

Université de Blida1

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'électronique



Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

Doctorat LMD en : électronique

Spécialité (Option) : électronique

**MODELISATION ET CARACTERISATION DES CELLULES
SOLAIRES A BASE DES NOUVEAUX MATERIAUX**

Présentée par :

Layachi DJEDOU

Devant le jury composé de :

M. Djebari	Professeur, U. de Blida	Président
A. Aissat	Professeur, U. de Blida	Rapporteur
K. Rahmoun	Professeur, U. de Tlemcen	Examinatrice
Z. Rouabah	Professeur, U. de BBA	Examineur
S. Nacer	Professeur, U. de Blida	Examineur
K. Ziouche	Professeur, U. de Lille1	Invité

Blida, 02 Mars 2024

Remerciements

Avant tout, nous remercions **Allah** le tout-puissant qui nous a donné la force pour réaliser cet ouvrage que nous souhaitons qu'il atteigne nos espérances.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers mon encadreur, le **Pr AISSAT Abdelkader**, pour son précieux soutien tout au long de cette thèse. Sa disponibilité, son expertise et ses conseils ont été d'une grande aide pour moi. Grâce à son encadrement attentif, j'ai pu mener à bien ce travail de recherche.

Je tiens à remercier également le **Pr GUESSOUM Abderrezak**, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire **LATSI** de l'université de **Blida**.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude au **Pr DJEBARI Mustapha** pour avoir accepté de présider du jury. Aussi mes vifs remerciements vont aux membres du jury : **Pr RAHMOUNE Khadidja**, **Pr ZIOUCHE Katir**, **Pr NACER Saïd** et **Pr ROUABAH Zahir**, pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Je tiens à remercier sincèrement l'équipe du projet Tempus Esience (Projet n° : 530341-TEMPUS-1-2012-1-FR-TEMPUS-JPCR de 2012 à 2015) pour avoir mis à notre disposition le laboratoire virtuel de l'université de **Bordj Bou Arreridj (UBBA vlab)** et nous avoir aussi permis d'utiliser le logiciel **TCAD-Silvaco** pour la modélisation et la caractérisation de nos cellules solaires.

Je tiens à adresser mes plus chaleureux remerciements au **Dr Djemouai Abdelouahab** de l'université de **BBA** pour sa lecture attentive du présent manuscrit, ainsi que pour son soutien continu et sa curiosité. Ses précieuses remarques ont grandement contribué au succès de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Blida, le /11/2023

Blida, 02 Mars 2024



DEDICACE

Je dédie ce travail

A mes chers parents Laïd et Hadda

A ma chère femme Sabah

A mes filles Lina, Kawther et Chaïd

A mes frères Toufik, Ridha et Alaeddine

Et mes Sœurs Zineb, Karima, Nawel, Laïla

A toute ma famille

A tous mes collègues et mes Amis

A tous ceux qui ont consacré leur temps à

La science pour La prospérité de l'humanité

Djedoui Layachi



ملخص : في هذه الدراسة ، قمنا بتحسين الخلايا الفرعية الشمسية أحادية الوصلة **GaInP** من خلال تحليل تأثير سماكة كل من الطبقات **p-GaInP** و **n-GaInP** ، مع إدخال طبقة عازلة **AlGaAs** ، وتأثير طبقة النافذة **AlGaInP** أظهرت المحاكاة باستخدام أداة **Atlas-SILVACO** تحسناً في كفاءة الخلية الفرعية **GaInP** ، بكثافة تيار (J_{cc}) تبلغ **18.35 مللي أمبير/سم²** ، وجهد (V_{co}) يساوي **1.41 فولت** ، وعامل تعبئة (FF) يقدر بـ **86.81%**. الخلية الفرعية بسماكة كلية تقدر بـ **0.650 ميكرومتر** وكفاءة **22.42%**. تضمنت المعلومات المثلى : سماكة طبقة القاعدة **n** تبلغ **0.410 ميكرومتر** ، وسمك طبقة الباعث **p** يبلغ **0.174 ميكرومتر** ، وطبقة **BSF (AlGaInP)** بسماكة **0.019 ميكرومتر** مع المنشطات **10¹⁷×5.019 سم⁻³** ، وسمك طبقة العازلة (**AlGaAs**) **0.02 ميكرومتر** مع المنشطات **10¹⁸×4.75 سم⁻³**. يؤدي هذا التحسين إلى الزيادة في كفاءة التحويل للخلية الفرعية **GaInP** بالإضافة إلى تقليل سمكها الإجمالي ، مما يساهم في تقليل تكاليف التصنيع. بالإضافة إلى ذلك ، تفتح هذه النتائج أيضاً آفاقاً لتحسين امتصاص الخلية الفرعية السفلية في الخلايا الشمسية ثنائية الوصلة.

الكلمات المفتاحية: الخلية الشمسية الفرعية ، وصلة PN ، الطبقة العازلة ، EQE ، المحاكاة ، التحسين .

Résumé : Dans cette étude, nous avons optimisé les sous-cellules solaires à simple jonction **GaInP** en prenant en compte divers paramètres, notamment les épaisseurs des couches **p-GaInP** (Base) et **n-GaInP** (Emetteur), l'ajout d'une nouvelle couche tampon **AlGaAs** ainsi que l'évaluation de l'impact de la couche fenêtre **AlGaInP**. Les simulations utilisant l'outil **Atlas-SILVACO** ont montré une amélioration de l'efficacité de la CS menant à une densité de courant de **18,35 mA/cm²**, une tension de **1,41 V** et un facteur de remplissage de **86,81%**. La sous-CSSJ **GaInP** a une épaisseur totale de **0,650 µm** et une efficacité de **22,42%**. Les paramètres optimaux comprennent une épaisseur de couche de base **N** de **0,410 µm**, une épaisseur de couche d'émetteur **P** de **0,174 µm**, une épaisseur de la **BSF AlGaInP** de **0.019 µm** de dopage de **5.019×10¹⁷ cm⁻³**, et une couche tampon **AlGaAs** d'épaisseur **0,02 µm** et de dopage de **4,75×10¹⁸ cm⁻³**. Cette optimisation conduit à une amélioration de l'efficacité de conversion de la sous-CSSJ **GaInP** et à réduire son épaisseur totale permettant ainsi à réduire nettement le coût de fabrication. De plus, ces résultats ouvrent également des perspectives pour améliorer la capacité d'absorption de la sous-cellule inférieure dans les cellules solaires à double jonction.

Mots clé : Sous-cellule solaire, Jonction PN, Couche tampon, EQE, Simulation, Optimisation.

Abstract : In this study, we optimized the single-junction solar sub-cells by analyzing the impact of **p-n** layer thicknesses, the insertion of an **AlGaAs** buffer layer, and the effect of the **AlGaInP** window layer. Simulations using the **Atlas-SILVACO** tool demonstrated an improvement in efficiency with a current density of **18.35 mA/cm²**, a voltage of **1.41 V**, and a fill factor FF of **86.81%**. The sub-cell had a total thickness of **0.650 µm** and an efficiency of **22.42%**. The optimal parameters included a n-base layer thickness of **0.410 µm**, a p-emitter layer thickness of **0.174 µm**, a **BSF** layer (**AlGaInP**) thickness of **0.019 µm** with a doping of **5.019×10¹⁷ cm⁻³**, and an **AlGaAs Buffer** layer thickness of **0.02 µm** with a doping of **4.75×10¹⁸ cm⁻³**. This optimization leads to an improvement in the conversion efficiency of the **GaInP** sub-cell and a reduction in its total thickness, contributing to a significant reduction in manufacturing costs. Additionally, these results also open up future perspectives for improving the absorption of the lower sub-cell in dual-junction solar cells.

Keywords : Solar sub-cell, PN junction, Buffer layer, EQE, Simulation, Optimization.

LISTE DES SYMBOLES

E_g	Énergie de gap.	eV
$E_{c(v)}$	Bande de conduction(valence).	eV
E_F	Énergie de niveau de Fermi.	eV
h	Constante de Planck.	eV.s
λ	Longueur d'onde de la lumière incidente.	μm
ν	Fréquence du rayonnement électromagnétique (photon)	1/s
C	Célérité de la lumière	m/s
$n_{1(2)}$	Facteurs d'idéalité des diodes D1 et D2.	-
k_B	Constante de Boltzmann.	eV/K
T	Température.	k
q	Charge électronique élémentaire	C
$R_{s(sh)}$	Résistance série(shunt).	Ω
$J_{0,1(0,2)}$	Courant de saturation de la diode D1(D2)	mA/cm ²
J_{cc}	Densité de courant de court-circuit.	mA/cm ²
V_{co}	Tension de circuit ouvert.	V
FF	Facteur de forme.	%
η	Rendement de conversion d'une cellule solaire.	%
J_m	Densité de Courant maximale.	mA/cm ²
V_m	Tension maximale	V
P_m	Densité de puissance maximale	mW/cm ²
P_{inc}	Puissance lumineuse incidente	mW/m ²
I_r	Irradiance solaire spectral.	W/m ²
$EQE_{(Tot)}$	Efficacité quantique Externe totale	%
RS	Réponse spectrale	A/W
a	Constante de maille	Å
$\mu_{B(\acute{e})}$	Mobilités des électrons(trous)	cm ² /eVs
ϵ_r	Constante diélectrique	C ² /Nm ²
$N_{B(\acute{e})}$	Densité effective d'états des atomes accepteurs(donneurs).	1/cm ³
α	Coefficient d'absorption.	1/cm ³
(n, k)	Indice de réfractive et coefficient d'extinction.	(- , cm ⁻¹)
R	Coefficient de réflexion.	%

LISTE DES SYMBOLES

$n(p)$	Concentration des électrons(trous).	cm^{-3}
$D_{B(\acute{E})}$	Coefficient de diffusion des électrons(trous).	m^2/s
$\tau_{B(\acute{E})}$	Durée de vie des électrons(trous).	μs
$L_{\acute{E}(B)}$	Longueur de diffusion des h^+ (Émetteur) et des e^- (Base).	nm
$d_{\acute{E}}$	Épaisseur de l'Émetteur.	μm
d_{ZCE}	Épaisseur de la zone de Déplétion.	nm
d_B	Épaisseur de la Base.	μm
d_{Tot}	Épaisseur Totale de la sous-CS	μm
$S_{\acute{E}(B)}$	Vitesse de recombinaison en surface e^- (Émetteur) et h^+ (Base)	cm/s
J_{ph}	Photo-courant.	mA/cm^2
$J_{\acute{E}}$	Densité de courant de l'Émetteur.	mA/cm^2
J_B	Densité de courant de Base.	mA/cm^2
J_{ZCE}	Densité de courant de la zone de Déplétion.	mA/cm^2
$G_{\acute{E}(B)}$	Taux de génération des électrons(trous)	cm^{-3}/s
$R_{B(\acute{E})}$	Taux de recombinaison des électrons(trous)	cm^{-3}/s
C_{rad}	Coefficient de recombinaison radiative.	cm^{-3}/s
R_{srh}	Recombinaison Shockley-Read-Hall	cm^{-3}/s
n_i	Concentration intrinsèque.	cm^{-3}
$C_{B(\acute{E})}$	Coefficient de recombinaison Auger	cm^{-3}/s
$m_{B(\acute{E})}^*$	Masse effective des e^- (h^+).	kg
χ_e	Affinité électronique	eV
J	Densité de courant totale de la sous-CS.	mA/cm^2
$J_{0,1(0,2)}$	Densité de courant de saturation de la diode D1(D2)	mA/cm^2

LISTE DES ABREVIATIONS

PV	Photo v oltaïque
sous-CSSJ	sous-cellule solaire à simple jonction
CSDJ	Cellule solaire à double jonction
GaInP	Phosphure de gallium- i ndium
AlGaAs	Arséniure de gallium et d'aluminium
AlGaInP	Phosphure d'aluminium, de gallium et d' i ndium
GaAs	Arséniure de gallium
Si	Silicium
InP	Phosphure d' i ndium
GaP	Phosphure de gallium
BC	Bande de c onduction
BV	Bande de v alence
ZCE	Zone de c harge d' e space
EPVOM	Épitaxie en p hase v apeur aux o rganom m étalliques (MOCVD)
MBE	Épitaxie par jets moléculaires (Molecular B eam E pitaxy en anglais)
SRH	Shockley- R ead H all
TCAD	Technology C omputer A ided D esign.
Silvaco	S ilicon V alley C orporation
AM1.5G	Masse d' a ir 1.5 g lobale
ARC	Revêtement antireflet (a nti- r eflective c oating en anglais)
NREL	L aboratoire n ational de l' é nergie r enouvelable (États-Unis)
STC	Conditions de t est s tandard
BSF	Champ à l'Arrière de Surface (B ack S urface F ield en anglais)
DD	Dérive-diffusion
UTMOS	U nified T heory of M etal- O xide- S emiconductor
2D/3D	D eux d imension / T rois d imension
FF	F acteur de f orme (Fill factor)
LED	Diode Électroluminescente (L ight- E mitting D iode)

Résumé.....	i
Liste des symboles.....	ii
Liste des abréviations	iv
Table des matières.....	v
Liste des Figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xii

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Bibliographie introduction générale	5
<i>Chapitre-I.....</i>	<i>6</i>
ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	6
I.1. Introduction.....	6
I.2. Historique des premières cellules solaires.....	6
I.3. Principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.....	7
I.3.1. L'absorption de la lumière dans le matériau	8
I.3.2. Génération de l'énergie solaire	9
I.3.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	10
I.3.4. Modèle équivalent à une cellule PV.....	11
I.3.5. Paramètres de base de la cellule solaire.....	12
I.3.6. Réponse Spectrale et Efficacité Quantique.....	13
I.4. Rayonnement solaire.....	14
I.5. Évolution des rendements photovoltaïques	17
I.6. Données et prévisions mondiales sur le domaine du photovoltaïque.....	18
I.7. Pertes d'énergie d'une cellule solaire.....	20
I.7.1. Pertes optiques	21
I.7.2. Pertes électriques	22
I.8. Réduction des pertes et Tendances actuelles.....	23
I.9. Technologies de cellules photovoltaïques	23
I.9.1. 1 ^{ère} génération	24
I.9.2 2 ^{ème} génération.....	24
I.9.3. 3 ^{ème} génération	25

TABLE DE MATIERE

I.9.4. 4 ^{ème} génération	25
1.10. Conclusion.....	25
Bibliographie chapitre I	26
<i>Chapitre-II</i>	29
CELLULE SOLAIRE A BASE DE SEMICONDUCTEUR III-V	29
II.1. Introduction	29
II.2. Matériaux semi-conducteurs III-V	29
II.2.1. Propriétés des matériaux semiconducteur binaire III-V	30
II.2.2. Propriétés de matériau semiconducteur ternaire GaInP et AlGaAs	31
II.2.3. Propriétés optiques.....	32
II.2.4. Résistivité thermique des matériaux GaInP et AlGaAs	33
II.3. Pourquoi la cellule à double jonctions	34
II.4. Description des cellules multi-jonctions	35
II.4.1. Histoire et développement de la sous-cellule solaire GaInP	35
II.4.2. Structure de sous-cellules solaires à base de semiconducteur III-V	38
II.4.3. Performances d'une sous-CSSJ GaInP	40
II.4.4. Structure d'une cellule solaire à double jonction GaInP/GaAs	41
II.5. Conclusion	44
Bibliographie chapitre II	45
<i>Chapitre-III</i>	48
MODELES PHYSIQUE ET LOGICIEL DE SIMULATION	48
III.1. Introduction.....	48
III.2. Modèles physiques	48
III.3. Différents types de recombinaisons	49
III.3.1. Recombinaison radiative	49
III.3.2. Recombinaison non-radiatif.....	50
III.3.2.1. Recombinaison Shockley-Read- Hall	50
III.3.2.2. Recombinaison Auger	51
III.3.3. Recombinaison de surface	51
III.4. Logiciel de simulation TCAD-SILVACO	52
III.4.1. Mode de fonctionnement du simulateur ATLAS.....	54

