille des semi-conducteurs III-V, largement utilisés dans les applications solaires à haut rendement, en raison de leur structure cristalline bien ordonnée, de leur grande mobilité des porteurs, et de leur capacité à former des alliages adaptés à différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Des matériaux comme le GaAs ou l'InGaP se sont révélés particulièrement intéressants pour concevoir des cellules tandem. Enfin, nous avons présenté le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, et plus particulièrement l'environnement ATLAS, en expliquant les différentes étapes nécessaires à la modélisation d'un dispositif : définition géométrique, choix des modèles physiques, paramètres de maillage, méthodes numériques et exploitation des résultats via TonyPlot.

Dans le deuxième chapitre, ces acquis ont été appliqués à une étude numérique détaillée de la cellule solaire tandem InGaP/GaAs, une architecture bicouche prometteuse pour maximiser la conversion de l'énergie solaire. Nous avons d'abord étudié séparément les deux sous-cellules :

- La cellule supérieure InGaP, adaptée à l'absorption du spectre solaire de courte longueur d'onde, affiche une tension élevée ($V_{oc} \approx 1.24$ V), mais un courant limité.
- La cellule inférieure GaAs, plus sensible aux longueurs d'onde plus longues, offre un courant élevé ($J_{sc} \approx 31.93$ mA/cm²) avec une tension modérée ($V_{oc} \approx 1.03$ V).

Une attention particulière a été portée sur l'optimisation des couches constitutives (épaisseur, dopage, fenêtres, BSF), montrant qu'un ajustement précis permet d'atteindre un rendement maximal de 17.35 % pour la cellule InGaP et 29.11 % pour la cellule GaAs.

L'introduction d'une jonction tunnel InGaP/InGaP entre les deux sous-cellules a été un facteur clé, permettant une connexion série efficace des cellules et une augmentation significative du rendement global, atteignant 30.21 %, contre 21.00 % sans jonction tunnel. L'analyse des courbes J-V a mis en évidence l'addition des tensions des deux cellules et la limitation du courant par la cellule générant le moins, ce qui est conforme aux principes des dispositifs tandem.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives :

- L'étude de nouveaux matériaux III-V ou leurs alliages (ex : InGaAsP, GaInNAs) pour mieux couvrir le spectre solaire.
- L'amélioration des jonctions tunnel en réduisant leur résistance série.
- L'optimisation thermique, la gestion des pertes optiques, et la simulation sous conditions réelles (température, dégradation).
- La validation expérimentale des structures simulées pour confirmer leur faisabilité industrielle.

En définitive, ce mémoire a permis de démontrer, à travers une approche rigoureuse, l'importance d'un couplage entre maîtrise théorique, modélisation précise et analyse numérique pour concevoir des cellules solaires à haut rendement. L'architecture tandem InGaP/GaAs, optimisée par simulation avec TCAD-SILVACO, s'avère être une solution prometteuse pour les nouvelles générations de dispositifs photovoltaïques performants, capables de répondre aux exigences croissantes en matière de transition énergétique.

Résumé

Dans ce travail, des simulations numériques ont été menées à l'aide du logiciel TCAD-SILVACO Atlas afin d'optimiser la structure tandem InGaP/GaAs pour les applications photovoltaïques à haut rendement. Les performances des deux sous-cellules (InGaP et GaAs) ont été étudiées séparément en analysant l'effet de l'épaisseur et du dopage des couches absorbantes, tampons, fenêtres et BSF. Pour la cellule GaAs, un rendement optimal de 29.11 % a été atteint. La cellule InGaP, bien qu'ayant un courant plus faible, a montré une tension élevée et un rendement maximal de 17.35 %. L'introduction d'une jonction tunnel InGaP/InGaP entre les deux sous-cellules a permis une connexion série efficace, portant le rendement global à 30.21 %. Les courbes J-V ont confirmé l'amélioration des performances avec la jonction tunnel. Les simulations ont démontré l'importance de l'optimisation fine des paramètres technologiques pour obtenir une structure tandem efficace. Ce travail met en évidence le potentiel du simulateur SILVACO pour concevoir des cellules solaires performantes.

Abstract

In this work, numerical simulations were carried out using the TCAD-SILVACO Atlas software to optimize the InGaP/GaAs tandem structure for high-efficiency photovoltaic applications. The performance of both sub-cells (InGaP and GaAs) was studied separately by analyzing the effect of the thickness and doping of the absorber, buffer, window, and BSF layers. For the GaAs sub-cell, an optimal efficiency of 29.11% was achieved. The InGaP sub-cell, although generating a lower current, exhibited a higher voltage and a maximum efficiency of 17.35%. The introduction of an InGaP/InGaP tunnel junction between the two sub-cells enabled an effective series connection, increasing the overall efficiency to 30.21%. The J-V curves confirmed the performance enhancement due to the tunnel junction. The simulations demonstrated the importance of fine optimization of technological parameters to achieve an efficient tandem structure. This study highlights the potential of the SILVACO simulator in designing high-performance solar cells.

ملخص

في هذا العمل، تم إجراء محاكاة رقمية باستخدام برنامج TCAD-SILVACO Atlas من أجل تحسين بنية الخلية الشمسية التانديم InGaP/GaAs للتطبيقات الكهروضوئية عالية الكفاءة. تمت دراسة أداء الخليتين الفرعيتين (InGaP و GaAs) بشكل منفصل من خلال تحليل تأثير سماكة وتطعيم الطبقات الممتصة، والطبقات العازلة (التمهيدية)، والنوافذ، وطبقات BSF بالنسبة للخلية GaAs، تم تحقيق كفاءة مثالية بلغت 29.11%، في حين أظهرت خلية InGaP، رغم أنها تولد تياراً أقل، جهداً عالياً وكفاءة قصوى بلغت 17.35%. أدى إدخال وصلة نفقية InGaP/InGaP بين الخليتين الفرعيتين إلى تحقيق اتصال تسلسلي فعال، مما رفع الكفاءة الإجمالية إلى 30.21%. وأكدت منحنيات J-V تحسن الأداء نتيجة إدخال الوصلة النفقية. وقد أظهرت المحاكاة أهمية التحسين الدقيق للمعلمات التكنولوجية للحصول على بنية تانديم فعالة. يبرز هذا العمل الإمكانيات الكبيرة لمحاكي SILVACO في تصميم خلايا شمسية عالية الأداء.