TABLE DE MATIERE

III.4.2. Étapes de simulation.....	55
III.4.2.1. Spécifications de la Structure	56
III.4.2.2. Spécifications des Matériaux et des modèles.....	59
III.4.2.3. Sélection des méthodes numériques	60
III.4.2.4. Spécification de Solution	61
III.4.2.5. Analyse des résultats.....	62
III.5. Optimisation de l'efficacité de la CSDJ GaInP/GaAs	64
III.5.1. Effet des épaisseurs des bases de sous-cellules GaInP Top et GaAs Bottom	64
III.5.2. Impact de couches Fenêtre sur la performance de la CSDJ GaInP/GaAs	67
III.5.2.1. Sans fenêtres GaInP Top et AlGaInP Bottom.....	68
III.5.2.2. Avec une fenêtre GaInP Top et sans fenêtre AlGaInP Bottom	69
III.5.2.3. Avec une fenêtre AlGaInP Bottom et sans fenêtre GaInP Top	70
III.5.2.4. Avec fenêtres GaInP sur Top et AlGaInP sur Bottom	70
III.5.3. Impact de Couche BSF AlGaInP Top	72
III.6. Conclusion	75
Bibliographie chapitre III.....	76

Chapitre-IV..... 78

SIMULATION DE LA CELLULE SOLAIRE A JONCTION SIMPLE GAInP 78

IV.1. Introduction	78
IV.2. Etude des cellules solaires à simple jonction PN en GaInP	79
IV.2.1. Description de la structure.....	79
IV.2.2. Modèles et paramètres de simulation	80
IV.2.3. Diagramme de bande d'énergie	82
IV.2.4. Performance de la sous-cellule solaire à jonction simple GaInP	84
IV.3. Variation des épaisseurs de l'Émetteur et de la Base	85
IV.4. Optimisation du rendement.....	87
IV.5. Efficacité quantique externe de la sous-CSSJ GaInP	89
IV.6. L'impact de la couche Fenêtre (Window)	90
IV.7. L'insertion de la nouvelle couche Tampon (Buffer)	92
IV.8. Comparaisons des performances	93
IV.8.1. Comparaison de structures sans et avec couche tampon.....	93
IV.8.2. Caractéristiques J-V et P-V de la sous-cellule GaInP	95
IV.9. Validation des résultats.....	96

TABLE DE MATIERE

IV.10. Conclusion.....	97
Bibliographie chapitre IV	98
CONCLUSION GENERALE	100
CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES	102

Liste des figures

Figure I.1 Structures des premières cellules solaires (a) : D'Adams et Day 1877, (b) : De Charles Fritts 1883 ..	7
Figure I.2 Structure de bande d'un semiconducteur à gap (a) direct et (b) indirect.....	8
Figure I.3 Génération de paires électron-trou	9
Figure I.4 Principe de l'effet photovoltaïque.....	10
Figure I.5 Schéma équivalent d'une CS comportant un modèle à deux diodes.....	11
Figure I.6 Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une CS sous éclairage	12
Figure I.7 Efficacité quantiques externe et interne pour le Si cristallin	14
Figure I.8 Composantes du rayonnement solaire reçus sur une surface terrestre	15
Figure I.9 Description du différent nombre de masse d'air.....	16
Figure I.10 Distribution spectrale des éclairages solaire AM1.5G, AM1.5D et AM0	16
Figure I.11 Evolution historique du rendement des différentes cellules PV élaborées en laboratoire	17
Figure I.12 Capacité de production d'énergie renouvelable nette installée en 2021	18
Figure I.13 Répartition de la capacité PV installée dans les 10 premiers pays en 2021	19
Figure I.14 Capacité solaire PV installée de 2018 à 2021	19
Figure I.15 Perspectives du marché mondial annuel de l'énergie solaire PV pour la période 2022 à 2026	20
Figure I.16 Différents mécanismes de pertes dans une cellule solaire	20
Figure I.17 Pertes optiques dans une CS à base de silicium.....	21
Figure I.18 Principales technologies des cellules solaires photovoltaïques	24
Figure II.1 Energie de bande interdite en fonction du paramètre cristallin des alliages III-V	30
Figure II.2 Indices optiques du $Ga_xIn_{1-x}P$ à 300 K.....	32
Figure II.3 Indices optiques de l' $Al_xGa_{1-x}As$ à 300 K.....	33
Figure II.4 Indices optiques de l' $AlGaInP$ à 300 K.....	33
Figure II.5 Variation de la résistivité thermique en fonction de composition x dans les alliages $Ga_xIn_{1-x}P$ et $Al_xGa_{1-x}As$ à 300K	34
Figure II.6 Proportion d'énergie du spectre solaire AM1.5 convertible par des cellules en GaAs, GaInP/GaAs et GaInP/GaAs/Ge (en couleurs), et pertes par transmission et par thermalisation.....	34
Figure II.7 Coupe schématique transversale d'une cellule en GaInP proposée par : (a) T. Takamoto, (b) Ming-Ju Yang	36
Figure II.8 Schéma de structure des sous-cellules solaires étudiées : (a) DJ GaInP/GaAs par J. W. Leem, (b) SJ GaInP par Lu. Shulong.....	36
Figure II.9 Diagramme schématique (a) : DJ GaInP/GaAs [P. P. Nayak], (b) : CSSJ GaInP [J. F. Geisz].....	37
Figure II.10 Diagramme schématique (a) : SCDJ GaInP/GaAs [W. A. Chee], (b) : SJ GaInP [A. Benlekhdim]	37
Figure II.11 Structure classique d'une sous-CS à base de semi-conducteurs III-V.....	38

LISTE DE FIGURES

Figure II.12 Schéma de diagramme des bandes d'une sous-CS basé sur la structure présentée de la Fig. II.6 .	39
Figure II.13 Schéma structural de la CSDJ GaInP/GaAs étudiée par W. K. Chee.....	41
Figure II.14 Diagramme des bandes d'énergie de la sous-CSDJ GaInP/GaAs	42
Figure II.15 Efficacités quantiques externes et caractéristiques courant-tension des CSSJ's (GaAs, GaInP) et de CSDJ (GaInP/GaAs) étudiée par W. K. Chee.....	43
Figure III.1 Schéma descriptif des trois processus de recombinaison dans un semi-conducteur	51
Figure III.2 Les différents outils de SILVACO	53
Figure III.3 Environnement de l'éditeur DeckBuild du Logiciel TCAD-Silvaco.....	53
Figure III.4 Les entrées et les sorties de l'outil Atlas	54
Figure III.5 Étapes des commandes définies dans l'outil Atlas.....	55
Figure III.6 Maillage de la sous-CSSJ GaInP	56
Figure III.7 Régions et matériaux de la sous-CSSJ GaInP	57
Figure III.8 Position des électrodes de la sous-CSSJ GaInP	57
Figure III.9 Définition de dopage de la sous-CSSJ GaInP	58
Figure III.10 Spécification de solution de la structure GaInP.....	61
Figure III.11 Extraction des caractéristiques J(V) et P(V) de la sous-CSSJ GaInP.....	63
Figure III.12 Représentation de la caractéristique J(V) de la sous-CSSJ GaInP avec Tonyplot	63
Figure III.13 Structure de CSDJ GaInP/GaAs	64
Figure III.14 Variations des paramètres PV en fonction de l'épaisseur de la base GaInP Top	65
Figure III.15 Variation des paramètres J_{cc} , V_{co} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la Base GaAs Bottom et pour deux valeurs de l'épaisseur de la Base GaInP Top	66
Figure III.16 Caractéristiques (J-V) et (P-V) pour deux épaisseurs de la base GaInP Top	67
Figure III.17 Diagramme des bandes d'énergies illustrant les couche Fenêtre (a) : AlGaInP Avant et (b) : GaInP Arrière	68
Figure III.18 Caractéristiques (J-V) en l'absence des deux couches Fenêtre	69
Figure III.19 Caractéristiques (J-V) avec fenêtre GaInP Top et sans fenêtre AlGaInP Bottom.....	69
Figure III.20 Caractéristiques (J-V) avec fenêtre AlGaInP Bottom et sans fenêtre GaInP Top.....	70
Figure III.21 Caractéristiques (J-V) avec couches Fenêtre GaInP Top et AlGaInP Bottom.....	71
Figure III.22 Caractéristiques (J-V) sans et avec Fenêtres pour les 4 cas	72
Figure III.23 Diagramme des bandes de la sous-CS GaInP Top illustrant la passivation arrière par la couche BSF AlGaInP.....	72
Figure III.24 Evolution des paramètres J_{cc} , V_{co} , FF et η de la SCDJ GaInP/GaAs.....	73
Figure IV.1 Structure des sous-CSSJ's GaInP : (a) littérature, (b) proposée.	79
Figure IV.2 Structure et maillage en deux dimensions de la sous-CSSJ GaInP.....	80
Figure IV.3 Variations des indices optiques n et k du matériau $Ga_{0.51}In_{0.49}P$	82
Figure IV.4 Variation des indices optiques du matériau $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$	82

LISTE DE FIGURES

Figure IV.5 Diagramme des bandes d'énergie et champ électrique à travers la structure de la sous-CSSJ GaInP sans couche tampon	83
Figure IV.6 Diagramme des bandes d'énergie et champ électrique à travers la structure de la sous-CSSJ GaInP avec couche tampon	83
Figure IV.7 Agrandissement du diagramme des bandes d'énergie de la sous-CSSJ GaInP avec tampon.....	84
Figure IV.8 Variation de la densité de courant de court-circuit (J_{cc}) en fonction de l'épaisseur de la base (L_N) pour différentes épaisseurs de l'émetteur (L_P).....	85
Figure IV.9 Tension en circuit ouvert en fonction de l'épaisseur L_N pour différentes épaisseurs L_P	86
Figure IV.10 Facteur de Forme en fonction de l'épaisseur L_N pour différentes épaisseurs L_P	87
Figure IV.11 Rendement de la sous-CSSJ GaInP en fonction des épaisseurs L_N et L_P	88
Figure IV.12 Efficacité quantique externe de la sous-CSSJ GaInP en fonction de la longueur d'onde pour différentes épaisseurs d_e/d_b	90
Figure IV.13 Rendement de la sous-CSSJ GaInP en fonction de la concentration de dopage du Fenêtre pour différentes épaisseurs.....	91
Figure IV.14 Valeurs optimales du dopage et de l'épaisseur de la couche fenêtre AlGaInP déduites de l'efficacité η de la sous-CSSJ GaInP	91
Figure IV.15 Rendement de la sous-CSSJ GaInP en fonction du dopage de la couche Tampon AlGaAs pour différentes épaisseurs.....	92
Figure IV.16 Valeurs optimales du dopage et de l'épaisseur de tampon AlGaAs déduites de l'efficacité η de la sous-CSSJ GaInP	93
Figure IV.17 Caractéristiques $J(V)$ de la sous-CSSJ GaInP (paramètres initiaux, sans tampon et avec tampon)	94
Figure IV.18 Caractéristiques $J(V)$ de la sous-CSSJ GaInP optimisé	95

Liste des tableaux

Tableau II.1 Propriétés importante des éléments et des semiconducteur composés binaires à 300K	31
Tableau II.2 Propriétés importantes des semiconducteurs composés ternaires $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ et $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ à 300 K	31
Tableau II.3 Caractéristiques électriques de cellules solaires obtenu par W. A. Chee	43
Tableau III.1 Comparaison des Performances de CSDJ's GaInP/GaAs pour Différents Scénarios de Couches de Fenêtre	71
Tableau IV.1 Paramètres et intervalles d'optimisation de la structure GaInP	80
Tableau IV.2 Paramètres des matériaux GaAs, $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$, $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ et $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	81
Tableau IV.3 Caractéristique et paramètres physico-géométrique de la sous-CSSJ GaInP optimisé.....	96
Tableau IV.4 Comparaison des paramètres significatifs entre la sous-CSSJ proposée GaInP et les cellules solaires publiées à AM1.5	96

INTRODUCTION GENERALE

Le réchauffement climatique mondial, causé par les émissions des gaz à effet de serre provenant de la combustion des énergies fossiles, a engendré une prise de conscience quant à la nécessité de trouver des alternatives énergétiques renouvelables et moins polluantes. Les technologies photovoltaïques ont émergé comme l'une des solutions les plus prometteuses pour répondre aux exigences énergétiques actuelles [1]. La filière des technologies de la conversion de l'énergie solaire qui est considérée comme une ressource inépuisable à l'échelle humaine offre des avantages considérables. De plus, les matériaux utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques permettant la conversion énergétique sont réutilisables et par conséquent ils contribuent à une approche plus durable de la production d'énergie [2].

Néanmoins, deux grands défis se présentent. D'une part, le coût élevé de ces technologies constitue un obstacle majeur, et d'autre part, leurs rendements limités les rendent moins compétitives par rapport aux énergies fossiles. Pour surmonter ces défis, de grands efforts sont déployés pour explorer d'autres solutions qui tirent parti des avancées technologiques actuelles, principalement de l'industrie de la microélectronique et de la nanotechnologie. Dans cette vision, et afin de rendre les énergies renouvelables plus attractives et économiquement viables, il est donc nécessaire d'améliorer les rendements énergétiques et de réduire les coûts de production des technologies de conversion d'énergie.

Les cellules solaires à double jonction (CSDJ's) composées de deux matériaux semi-conducteurs III-V épitaxiés en couches successives, tels que le phosphure de gallium indium (GaInP) et l'arséniure de gallium (GaAs), offrent un potentiel prometteur pour répondre à ces exigences [3]. En effet, Les cellules solaires III-V à double jonction se caractérisent par des rendements énergétiques relativement élevés parmi les technologies photovoltaïques. Ceci est principalement due du fait de leurs architectures à deux couches qui permettent une meilleure exploitation du spectre solaire [4].

L'épaisseur d'une cellule PV joue un rôle important dans la conversion énergétique. En fait, une cellule d'épaisseur finie ne peut pas absorber toute la lumière incidente au-dessus du seuil

de la bande interdite à cause du coefficient d'absorption $\alpha(h\nu)$, des matériaux composant les cellules solaires, qui n'est pas infini. Une partie de la lumière sera transmise, surtout pour les énergies des photons proches du seuil de la bande interdite où α est faible. Plus la cellule est mince, plus la transmission est importante. Ainsi, dans le cas d'une cellule à deux jonctions, la réduction de l'épaisseur de la sous-cellule supérieure aura comme effet de redistribuer la lumière entre les deux sous-cellules en augmentant le courant de la sous-cellule inférieure au détriment du courant de la sous-cellule supérieure [5].

L'une des préoccupations qui il faut tenir en considération lors de la fabrication des cellules solaires (CS's) est la minimisation des pertes électriques qui découle de la recombinaison des paires électron-trou à l'intérieur de la cellule. Cette recombinaison entrave le déplacement des porteurs de charges jusqu'aux électrodes de la CS est rend impératif l'exploration des techniques permettant de réduire l'effet la recombinaison des paires électron-trou [6].

L'optimisation des performances et la réduction des coûts des cellules solaires sont des objectifs clés dans le domaine de l'énergie solaire [7]. Nous avons utilisé de différentes méthodes d'optimisation analytiques dans le but de déterminer l'efficacité de conversion optimale en fonction d'un ensemble de paramètres spécifiques [8]. L'usage d'un ensemble de paramètres variables plus rigoureux que l'analyse paramétrique classique où un seul paramètre est varié tandis que les autres paramètres sont maintenus constants. Dans le présent travail, deux paramètres sont simultanément variés tandis que le reste des autres paramètres sont maintenus constants [9].

Pour accomplir les travaux présentés dans cette thèse, nous avons utilisé l'outil **Atlas-SILVACO** [10] pour la conception et l'analyse de la sous-cellule solaire à simple jonction (CSSJ) **GaInP**, ainsi que pour l'optimisation de la CSDJ **GaInP/GaAs**. L'outil Atlas nous a permis de prédire les performances de ces dispositifs photovoltaïques. Cette étude contribuera à une meilleure compréhension et analyse des CS's **GaInP** et **GaInP/GaAs**. Dans la première étape, nous présenterons les résultats de la simulation de la sous-CSSJ **GaInP**. Nous examinerons leurs caractéristiques électriques et leurs performances de conversion d'énergie. Dans la deuxième étape, nous présenterons les résultats de la simulation numérique de la CSDJ **GaInP/GaAs** à double jonction. Cette dernière structure permet d'exploiter plus efficacement le spectre solaire en optimisant les différents paramètres qui influent sur l'efficacité **PV** de la cellule. Nous analyserons les performances électriques obtenus grâce à ces optimisations.

La présente thèse est organisée en quatre chapitres suivis d'une conclusion et des perspectives.

Chapitre I : retrace brièvement l'histoire du développement des premières cellules solaires utilisées dans les dispositifs de conversion de l'énergie photoélectrique. De même, il donne une explication détaillée du principe de fonctionnement des cellules solaires PV ainsi que leurs principaux paramètres de performance. Ceci est suivi de l'étude des différents mécanismes de perte qui limitent le rendement de la conversion photovoltaïque, ainsi que des solutions utilisées pour réduire ces pertes. Enfin, un récapitulatif des rendements obtenus pour les différentes générations de cellules solaires est présenté.

Chapitre II : dans un premier temps, donne de brèves définitions des différents paramètres et propriétés fondamentales des matériaux III-V qui composent les sous-cellules solaires à double jonction. Ceci est suivi par une section consacrée à l'évolution historique de la sous-CSSJ GaInP. Ensuite il présente les détails de la composition des structures de la sous-CSSJ GaInP fondamentales ainsi que ses performances. Enfin, les structures des cellules à double jonction en utilisant un exemple démonstratif d'une cellule solaire basée sur des matériaux semiconducteurs GaInP et GaAs sont décrites.

Chapitre III : Ce chapitre expose en première partie les différents mécanismes de recombinaison ainsi que la présentation du logiciel de simulation TCAD-SILVACO, en exposant en détail son mode de fonctionnement ainsi que son module de simulation Atlas dédié à l'étude du comportement électrique des composants électroniques. Le chapitre présente également les différentes commandes (instructions) dans Atlas, ainsi que les différents modèles existant dans ce simulateur. Finalement, il présente l'étude d'une configuration de CSDJ comprenant deux sous-cellules distinctes GaInP et GaAs. Bien que cette configuration soit documentée dans la littérature, elle nécessite toutefois une optimisation appropriée. Les résultats de simulation obtenus montrent une correspondance étroite avec les résultats expérimentaux déjà publiés.

Chapitre IV : dans ce chapitre nous étudierons par simulation numérique la sous-CS à simple jonction GaInP par le simulateur Atlas dans le but de déterminer les paramètres optimaux de la structure de sous-cellule à haute performance, ceci sera accompli par l'étude de leur caractéristique électrique et leur Efficacité quantique externe (EQE). Nous étudierons également l'impact des deux épaisseurs, qui forment la jonction PN (Base ' L_P ' ; Émetteur ' L_N '), sur les caractéristiques

électriques de la sous-CSSJ **GaInP** afin de pouvoir extraire ces paramètres optimaux qui correspondent à son efficacité maximale. Nous allons ensuite modéliser et étudier les performances de l'insertion d'une nouvelle couche **tampon** dans la sous-CSSJ **GaInP**. Nous allons étudier l'effet de deux paramètres : le dopage et l'épaisseur de cette couche en **AlGaAs** sur les caractéristiques électriques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Willoughby et G. Conibeer, *"Solar cell materials : developing technologies"*, Livre, John Wiley & Sons, Mars 2014.
- [2] A. M. Diallo, *"Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri jonction"*, Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Se.), Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Décembre 2011.
- [3] K. Louarn, *"Etude et réalisation de jonctions tunnel à base d'hétérostructures à semi-conducteurs III-V pour les cellules solaires multi-jonction à très haut rendement"*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, Janvier 2018.
- [4] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N.s Kopidakis et X. Hao *"Solar cell efficiency tables (version 58). Prog Photovolt Res Appl, 29(7), 657-667, juin 2021.*
- [5] A. Luque et S. Hegedus, *"Handbook of Photovoltaic Science and Engineering"*, Second Edition, Chapitre 8, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 978-0-470-72169-8, 2011.
- [6] E. Saintaimé, *"Étude et modélisation des substrats ultra-minces de silicium et de leur application au photovoltaïque"*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2020.
- [7] L. Fara et M. Yamaguchi *"Advanced solar cell materials, technology, modeling, and simulation"*, IGI Global, ISBN 978-1-4666-1928-9, 2012.
- [8] A. Adaine, *"Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN"*, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2018.
- [9] L. Djedoui, A. Aissat, A. Djemouai, et J. P. Vilcot, *"Improving the efficiency of a GaInP solar cell using an AlGaAs buffer layer by optimizing the thicknesses of the PN junction"*, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 17(4), 1191-1202, 2022.
- [10] Atlas User's Manual, DEVICE SIMULATION SOFTWARE, Silvaco, Inc, Santa Clara, CA 95054, Août 2016.

Chapitre I

ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est produite à partir du rayonnement solaire qui fait partie des énergies renouvelables (ENR). La production de cette énergie repose sur l'utilisation des cellules photovoltaïques qui exploitent le principe de l'effet photoélectrique. Ceci nécessite un long processus impliquant la modélisation, la caractérisation et l'optimisation de telles cellules en se basant sur les connaissances de la source d'énergie utilisé.

Dans ce chapitre nous présentons les bases et les notions indispensables à la conversion de l'énergie électrique. En première partie du présent chapitre, nous donnons une brève histoire concernant le développement des premières cellules solaires (CS's) utilisées dans les dispositifs de conversion de l'énergie photoélectrique. Par la suite, nous donnons une description expliquant le principe de fonctionnement des CS's PV ainsi que leurs paramètres de performances principales. Ceci, est suivi d'une étude détaillée des différents mécanismes de pertes qui limitent l'efficacité de la conversion PV ainsi que les solutions exploitées pour minimiser ces pertes. Dans la dernière partie du chapitre, nous énumérons les rendements obtenus pour les différentes générations des CS's.

I.2. Historique des premières cellules solaires

En 1839, Alexandre Edmond Becquerel a découvert l'effet photoélectrique en constatant le passage du courant électrique entre deux électrodes exposées au rayonnement lumineux. Cet effet, également appelé l'effet photovoltaïque externe, est à la base du fonctionnement des cellules solaires modernes. Par la suite, en 1873, W. Smith et J. May ont fait une découverte importante concernant le sélénium, un semi-conducteur. Ils ont observé que sa résistance changeait lorsqu'il était exposé à la lumière, mettant ainsi en évidence l'effet photovoltaïque interne, où la lumière arrache des électrons, créant ainsi des porteurs de charge libres dans le matériau.

En 1873, la photoconductivité du sélénium a été découverte par W. Smith, W. Adams et R. Day. Quelques années plus tard, ils ont réalisé qu'une tige de Se (sélénium) équipée

d'électrodes de platine pouvait produire de l'énergie électrique lorsqu'elle était exposée à la lumière. Cela a été la première preuve que les corps solides peuvent convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique (Figure I.1.a) [1]. En 1883, C. Fritts a réalisé une avancée significative en fabriquant la première cellule solaire fonctionnelle. Il a pressé un film de Se d'une épaisseur de 25 microns entre un contact en cuivre d'un côté et un contact semi-transparent en or de l'autre. Cette cellule solaire avait une surface de l'ordre de 30 cm² et présentait une efficacité de conversion d'environ 1% (Figure I.1.b) [2].

Par la suite, en 1904, A. Einstein a apporté des explications théoriques à cet effet. Dans le même domaine, en 1916, J. Czochralski a réalisé une autre avancée importante en développant le processus de croissance cristalline, ouvrant ainsi la voie à la production de monocristaux semi-conducteurs de haute qualité. Ces découvertes ont ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine des CS's et des semi-conducteurs.

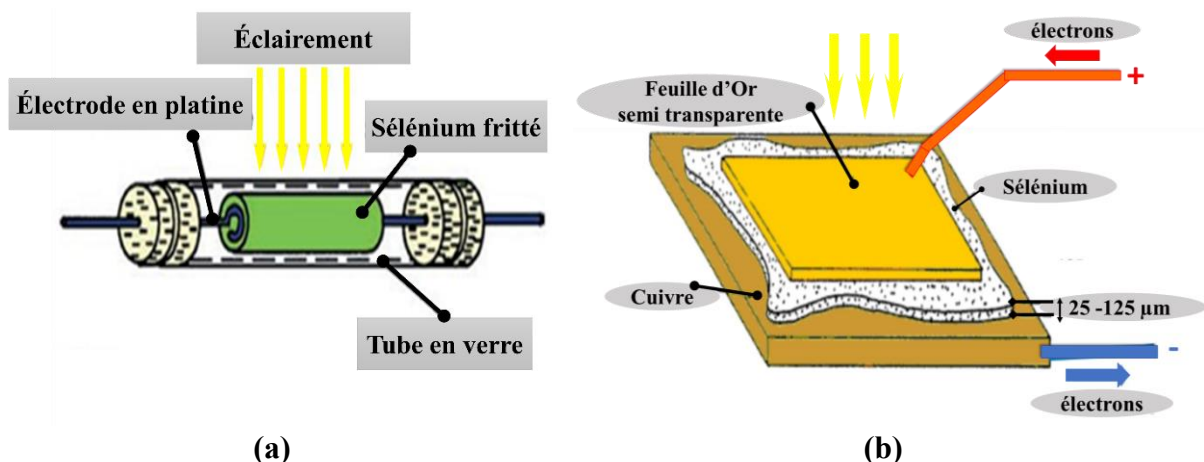


Figure I.1 Structures des premières cellules solaires (a) : D'Adams et Day 1877, (b) : De Charles Fritts 1883.

W. B. Shockley a établi en 1949 la théorie de la jonction PN, posant ainsi les bases théoriques des CS's qui sont largement utilisées de nos jours. C'est dans les laboratoires Bell en 1954 que D. Chapin, C. Fuller, et G. Pearson ont ensuite développé la première CS en silicium (Si), d'une superficie de 2 cm², affichant un rendement pouvant atteindre 6 % [3]. Ce rendement a rapidement augmenté pour atteindre 10 % dans les années qui ont suivi, mais les coûts élevés des modules solaires limitaient leur utilisation à des applications spéciales.

I.3. Principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est produite à partir du rayonnement solaire, qui fait partie des sources d'énergie renouvelables. La cellule PV constitue la base des installations

généralisant cette énergie. Son fonctionnement repose sur le principe de l'effet photoélectrique. Pour assurer une conversion énergétique PV efficace, quatre étapes de base doivent être réunies dans ce processus [4] :

- ✚ Absorption de photons à l'aide d'un matériau approprié ;
- ✚ Génération de porteurs de charge (paires électron-trou 'e⁻-h⁺') ;
- ✚ Séparation des porteurs libres de charges opposées avant leur recombinaison ;
- ✚ Collecte ou transport de porteurs de charge photo-générés à travers des contacts électriques et leur passage à travers un circuit externe pour créer un courant électrique utile.

I.3.1. L'absorption de la lumière dans le matériau

L'élément prédominant pour les semi-conducteurs qui exerce une influence sur leur capacité d'absorption est leur énergie de gap E_g . Ce dernier correspond à la différence entre l'énergie maximale de la bande de valence (BV) et l'énergie minimale de la bande de conduction (BC). La BV est supposée être occupée complètement par des e⁻, tandis que la BC est totalement vide. Les semi-conducteurs peuvent être classés en deux catégories en fonction du type de gap, qu'il soit direct ou indirect [5]. La Figure I.2 présente les schémas des courbes de dispersion de deux semi-conducteurs, l'un caractérisé par une bande interdite directe et l'autre par une bande interdite indirecte [6].

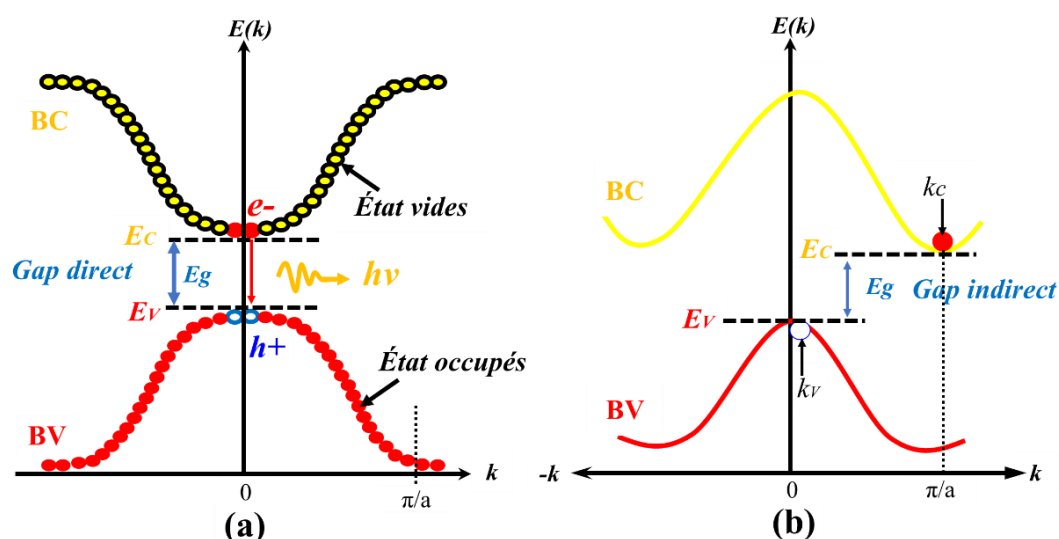


Figure I.2 Structure de bande d'un semi-conducteur à gap (a) : direct et (b) : indirect.

✚ **Gap direct** : est défini lorsque la valeur minimale de la BC et la valeur maximale de la BV correspondent au même vecteur d'onde (k). Dans ce cas, Les transitions inter bandes s'effectuent de manière verticale, ce qui signifie qu'elles sont radiatives. Les deux semi-

conducteurs, **GaInP** et **GaAs**, qui ont des band gaps de **1.9 eV** et **1.42 eV** respectivement, appartiennent au groupe des matériaux présentant un gap direct.

✚ **Gap indirect** : Dans ce cas (Figure I.2.b), la transition entre les extrema des bandes, les points les plus bas de la **BC** et les points les plus élevés de la **BV**, se fait de manière oblique plutôt que verticale. Cela conduit à des transitions électroniques qui ne sont pas radiatives. Pour absorber un photon avec une énergie E_{ph} égale ou légèrement supérieure à celle du gap E_g , l'intervention d'un phonon est nécessaire. Cette condition supplémentaire pour l'absorption réduit considérablement les probabilités d'absorption.

Lorsque l'énergie du photon ($h\nu$) est inférieure au gap du matériau ($E_{ph} < E_g$), la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. En revanche, lorsque le photon a une énergie suffisante ($h\nu \geq E_g$), l'interaction entre le photon et le semi-conducteur se traduit par la génération d'une paire électron-trou ($e^- - h^+$), ce qui modifie localement la conductivité du matériau.

I.3.2. Génération de l'énergie solaire

Le concept essentiel de l'effet photovoltaïque (**PV**) s'appuie sur l'interaction de la lumière avec la matière au sein des semi-conducteurs. Quand un semiconducteur est éclairé, les photons avec une énergie adéquate sont capturés, donnant naissance à des paires e^- et h^+ .

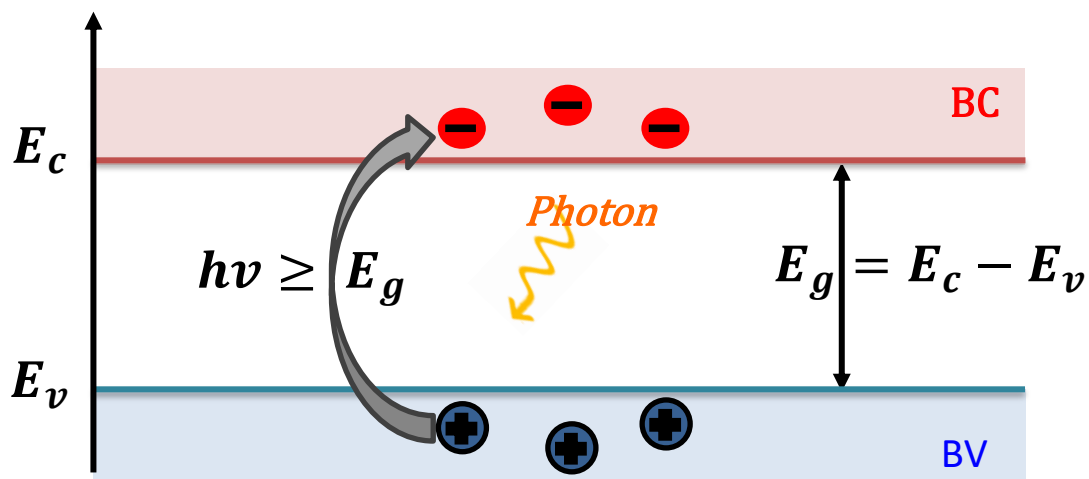


Figure I.3 Génération de paires électron-trou.

Ces paires électron-trou se forment lorsque des électrons sont transférés de la **BV** à la **BC**. Pour que l'effet **PV** soit efficace, il est essentiel de séparer ces paires (e^- , h^+). Si elles ne sont pas séparées, elles peuvent rapidement se recombiner, libérant ainsi un phonon et un photon (Figure I.3), ce qui réduit l'efficacité de la conversion énergétique. La séparation réussie de ces paires (e^-

, h^+) permet de générer un courant électrique continu et d'exploiter l'énergie lumineuse absorbée par le matériau semi-conducteur [7].

I.3.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Afin d'améliorer l'efficacité de la CS, il est essentiel de minimiser les recombinaisons des e^- et des h^+ et de les orienter vers des faces opposées du matériau. Cette séparation crée une différence de potentiel, générant ainsi un photo-courant. Pour atteindre cet objectif, une approche courante consiste à créer un champ électrique permanent dans le matériau en utilisant une jonction PN. Cette jonction est formée par deux couches de semi-conducteur, l'une dopée P et l'autre dopée N (Figure I.2). La jonction PN permet d'extraire sélectivement les électrons et les trous, favorisant ainsi la production d'un courant électrique continu quand la cellule PV est exposée à la lumière.

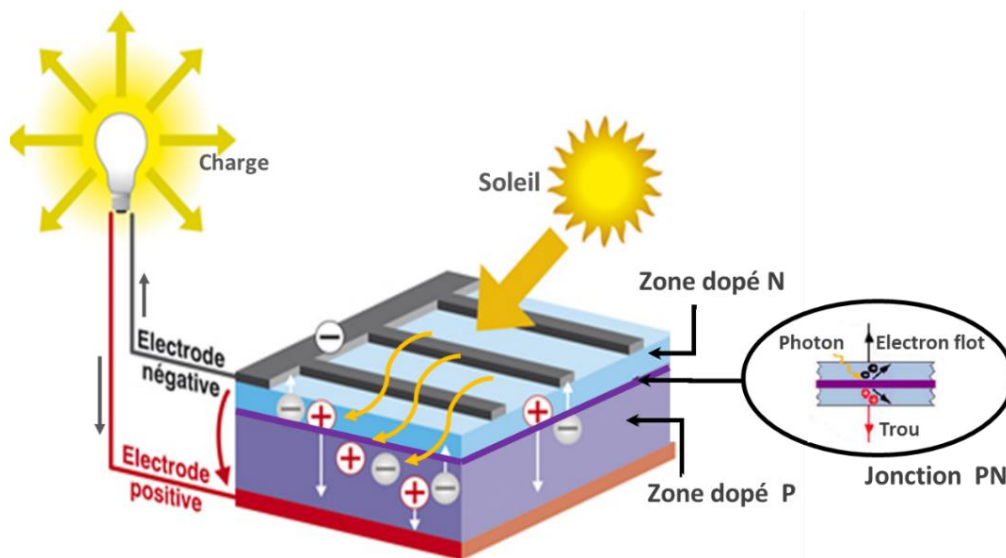


Figure I.4 Principe de l'effet photovoltaïque.

Quand un semi-conducteur dopé de type P entre en contact avec un semi-conducteur dopé de type N, il se produit un phénomène de diffusion à la jonction. Les e^- majoritaires présents dans la couche N migrent vers la région P, tandis que les h^+ majoritaires dans la couche P se déplacent vers la région N. À la jonction, les porteurs de charge (e^- , h^+) se recombinent, créant une zone où il n'y a plus de porteurs mobiles, appelée zone de charge d'espace (ZCE). Cette recombinaison engendre une différence de potentiel et donc un champ électrique orienté de la région N vers la région P.

Le processus d'absorption se produit lorsque des photons d'énergie ($h\nu$) atteint ou dépasse la valeur de l'énergie de gap (E_g). Ces photons sont absorbés par le matériau, ce qui entraîne la

création de paires (e^- , h^+) lorsque les e^- passent de la BV à la BC. Le champ électrique interne créer dans la ZCE sépare spatialement les porteurs photogénérés : les e^- sont dirigés vers la couche N et les h^+ vers la couche P.

I.3.4. Modèle équivalent à une cellule PV

La modélisation électrique des cellules solaires est un moyen efficace pour comprendre leur principe de fonctionnement. Parmi les circuits équivalents les plus couramment utilisés dans la littérature pour modéliser les cellules solaires à jonction p-n sous éclaircissement, on retrouve les circuits à deux diodes (Figure I.5) [8-9].

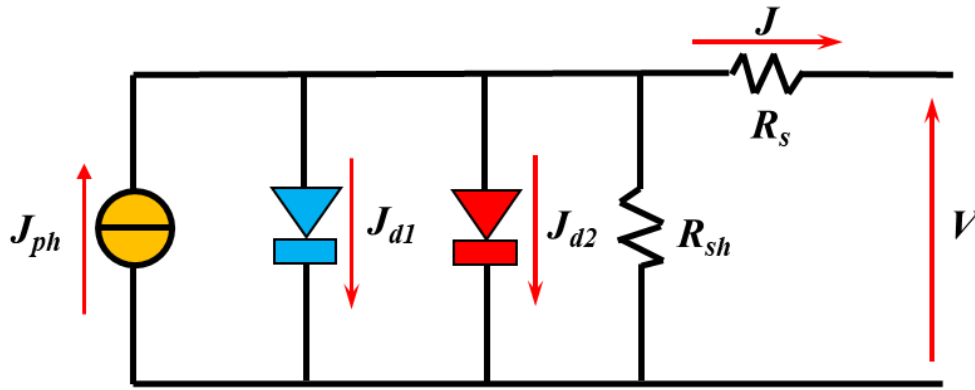


Figure I.5 Schéma équivalent d'une CS comportant un modèle à deux diodes.

L'expression générale qui donne la densité de courant total J_{PV} délivrée par la CS est la suivante :

$$J_{PV}(V) = J_{ph} - J_{0.1} \left(\exp\left(\frac{q(V+R_s J)}{n_1 K_B T}\right) - 1 \right) - J_{0.2} \left(\exp\left(\frac{q(V+R_s J)}{n_2 K_B T}\right) - 1 \right) - \frac{V+R_s J}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

Avec :

$J_{0.1(0.2)}$: Densités de courant de saturation des diodes d_1 due à la diffusion et d_2 due aux recombinaisons ; $k_B T$ et q : Constante de Boltzmann, température de fonctionnement et charge électronique élémentaire ; J_{ph} et $n_{1(2)}$: Courant photo-généré et facteurs d'idéalité des d_1 et d_2 .

La variation du facteur d'idéalité (n) d'une diode de recombinaison d'une CS à l'autre reflète des taux de recombinaison différents, dépendant du matériau utilisé et de sa qualité. Le modèle à une diode ne différencie pas la diffusion de la recombinaison, les regroupant toutes les deux dans une seule diode. D'autre part, la résistance série (R_s) modélise les pertes de puissance en raison des résistances inhérentes à la cellule, qui comprennent les résistances des couches de base, la zone de transition de la jonction et les contacts avant et arrière. Enfin, la résistance parallèle (R_{sh}), également appelée shunt, représente les courants de fuite résultant de la présence

d'impuretés métalliques dans la jonction ou de défauts dans la structure cristalline du matériau. L'évaluation des valeurs de ces résistances parasites est cruciale pour analyser la qualité du matériau et poursuivre la recherche visant à améliorer le rendement des cellules solaires [5].

I.3.5. Paramètres de base de la cellule solaire

Les plus importantes grandeurs physiques de la CS procèdent de sa caractéristique $I(V)$, illustrée sur la Figure I.6 [10-12].

- ✚ **Tension V_{co}** : La tension de circuit-ouvert V_{co} est la tension maximale aux bornes de la CS lorsque le courant qui la traverse est nul (circuit ouvert), elle dépend particulièrement de l'éclairement solaire ainsi que de la température de la CS ;
- ✚ **Densité J_{cc}** : représente le courant qui circule à travers la CS lorsque la tension à ses bornes est réduite à zéro, c'est-à-dire en situation de court-circuit. Le J_{cc} est influencée par l'intensité du flux lumineux qui atteint la cellule ainsi que par la surface de la CS elle-même ;
- ✚ **Puissance P_m** : La puissance maximale P_m est le point de fonctionnement optimal d'une CS où elle atteint sa puissance maximale. Cela se produit lorsque la cellule génère le meilleur compromis entre le courant et la tension. Au point de puissance maximale (I_m, V_m).
- ✚ **Facteur de remplissage FF** : ou facteur de forme est un Paramètre important pour définir la qualité d'une CS, et indique le rapport entre puissance P_m sur le produit de courant I_{CC} et la tension V_{co} ;

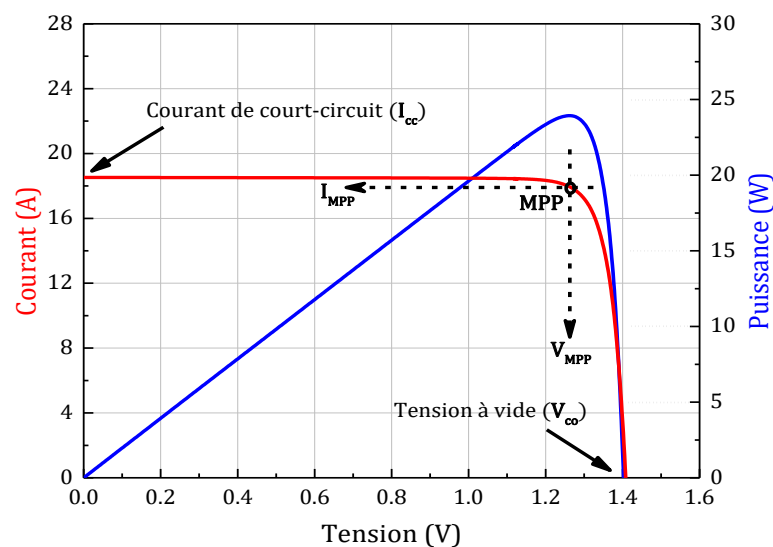


Figure I.6 Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'une CS sous éclairement.

- ✚ **Rendement de conversion (η)** : L'efficacité η est exprimé en pourcentage et indique la quantité d'énergie solaire capturée par la cellule qui est effectivement convertie en courant électrique. Elle est calculée par le rapport entre la puissance P_m et la puissance lumineuse incidente P_{inc} sur la cellule PV.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{inc}} \quad (I.3)$$

Avec :

$$V_{co} = \frac{nK_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.4)$$

I.3.6. Réponse Spectrale et Efficacité Quantique

La réponse spectrale (RS) ou sensibilité spectrale et l'efficacité ou rendement quantique (EQ) sont toutes deux utilisées dans l'analyse des cellules solaires et le choix dépend de l'application. La réponse spectrale utilise la puissance de la lumière à chaque longueur d'onde tandis que L'efficacité quantique utilise le flux de photons [13-14]. La RS, mesurée en A/W, d'une cellule PV pour chaque longueur d'onde λ en μm , s'obtient en divisant le photo-courant généré (I_{ph} en A) par la puissance lumineuse incidente (P_{inc} en W), Cette relation est définie par la formule suivante [15] :

$$RS(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} \quad (I.5)$$

L'efficacité quantique (QE) est un paramètre qui permet de caractériser les cellules PV en termes de sensibilité électrique à la lumière. On distingue deux types d'efficacité quantique externe et interne pour une CS à une longueur d'onde (λ) donnée [16] :

- ✚ L'EQE mesure l'efficacité de conversion des photons incidents en charges électroniques collectées par la CS ;
- ✚ L'EQI quantifie la capacité d'un dispositif à exploiter au mieux les photons incidents et absorbés pour générer des charges électroniques collectées.

La Figure I.7 présente les rendements EQE et EQI en fonction de λ pour une CS en silicium cristallin (c-Si) avec une couche antireflet. De plus, les différentes pertes possibles sont indiquées sur cette figure [17].

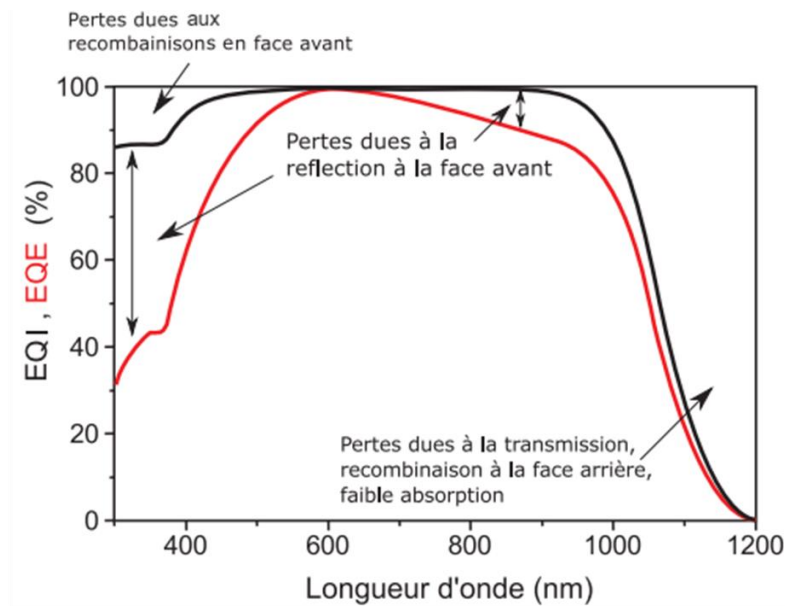


Figure I.7 Efficacités quantiques externe et interne pour le Si cristallin [17].

Les rendements quantiques **EQE** et **EQI** en fonction de la réponse **RS** sont calculés à l'aide des formules (I.6) et (I.7) [18] :

$$EQE(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} \times RS(\lambda) \approx \frac{RS(\lambda)}{\lambda} \times (1.24 \text{ W} \cdot \mu\text{m} / \text{A}) \quad (I.6)$$

$$EQI(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (I.7)$$

Où $R(\lambda)$: est le coefficient de réflexion calculé à partir des indices optiques n et k ;

L'écart entre les **EQ's** externe et interne, telle qu'elle est représentée dans la Figure I.7, résulte principalement de la réflexion de certaines portions de la lumière à la surface avant de la CS. Cette réflexion est due à la différence de l'indice n entre l'air et le matériau. Afin de résoudre ce problème, différentes solutions peuvent être mise en œuvre, telle que l'ajout de couches antireflets (**ARC**). En outre, la texturation de surface permet de diminuer la réflexion.

I.4. Rayonnement solaire

La puissance maximale du rayonnement solaire au niveau de la surface terrestre est d'environ **1 kW/m²**. Tandis que le rayonnement solaire a une puissance moyenne de **1,37 kW/m²** hors de l'atmosphère. Cet écart entre la puissance moyenne hors de l'atmosphère et la puissance maximale à la surface terrestre s'explique par l'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère lorsqu'il traverse celle-ci. Diverses molécules atmosphériques, comme l'ozone, l'oxygène et le dioxyde de carbone, absorbent une partie de l'énergie solaire, ce qui diminue la puissance du rayonnement atteignant la surface terrestre. [7].

Les rayonnements solaires concernés par le photovoltaïque sont des rayonnements électromagnétiques (ultraviolet, visible et infrarouge). Ils peuvent être divisés en trois types :

- ✚ **Rayonnement direct** : celui qui provient directement du soleil vers la surface terrestre ;
- ✚ **Rayonnement diffus** : celui qui est dispersé dans l'atmosphère avant d'atteindre le sol ;
- ✚ **Rayonnement albedo** (ou réfléchi) : celui qui est réfléchi par la surface terrestre.

Et le rayonnement E_{Global} (global), systématiquement mesuré par les stations météorologiques, s'exprime par :

$$E_{Global} = E_{Direct} + E_{Diffus} + E_{Albedo} \quad (I.8)$$

Où E_{Direct} , E_{Global} et E_{Albedo} représentent respectivement les rayonnements : direct, global et diffus.

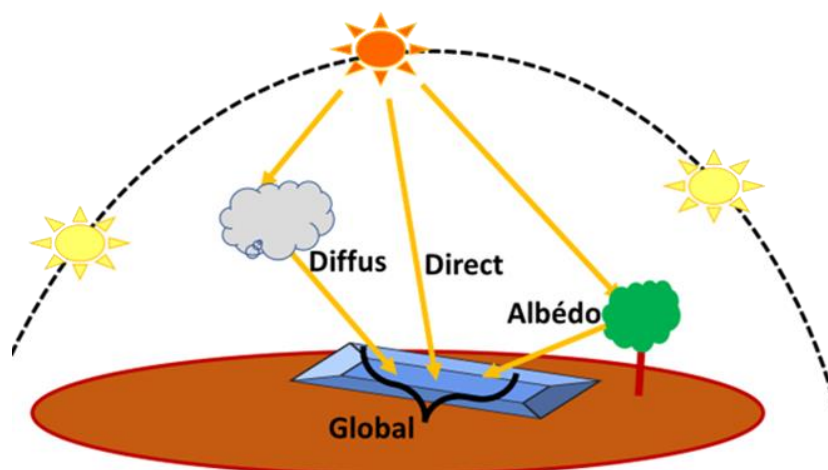


Figure I.8 Composantes du rayonnement solaire reçus sur une surface terrestre.

Le coefficient AM (masse d'air) est une valeur établie en relation avec l'angle sous lequel le rayonnement solaire frappe la surface par rapport à la direction verticale, et il permet de prendre en compte l'influence de l'atmosphère sur le spectre solaire. Les différentes valeurs d' AM sont les suivantes :

- ✚ $AM\ 0$ désigne le rayonnement solaire au-dessus de l'atmosphère terrestre, où la masse d'air est pratiquement nulle, utilisé comme référence standard pour les applications spatiales.
- ✚ $AM\ 1$ est défini lorsque le soleil est au zénith, et l'angle d'incidence θ_z est de 0 degré ;
- ✚ $AM\ 1,5$ et $AM2$ sont des situations où le rayonnement solaire fait des angles d'incidence θ_z de $48,2^\circ$ et 60° respectivement.

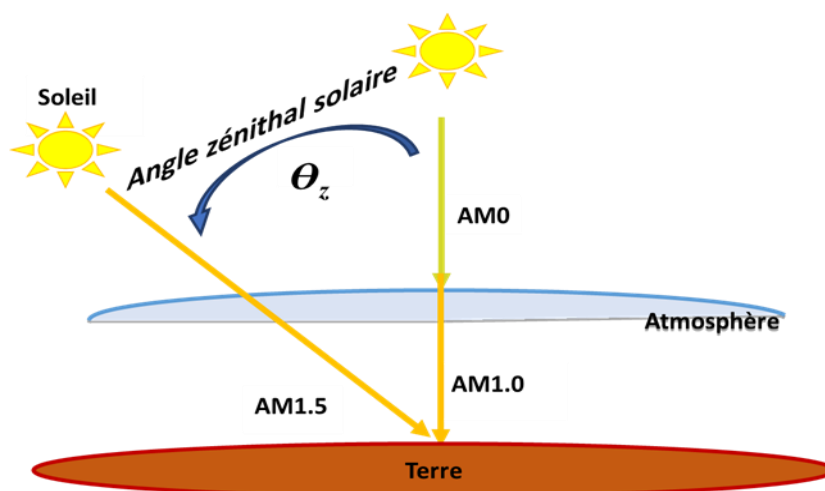


Figure I.9 Description du différent nombre de masse d'air.

La Figure I.10 illustre la distribution spectrale de trois spectres de référence : AM1.5G, AM1.5D, et AM0.

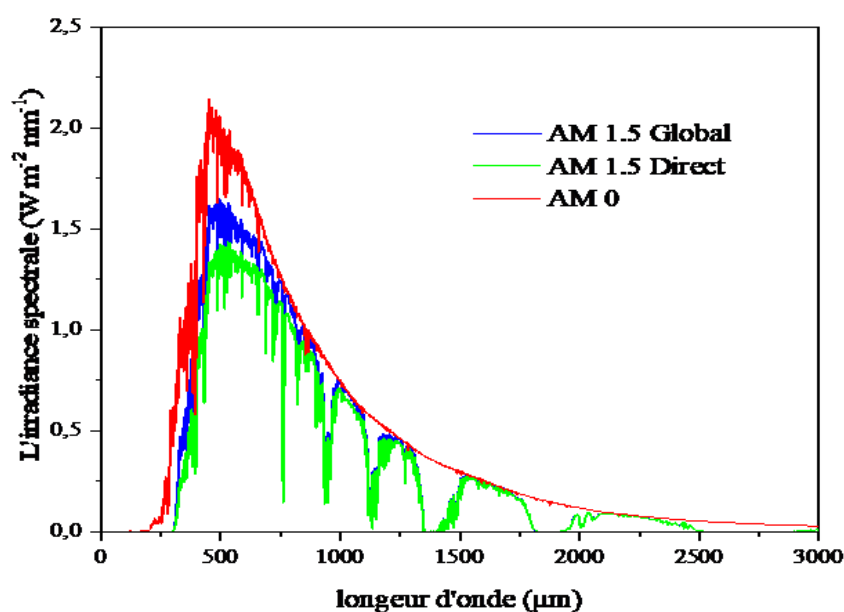


Figure I.10 Distribution spectrale des éclairagements solaire AM1.5G, AM1.5D et AM0 [19].

Ces spectres correspondent respectivement à des puissances d'irradiance solaire intégrée de 1000 W/m^2 , 900 W/m^2 , et 1361 W/m^2 . Le spectre solaire de référence AM1.5G est adapté aux modules solaires à plaque plane et est utilisé comme condition de test standard (STC) pour évaluer les performances des modules solaires. Le spectre AM1.5D est destiné au travail avec des concentrateurs solaires. Enfin, le spectre AM0 représente le rayonnement solaire extraterrestre [19].

I.6. Évolution des rendements photovoltaïques

Le développement des technologies des CS's photovoltaïques au cours des 47 dernières années est illustré sur la Figure I.11[20]. Le violet dans le code couleur est utilisé pour signaler les technologies à base des matériaux **III-V**, qui se réfèrent aux éléments situés dans les colonnes **III** et **V** du tableau périodique. Les progrès d'efficacité au sein de cette filière (**III-V**) sont représentés par des lignes continues de couleur lavande, fournissant ainsi une indication de l'évolution future prévue des rendements des CS's à base de **III-V**. Il est à souligner que cette amélioration de rendement, qui semble suivre une tendance linéaire, se réalise principalement par des sauts technologiques [21].

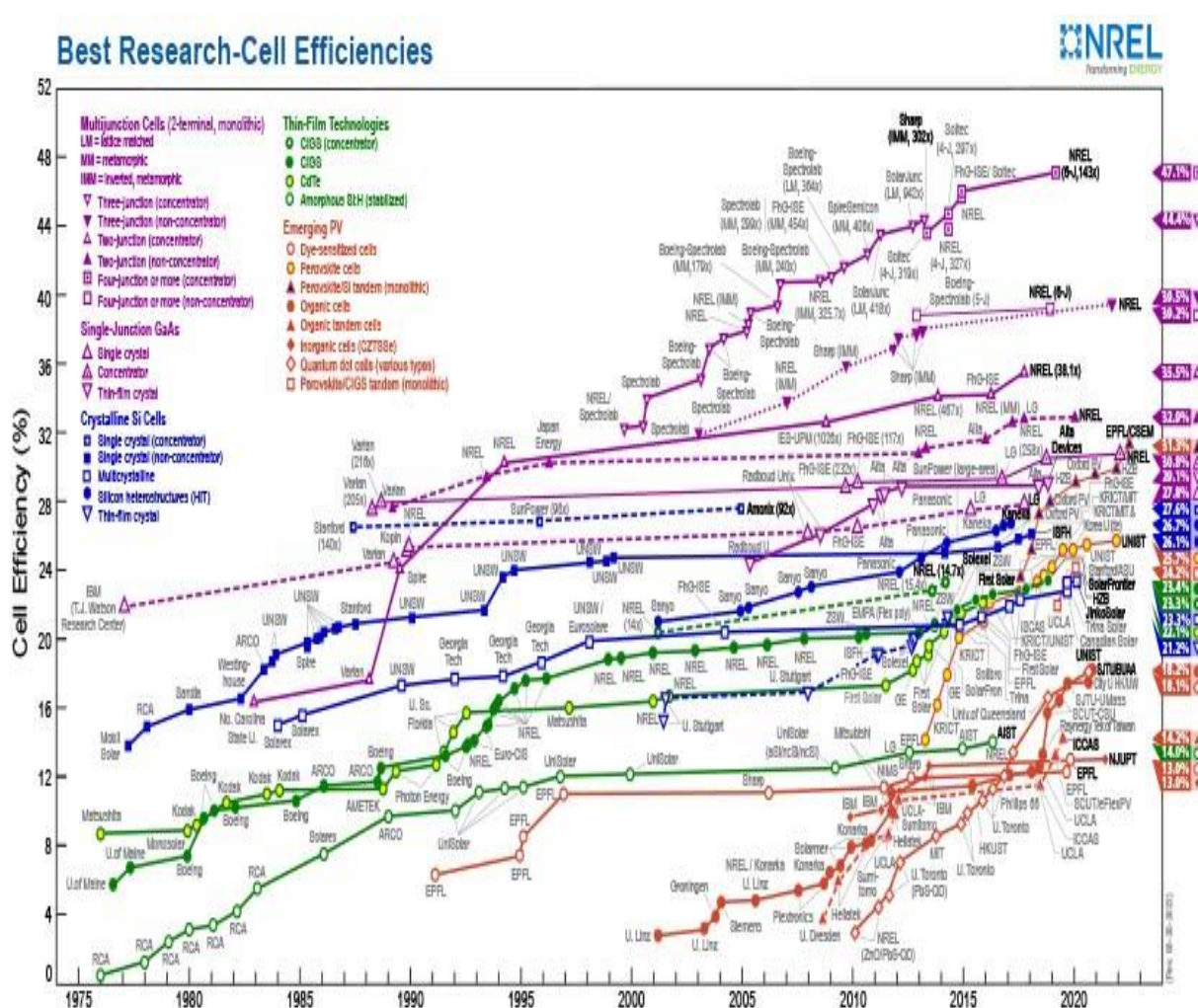


Figure I.11 Evolution historique du rendement des différentes cellules PV élaborées en laboratoire [21].

Les CS's à base de **Si** et de **GaAs** ont une limite théorique d'efficacité de conversion η similaire, évaluée à 33 % selon le modèle de Shockley-Queisser. Cependant, l'efficacité réelle du **GaAs** est actuellement supérieur à celui du **Si** en raison de sa nature de matériau à gap direct,

ce qui lui permet d'absorber plus efficacement le spectre solaire. Par conséquent, les cellules **multi-jonctions** présentent des rendements plus élevés en raison de leur meilleure absorption du spectre solaire par rapport aux CS's à une seule jonction. Les recherches exposées dans cette thèse se focalisent sur les filières encadrées en violet sur la Figure I.11 du schéma du laboratoire **NREL**. Notre étude se concentre sur le développement de filières spécifiques visant à améliorer l'efficacité et à réduire les coûts des modules utilisés dans le domaine spatial. Les chapitres suivants détaillent les cellules basées sur ces filières.

I.7. Données et prévisions mondiales sur le domaine du photovoltaïque

La demande mondiale en énergie connaît une croissance rapide, tandis que les ressources naturelles d'énergie diminuent en raison de l'expansion et du développement industriel ces dernières années. L'énergie solaire est l'alternative qui peut répondre à cette demande croissante jusqu'à présent. Grâce à ses avantages attrayants, l'énergie **PV** connaît un développement considérable dans le monde depuis environ deux décennies. Depuis 1998, le parc solaire **PV** enregistre une croissance moyenne de 35 % par an [1].

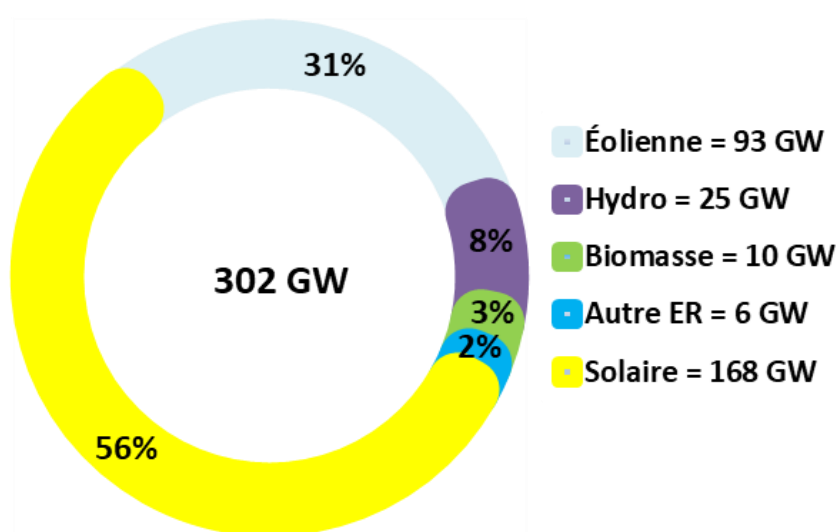


Figure I.12 Capacité de production d'énergie renouvelable nette installée en 2021.

En 2021, l'industrie **PV** mondiale a connu une augmentation de 35.24 GW (123.6 GW en 2020).de puissance **PV** installées, atteignant 167.8 GW de capacité cumulée. De plus, l'énergie solaire représente une part de 56 % des plus de 300 GW de nouvelles capacités de production d'énergie renouvelable créées.

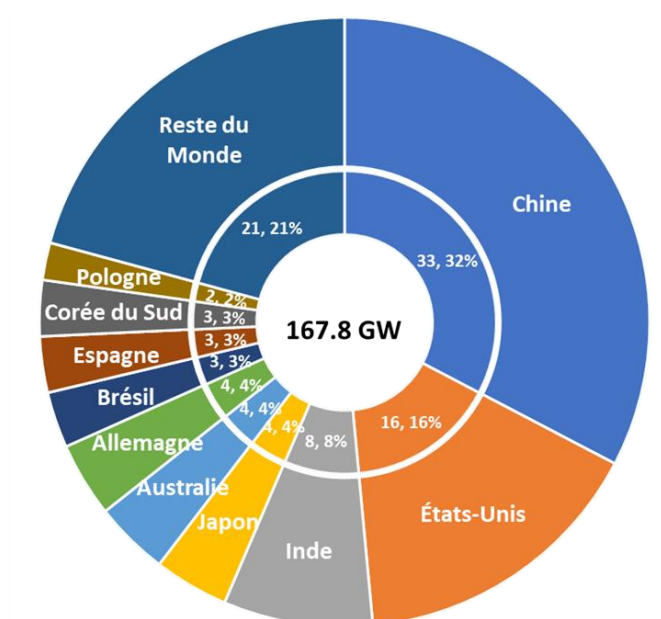


Figure I.13 Répartition de la capacité PV installée dans les 10 premiers pays en 2021.

Cependant, si l'on prend en compte la demande mondiale d'électricité, où les sources non renouvelables représentent plus de 70 % de la production, la part de l'énergie solaire reste modeste, à environ 4 %. Comme illustré dans la Figure I.13, les deux pays leaders en termes de capacité PV, la Chine et l'États-Unis, représentent 51 % de la capacité totale du monde.

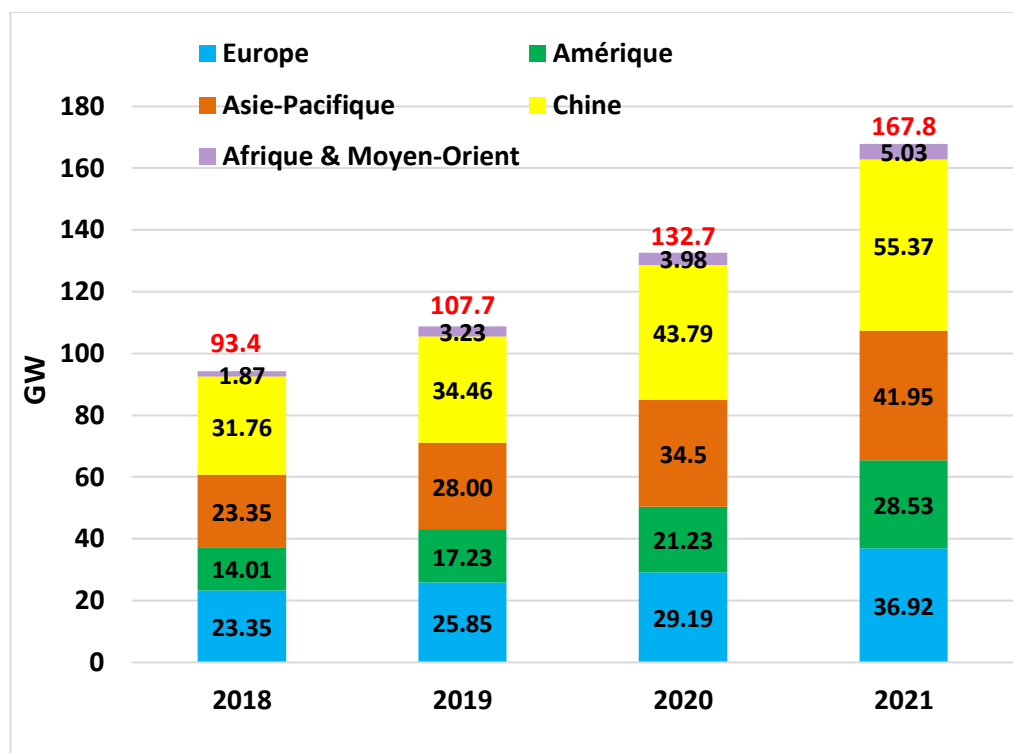


Figure I.14 Capacité solaire PV installée de 2018 à 2021.

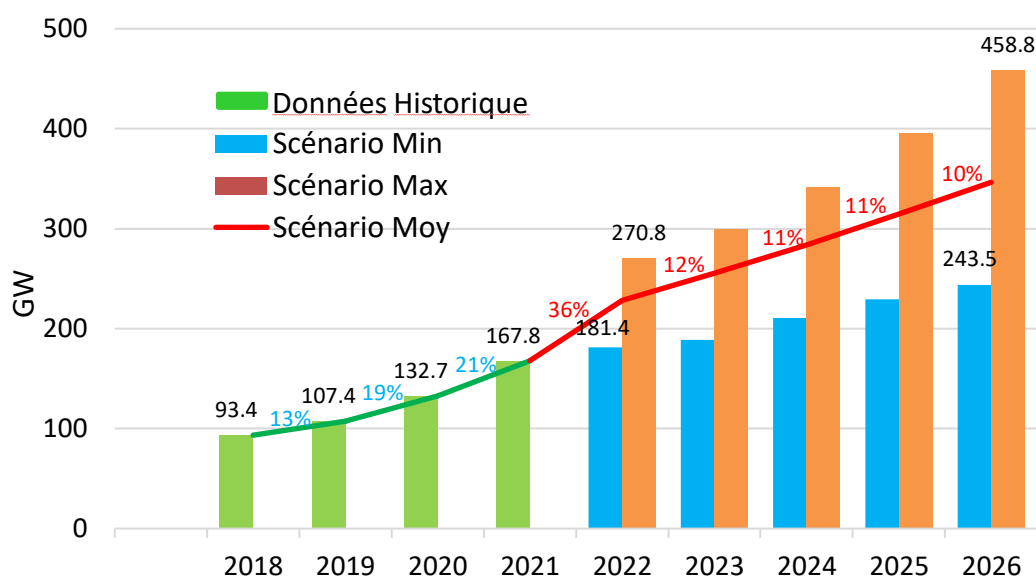


Figure I.15 Perspectives du marché mondial annuel de l'énergie solaire PV pour la période 2022 à 2026.

Dans les trois années à venir, une demande considérable en énergie solaire est prévue. L'objectif est d'atteindre un seuil de **2 térawatts (TW)** d'ici la fin de 2025, suivi de l'installation prévue de **2,3 TW** d'énergie solaire à l'échelle mondiale d'ici la fin de 2026 [22].

I.8. Pertes d'énergie d'une cellule solaire

La limite de Queisser-Shockley, établie à environ 33 %, représente l'efficacité maximale théorique d'une CSSJ. Cette limite a été calculée pour la première fois en 1961 par H. J. Queisser et W. Shockley [23].

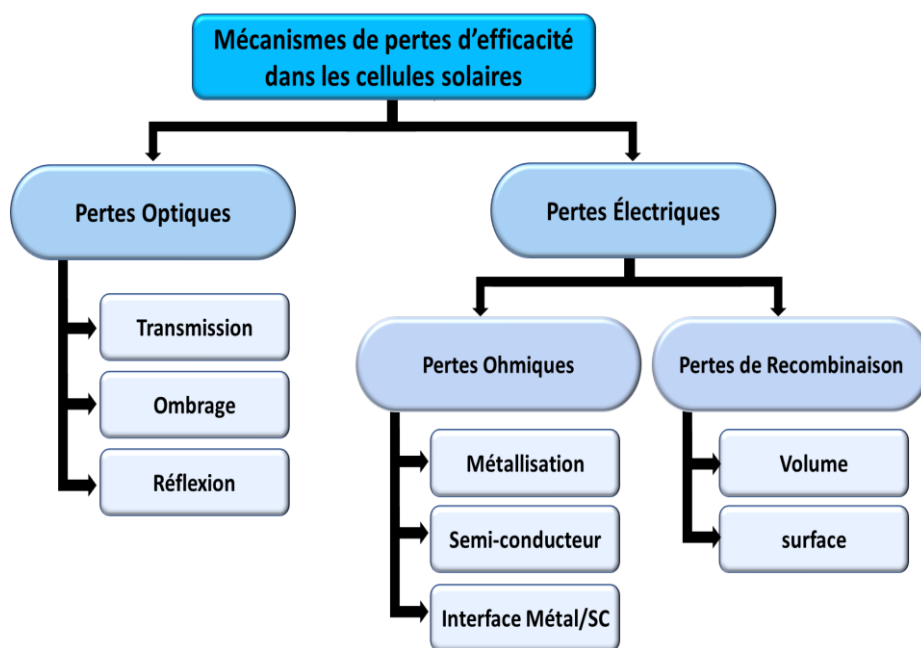


Figure I.16 Différents mécanismes de pertes dans une CS [14] [25].

Les avancées dans les concepts de 3ème génération ouvrent la voie à des améliorations significatives du rendement des cellules solaires. En effet, ces nouvelles approches pourraient permettre d'atteindre un rendement de 44 % en exploitant efficacement les photons de haute et basse énergie [24]. Cependant, pour parvenir à ces rendements élevés, il est essentiel de comprendre et de maîtriser les sources de pertes qui peuvent impacter les performances des cellules solaires. Ces pertes peuvent être classées en deux catégories majeures : les pertes optiques et les pertes électriques [14] [25], ou encore les pertes intrinsèques et les pertes extrinsèques [26].

I.8.1. Pertes optiques

- a) **Transmission** : Les pertes de transmission dans une CS sont principalement dues à la bande de gap du semi-conducteur, qui est identifiée comme le principal facteur limitant. Lorsque les photons ont une énergie $E_{ph} \geq E_{gap}$ (E_{gap} : gap du matériau), ils sont absorbés, créant des porteurs photoexcités et engendrant une diminution d'environ 27 % en termes de rendement (Zone A de la Figure 1.14). D'autre part, les photons avec une énergie $E_{ph} > E_{gap}$ provoquent un échauffement du matériau par le mécanisme de thermalisation en quelques picosecondes. Cette perte correspond à environ 28% des pertes totales (Zone B de la Figure 1.14).

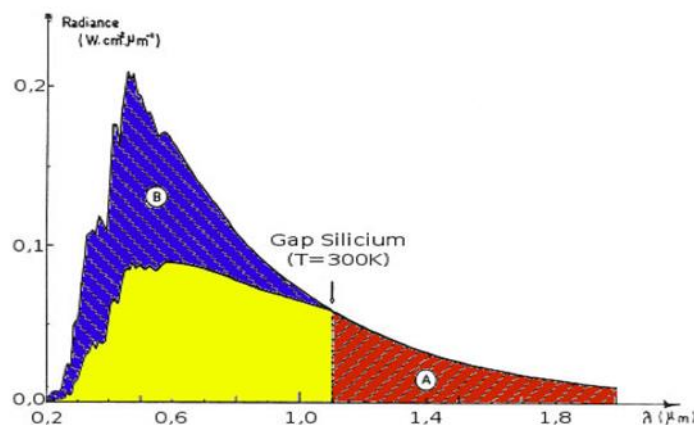


Figure 1.17 Pertes optiques dans une CS à base de silicium.

- b) **Réflexion** : Les pertes par réflexion dans une cellule solaire surviennent lorsque l'énergie incidente est renvoyée par la surface non métallisée de la CS. Pour minimiser ces pertes, on utilise à la fois un revêtement antireflet (ARC) et une texturation de la surface. En combinant ces approches, on peut réduire considérablement la réflexion de la lumière, qui peut atteindre jusqu'à 30 % sur les surfaces non traitées [28].

- c) **Taux d'ombrage** : les pertes dans une cellule solaire liées à l'ombrage sont dues à la présence d'une grille en métal sur la face avant, qui bloque partiellement l'entrée des photons dans le matériau. Afin de réduire ces pertes, les dimensions des métallisations doivent être soigneusement ajustées pour trouver un équilibre entre les pertes optiques résultant de la couverture partielle de l'émetteur et les pertes résistives causées par la géométrie de la métallisation. En moyenne, la réduction de la lumière causée par l'ombrage correspond à environ 8 % de la surface de la cellule solaire.

I.8.2. Pertes électriques

- a) **Pertes résistives** : Les pertes résistives sont causées par la résistance série (R_s) qui limite le courant dans le circuit, ainsi que par les résistances parallèles (R_{sh}) telles que les courants de fuite le long des bords de la CS ou lorsque le métal de la face avant court-circuite l'émetteur.
- b) **Facteur de tension** : Il désigne la tension de circuit ouvert (V_{co}) dans une cellule solaire, qui correspond à la tension aux bornes de la CS lorsque aucun courant ne circule dans le circuit externe. Cependant, la tension V_{co} est limitée et ne peut pas dépasser la valeur du gap énergétique (E_g) du matériau utilisé dans la cellule solaire. En d'autres termes, V_{co} ne représente qu'une fraction de la tension du gap. Cette limitation du facteur de tension est en partie due aux recombinaisons Auger, un phénomène de recombinaison non radiative des porteurs de charge [29] ;
- c) **Facteur de forme** : Le FF peut atteindre jusqu'à 89 % dans une CS. Cependant, il est essentiel de comprendre que la caractéristique $J(V)$ de cette cellule ne pourra jamais être parfaitement rectangulaire à 100 %. Cette limitation découle de la nature exponentielle de l'expression du courant, conformément à la statistique de Boltzmann [30] ;
- d) **Pertes par recombinaison** : Les pertes de recombinaison dans une cellule solaire surviennent lorsque les porteurs de charge, créés suite à l'absorption de photons, se recombinent avant d'atteindre les contacts électriques. Ces pertes réduisent l'efficacité de la cellule en diminuant la contribution des porteurs de charge au courant électrique généré. Elles peuvent être dues à des défauts matériels tels que les impuretés et les défauts de cristallinité, ce qui entraîne un taux de recombinaison élevé. Il existe différents mécanismes de recombinaison qui peuvent se produire, que ce soit dans le volume du matériau ou à sa surface [31].

I.9. Réduction des pertes et Tendances actuelles

Face aux diverses pertes évoquées précédemment, l'industrie des cellules solaires s'est engagée dans une quête constante visant à minimiser ces déperditions et à améliorer l'efficacité globale des dispositifs photovoltaïques. Les avancées dans la technologie et la compréhension des mécanismes responsables des pertes ont ouvert la voie à de nouvelles approches et stratégies pour optimiser les performances des cellules solaires. Il est possible de réduire ces pertes en améliorant la qualité des matériaux utilisés ou en modifiant l'architecture des dispositifs PV's. Parmi les alternatives de conception envisageables, on peut citer [29-30] [32-36] :

- ✚ L'augmentation de la concentration de lumière dans les CS's est l'une des méthodes envisagées. En augmentant cette concentration, l'angle d'émission tend vers celui d'absorption, et le facteur de Boltzmann tend vers zéro, ce qui peut améliorer l'efficacité des cellules solaires ;
- ✚ Une autre piste prometteuse est la réduction de l'épaisseur des CS's. Cette approche pourrait jouer un rôle clé dans le développement de cellules solaires à la fois moins coûteuses et plus performantes ;
- ✚ La passivation des cellules solaires, c'est-à-dire l'amélioration des propriétés électroniques de la surface et du volume des matériaux en neutralisant les effets de leurs défauts électriquement actifs, est également une stratégie envisagée pour réduire les pertes ;
- ✚ Par ailleurs, la texturation de surface peut constituer une solution efficace, car elle seule peut augmenter l'efficacité des cellules solaires d'environ 8% ;
- ✚ Enfin, l'utilisation de CS's à plusieurs bandes interdites empilées verticalement, également appelées cellules Multi-Junction (MJ), représente une approche prometteuse pour minimiser les pertes dues à la thermalisation. Cette technique permet de fractionner le spectre solaire, ce qui se traduit par une amélioration de l'efficacité globale des cellules.

I.10. Technologies de cellules PV

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet PV. Les matériaux utilisés comme absorbeurs dans les CS's peuvent être des semi-conducteurs inorganiques, des semi-conducteurs organiques ou des matériaux hybrides. Chaque catégorie de ces matériaux est définie par son propre rendement et son coût, et elles sont couramment classées en quatre générations [35-43] :

I.10.1. 1^{ère} génération

Cette catégorie comprend des matériaux à base de couches cristallines épaisses composées de silicium (Si). Cette génération est basée sur du Si monocristallin et multicristallin, ainsi que sur des jonctions simples de III-V (GaAs), les CS's à base de Si représentent désormais plus de 80 % de la capacité installée mondiale et détiennent 90 % de part de marché. En raison de leur efficacité relativement élevée, ce sont les cellules les plus couramment utilisées.

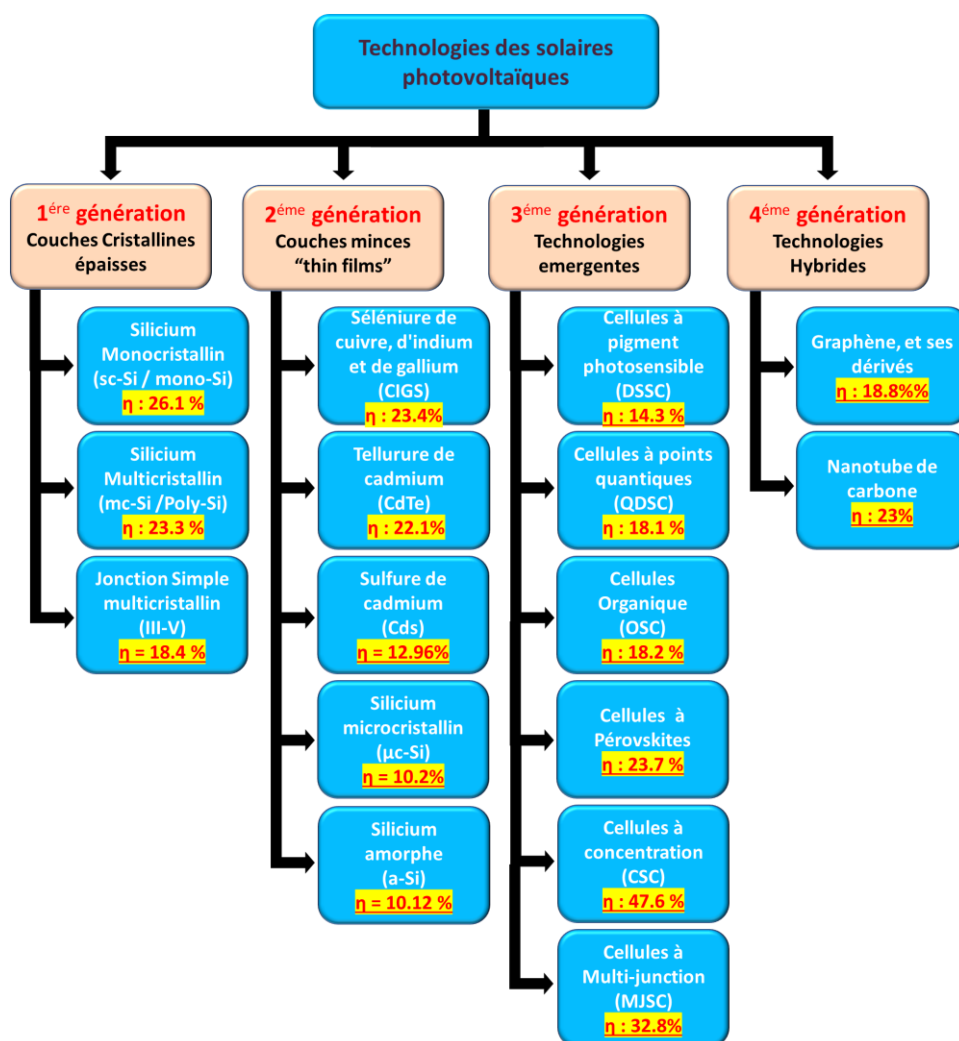


Figure I.18 Principales technologies des CS's.

I.10.2. 2^{ème} génération

La deuxième génération de CS's, connue sous le nom de cellules à films minces, est fabriquée principalement à partir de silicium amorphe (a-Si), de tellurure de cadmium (CdTe), de sulfure de cadmium (CdS) et de sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS). Ces technologies visent à remplacer les cellules de silicium cristallin de manière plus économique.

Ils offrent des propriétés mécaniques améliorées qui sont idéales pour les applications flexibles, mais cela comporte le risque d'une efficacité réduite [44] ;

I.10.3. 3^{ème} génération

La "troisième génération" de cellules solaires fait référence aux cellules qui dépassent la limite théorique de rendement énergétique connue sous le nom de limite de **SQ**. Cette génération inclut de nouveaux concepts **PV's**. Les CS's de troisième génération englobent un large éventail d'approches, allant des systèmes peu coûteux à faible rendement, comme les cellules solaires organiques à colorant, jusqu'aux systèmes plus coûteux à haut rendement, comme les cellules **MJ's III-V**. Ces cellules trouvent des applications variées, allant de l'intégration dans les bâtiments jusqu'aux utilisations dans l'espace [45] ;

I.10.4. 4^{ème} génération

La quatrième génération de CS's englobe les technologies innovantes telles que les cellules solaires à polymères à couches minces, qui sont caractérisées par leur faible flexibilité et leur coût réduit. Elle intègre également les nanostructures inorganiques novatrices telles que les oxydes métalliques, les nanoparticules métalliques, ainsi que les nanomatériaux à base organique tels que le graphène, les nanotubes de carbone et leurs dérivés. Ces avancées visent à améliorer la durabilité et les performances des cellules solaires [46-47].

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions indispensables à la conversion de l'énergie électrique et spécifiquement la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, soit l'énergie photoélectrique, en exploitant l'effet photovoltaïque. Vue son importance économique et ses propriétés non polluantes, l'énergie photoélectrique suscite un grand intérêt dans le milieu de recherche du domaine de conversion d'énergie.

A cet effet, nous avons abordé brièvement le développement historique des premières cellules solaires qui sont les éléments de base des dispositifs de conversion de l'énergie photoélectrique. Par la suite, le principe de fonctionnement des CS's est donné afin d'expliquer l'effet photovoltaïque et de faire sortir les paramètres de performances principales qui caractérisent ces cellules. Dans ce contexte, une étude détaillée des différents mécanismes de pertes qui limitent le rendement de ces cellules et les solutions exploités pour minimiser ces pertes sont aussi présentés et discutés. Enfin, nous avons énuméré les rendements obtenus pour les différentes générations des cellules solaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-
- [1] M. Abdelkader, "Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes", Thèse de Doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
- [2] D. Lincot, "Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique", Leçon Inaugurale Prononcée au Collège de France, Collège de France, 2022.
- [3] R. N. Castellano, "Solar panel processing", Archives contemporaines, 2010.
- [4] I. M. Dharmadasa, "Advances in thin-film solar cells", CRC Press, 2018.
- [5] T. Mambrini, "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2014.
- [6] Mathieu, Henry, et Hervé Fanet. "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 6^{ème} édition, Dunod, 2009.
- [7] A. Adaine, "Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN ", Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2018.
- [8] J. Piprek, "Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation : Fundamentals, Materials, Nanostructures, LEDs, and Amplifiers," Vol. 1. CRC Press, 2017.
- [9] M. Nicolai, "Modeling and Characterization of Semiconductor Devices for Energy Efficiency", Thèse de Doctorat, Université de bologna, 2018.
- [10] D. S. Ginley, & D. Cahen, "Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability", Cambridge university press, 2011.
- [11] G. P. Smestad, "Optoelectronics of solar cells", (Vol. 118). SPIE press, 2002.
- [12] D. Réaux, "Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (α -Si⁺ H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface ", Thèse de Doctorat, Université Paris Saclay (COMUE), 2017.
- [13] G. P. Smestad, "Optoelectronics of Solar Cells", Vol. 118, SPIE press, 2002.
- [14] J. Härkönen, "Processing of high efficiency silicon solar cells", Helsinki University of Technology, 2001.
- [15] D. Barakel, "Caractérisations des matériaux et des dispositifs pour le photovoltaïque", Thèse de Doctorat, IM2NP-Equipe OPTOPV, 2018.
- [16] X. Wang, & Z. M. Wang, "High-efficiency solar cells. Physics, materials, and devices", Springer Series in Materials Science, 190, 2014.
- [17] W. El-Huni, "Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V ", Thèse de Doctorat, Université Paris Saclay (COMUE), 2016.
-

- [18] A. Vauthelin, *"Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires"*, Thèse de Doctorat, Université Montpellier, 2018.
- [19] K. Mertens, *"Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice"*, John Wiley & Sons, 2018.
- [20] NREL. *"Best Research-Cell Efficiencies"*, 2021. Available from: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- [21] E. Giudicelli, *"Evaluation d'une filière technologique de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-V)-Sb pour applications aux très fortes concentrations solaires"*, Thèse de Doctorat, Université Montpellier, 2016.
- [22] SolarPower. Europe, *"Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026"*, Brussels, Belgium, 2022.
- [23] D. Amelot, *"Etudes des propriétés d'interfaces pour les cellules solaires de nouvelle génération"*, Thèse de Doctorat, Université Sorbonne, 2021.
- [24] F. Azzemou, *"Optimisation des performances des cellules solaires à base d'hétérojonctions de silicium"* Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, 2022.
- [25] A. Axelevitch, & G. Golan, *"Efficiency analysis for multijunction PV hetero-structures"*, *Photovoltaics: developments, applications and impact*. Nova Science, New York, 213-247, 2010.
- [26] M. Abderrezek, *"Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces"*, Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2015.
- [27] T. Soga, *"Nanostructured materials for solar energy conversion"*, Elsevier. (Ed.), 2006.
- [28] R. F. Pierret, *"Semiconductor Device Fundamentals"*, Addison-Wesley Publishing Company, 1996.
- [29] O. Nichiporuk, *"Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités"*, Thèse de Doctorat, Université de Lyon, INSA, 2005.
- [30] M. N. Grau, *"Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres"*, Thèse de Doctorat, Université de Lyon, INSA, 2012.
- [31] E. G. Mohamed, *"Cellules solaires multi-jonctions dupliquées pour le photovoltaïque à très haute concentration"*, Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, 2021.
- [32] G. Poulain, *"Procédés laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement"*, Thèse de Doctorat, Université de Lyon, INSA, 2012.
- [33] S. Almosni, A. Delamarre, Z. Jehl, D. Suchet, L. Cojocar, M. Giteau, & J. F. Guillemoles, *"Material challenges for solar cells in the twenty-first century : directions in emerging technologies"*, *Science and Technology of advanced MaTerialS*, 19(1), 336-369, 2018.
- [34] S. Collin, & A. Cattoni, *"Les cellules solaires ultrafines"*, *Photoniques*, (102), 44-48, 2020.

- [35] B. Zaidi, & C. Shekhar, "Thin Films Photovoltaics", Intechopen, 2022. ISBN 978-1-83969-907-8.
- [36] K. Louarn, "Etude et réalisation de jonctions tunnel à base d'hétérostructures à semi-conducteurs III-V pour les cellules solaires multi-jonction à très haut rendement", Thèse de Doctorat, Université de Paul Sabatier-Toulouse III, 2018.
- [37] J. Pastuszak, & P. Węgierek, "Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development", *Materials*, 15(16), 5542, 2022.
- [38] M. A. Green, E. D Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, & X. Hao, "Solar cell efficiency tables (Version 61)", *Progress in Photovoltaics : Research and applications*, 29(7), 657-667, 2022.
- [39] N. Kant, & P. Singh, "Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development", *Materials Today : Proceedings*, 56, 3460-3470, 2022.
- [40] J. A. Luceño-Sánchez, A. M. Díez-Pascual, & R. Peña Capilla, "Materials for photovoltaics: State of art and recent developments", *International journal of molecular sciences*, 20(4), 976, 2019.
- [41] K. I. Jayawardena, L. J. Rozanski, C. A. Mills, M. J. Beliatas, N. A. Nismy, & S. R. P. Silva, "Inorganics-in-Organics : recent developments and outlook for 4G polymer solar cells", *Nanoscale*, 5(18), 8411-8427, 2013.
- [42] M. A. Iqbal, M. Malik, W. Shahid, S. Z. U. Din, N. Anwar, M. Ikram, & F. Idrees, "Materials for Photovoltaics : Overview, Generations, Recent Advancements and Future Prospects", *Thin Films Photovoltaics*, 2022.
- [43] R. A. Marques Lameirinhas, J. P. N. Torres, & J. P. de Melo Cunha, "A photovoltaic technology review : history, fundamentals and applications", *Energies*, 15(5), 1823, 2022.
- [44] Y. Gong, Q. Zhu, B. Li, S. Wang, B. Duan, L. Lou, & H. Xin, "Elemental de-mixing-induced epitaxial kesterite/CdS interface enabling 13%-efficiency kesterite solar cells", *Nature Energy*, 7(10), 966-977, 2022.
- [45] D. K. Kumar, J. Kříž, N. Bennett, B. Chen, H. Upadhyaya, K. R. Reddy, & V. Sadhu, "Functionalized metal oxide nanoparticles for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs) : A review", *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 472-481, 2020.
- [46] Q. Gao, J. Yan, H. Li, J. Chen, X. Yang, Y. Bai, & J. Chen, "Commercial carbon nanotube as rear contacts for industrial p-type silicon solar cells with an efficiency exceeding 23%", *Carbon*, 202, 432-437, 2023.
- [47] Q. Gao, J. Yan, L. Wan, C. Zhang, Z. Wen, X. Zhou, & J. Chen, "High-Efficiency Graphene-Oxide/Silicon Solar Cells with an Organic-Passivated Interface", *Advanced Materials Interfaces*, 9(24), 2201221, 2022.

Chapitre II

CELLULE SOLAIRE A BASE DE SEMICONDUCTEUR III-V

II.1. Introduction

Le domaine de l'énergie solaire connaît un développement croissant et une demande constante de technologies plus efficaces pour la transformation de l'énergie solaire en électricité. Parmi les différents types de CS's, celles à base de matériaux semiconducteurs III-V se démarquent par des performances élevées et une large plage d'applications.

Dans ce chapitre, nous avons présentés les cellules solaires basées sur les matériaux III-V. ou dans un premier temps, nous avons donné de brèves définitions des différents paramètres et propriétés fondamentales des matériaux III-V qui composent les sous-cellules solaires à double jonction. Ceci est suivi par une section consacrée à l'évolution historique de la sous-cellule GaInP. Nous avons ensuite présenté les détails de la composition des structures de la sous-CSSJ GaInP fondamentales ainsi que ses performances. Enfin, nous avons décrit les structures des cellules à double jonction en utilisant un exemple démonstratif d'une cellule solaire basée sur des matériaux semiconducteurs GaInP et GaAs.

II.2. Matériaux semi-conducteurs III-V

L'utilisation des matériaux III-V est justifiée par leurs propriétés électroniques avantageuses qui les rendent adaptés à de nombreuses applications. Les semi-conducteurs composés binaires tels que GaAs, les ternaires comme $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ et $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, ainsi que les quaternaires tels que $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ sont largement utilisés dans le domaine des dispositifs optoélectroniques. Plus spécifiquement, le GaAs et le $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ sont des matériaux essentiels pour les couches supérieure et inférieure des cellules solaires à jonctions multiples [1]. L'efficacité des CSSJ's GaInP et GaAs, ainsi que des CSDJ's GaInP/GaAs, continue de s'améliorer grâce à l'optimisation de la qualité des matériaux et des procédés de fabrication.

Les alliages ternaires comme $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ présentent de très bonnes propriétés, permettent l'ajustement la largeur de la bande de gap, leur mobilité de porteurs de charges est très élevée et

leur constante de réseau est compatible pour la croissance d'épitaxie sur des substrats, par exemple de Silicium. La largeur de la bande de gap est très importante pour les applications optoélectroniques, tandis que, la mobilité des porteurs est importante pour les applications d'électronique de puissance [2].

Le diagramme présenté dans la Figure II.1 illustre la composition de tous les alliages ternaires ou quaternaires qui peuvent être déposés en couche mince sur un substrat binaire tel que le GaAs. Ce diagramme montre l'évolution de l'énergie de la bande de gap et du paramètre cristallin en fonction de la composition. Grâce à cette variabilité, les matériaux III-V offrent une grande diversité d'alliages, ce qui permet de moduler leurs propriétés électroniques pour différentes applications [3].

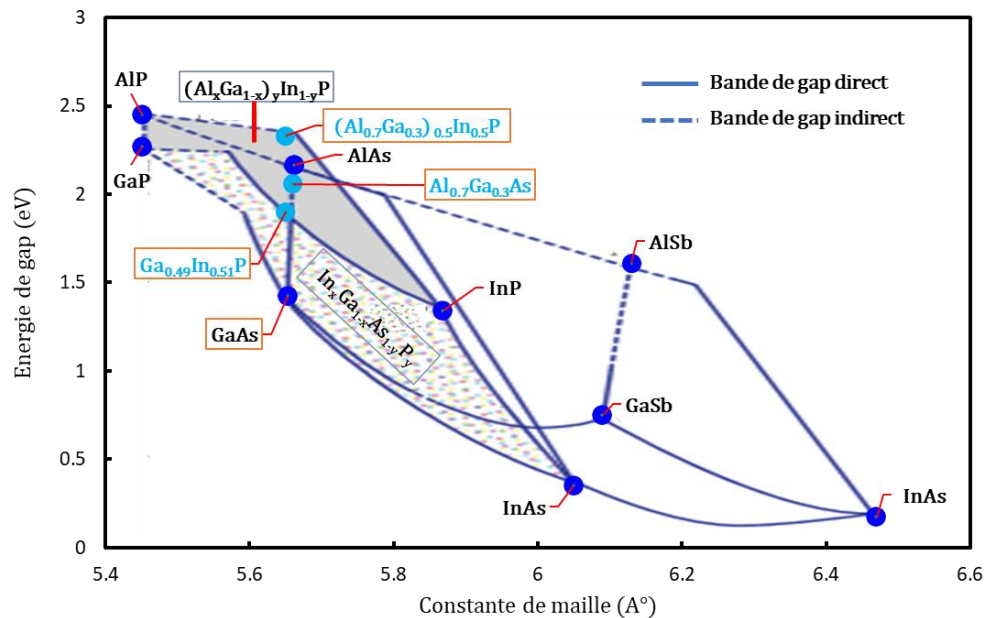


Figure II.1 Energie de bande de gap en fonction de constante de maille pour 9 composés binaires III-V [3].

II.2.1 Propriétés des matériaux semiconducteur binaire III-V

Les semi-conducteurs III-V (SC's III-V) se démarquent grâce à leurs propriétés électroniques exceptionnelles. Ils se caractérisent par une mobilité électronique très élevée, par exemple, le phosphore indium (InP) affiche une mobilité de $4600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. De plus, ils présentent une conductivité thermique supérieure par rapport au Silicium (Si), qui est actuellement le matériau le plus couramment utilisé dans le domaine des dispositifs microélectroniques. L'InP affiche une conductivité thermique de $0,70 \text{ W}/\text{cm}\cdot\text{K}$, tandis que le Si a une mobilité de $1200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ et une conductivité thermique de $0,15 \text{ W}/\text{cm}\cdot\text{K}$. De plus, la plupart des matériaux SC III-V ont généralement une bande de gap E_g plus large à température

ambiante par rapport au Si. Par exemple, dans le cas de l'InP, la bande E_g est d'environ 1,35 eV, ce qui est supérieur à la bande E_g du Si, qui est d'environ 1,11 eV. Le Tableau II.1 présente quelques paramètres intéressants pour les SC's III-V binaires à température ambiante [4].

Tableau II. 1 Propriétés importantes des éléments et des semiconducteurs binaires [5].

Semiconducteur		Constante de maille (Å)	Energie de gap (eV)	Type de gap	Mobilité (cm ² /V-s)		Constante diélectrique
					μ_n	μ_p	
Éléments	Ge	5.65	0.66	Indirect	3900	1800	16.2
	Si	5.43	1.12	Indirect	1450	505	11.9
III-V	AlSb	6.13	1.61	Indirect	200	400	12.0
	GaAs	5.65	1.42	Direct	9200	320	12.4
	GaP	5.45	2.27	Indirect	160	135	11.1
	GaSb	6.09	0.75	Direct	3750	680	15.7
	InAs	6.05	0.35	Direct	33000	450	15.1
	InP	5.86	1.34	Direct	5900	150	12.6
	InSb	6.47	0.17	Direct	77000	850	16.8

II. 2. 2 Propriétés de matériau semiconducteur ternaire GaInP et AlGaAs

Le matériau ternaire $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ est constitué des semi-conducteurs binaires GaP ($E_g = 2.26\text{eV}$ pour $x=1$) et InP ($E_g = 1.344\text{eV}$ pour $x=0$). Il présente une caractéristique intéressante : une bande de gap directe lorsque la fraction de gallium est inférieure à 0,74. En ajoutant de l'aluminium à ce matériau, l'alliage AlGaInP est obtenu, qui possède une bande interdite variant entre 1,43 et 2,2 eV tout en maintenant une interface de bonne qualité avec le GaAs [6]. Le Tableau II.2 résume les modèles physiques utilisés pour calculer les paramètres fondamentaux des matériaux $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ et $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Tableau II.2 Propriétés importantes des semiconducteur composés ternaires $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ et $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ à 300 K.

Paramètre	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.45 < x \leq 1$)
Energie de gap E_g (eV)	$E_g(x) = 1.35 + 0.73x + 0.7x^2$ [7]	$E_g(x) = 1.9 + 0.125x + 0.143x^2$ [8]
Constante de maille (Å°)	$a(x) = 5.86 - 0.41x$ [9]	$a(x) = 5.6533 + 0.0078x$ [8]
Permittivité diélectrique ϵ_r	$\epsilon_r(x) = 12.5 - 1.4x$ [10]	$\epsilon_r(x) = 13.18 - 2.9x$ [10]
Affinité électronique χ (eV)	$\chi(x) = 4.38 - 0.58x$ [10]	$\chi(x) = 3.64 - 0.14x$ [6]
Densité effective d'états N_c (cm ⁻³) et N_v (cm ⁻³)	$N_c = 2.5 \times 10^{19} (0.66 + 0.13x)^{3/2}$ $N_v = 2.5 \times 10^{19} (0.6 + 0.19x)^{3/2}$ [11]	$N_c = 2.5 \times 10^{19} (0.85 + 0.14x)^{3/2}$ $N_v = 2.5 \times 10^{19} (0.51 - 0.25x)^{3/2}$ [6]

II. 2. 3 Propriétés optiques

Les deux paramètres les plus critiques pour la modélisation avancée des CS's sont les indices optiques (n) et (k) propres au matériau. [10]. En raison de la difficulté à obtenir les paramètres optiques pour de nombreux matériaux ternaires et quaternaires, une bonne approximation de n et k peut être obtenue en interpolant les données de composés plus simples. Grâce à ces deux paramètres, n et k , nous permettent de calculer les deux coefficients d'absorption (α) et de réflexion normale à l'interface matériau/vide (R) qui sont données par les équations (II.1) et (II.2) [12] :

$$\alpha = 4\pi k / \lambda \quad \text{Où} \quad \lambda = \frac{1.2398}{E_g} (\mu\text{m}) \quad (\text{II.1})$$

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (\text{II.2})$$

Les propriétés optiques des matériaux GaInP , AlGaAs et AlGaInP illustrées dans les Figures II.2., II.3. et II.4. sont déterminées à l'aide du modèle d'Adachi [2][10] [13-15].

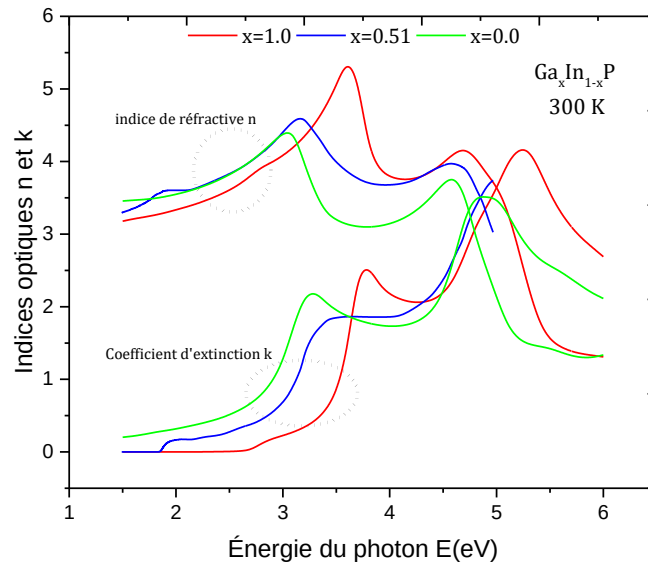


Figure II.2 Spectre des indices optiques $n(E)$ et $k(E)$ du matériau $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$.

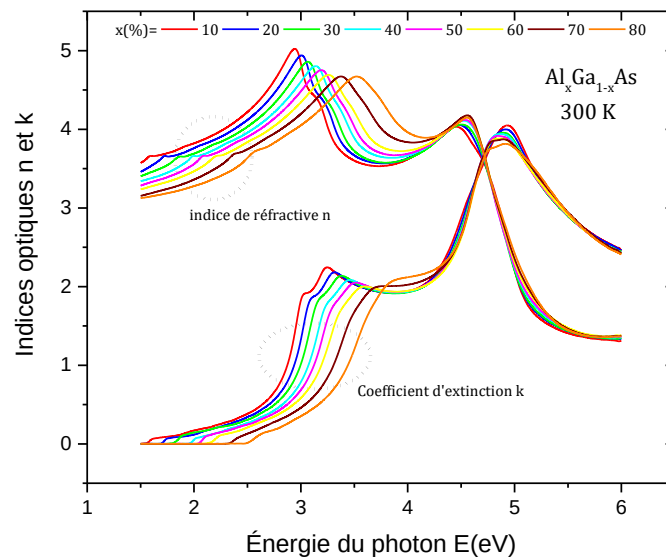


Figure II.3 Spectres des indices optiques $n(E)$ et $k(E)$ du matériau $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

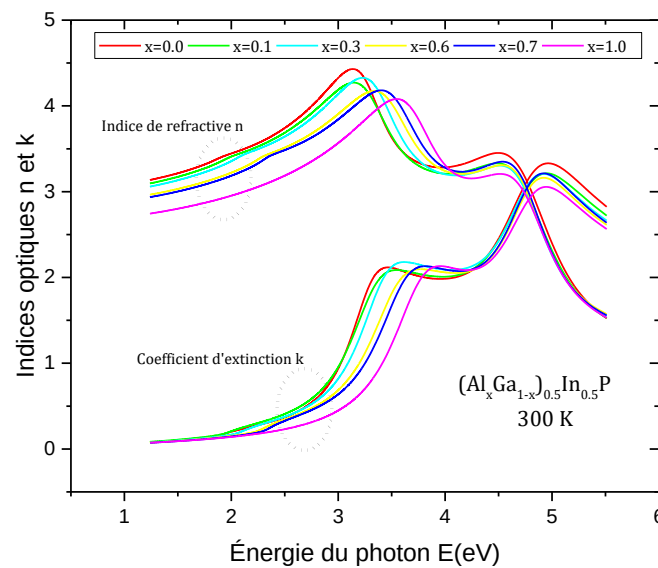


Figure II.4 Spectres des indices optiques $n(E)$ et $k(E)$ du matériau $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$.

II. 2. 4 Résistivité thermique des alliages GaInP et AlGaAs

La résistivité thermique d'un matériau mesure sa capacité à résister à la conductivité thermique, c'est-à-dire à la propagation de la chaleur à travers celui-ci. Dans le cas des matériaux GaInP et AlGaAs, la variation de la résistivité thermique en fonction de la concentration (x) de Ga est représentée dans les Figure II.2a et II.2b [11] [16]. On peut observer que le maximum de la résistivité thermique est atteint lorsque $x \approx 0.49$. Cette propriété fait du matériau GaInP un candidat potentiellement intéressant dans les applications spatiales et les systèmes à

concentrateurs, où une bonne isolation thermique ou une limitation de la transmission de chaleur peut être nécessaire.

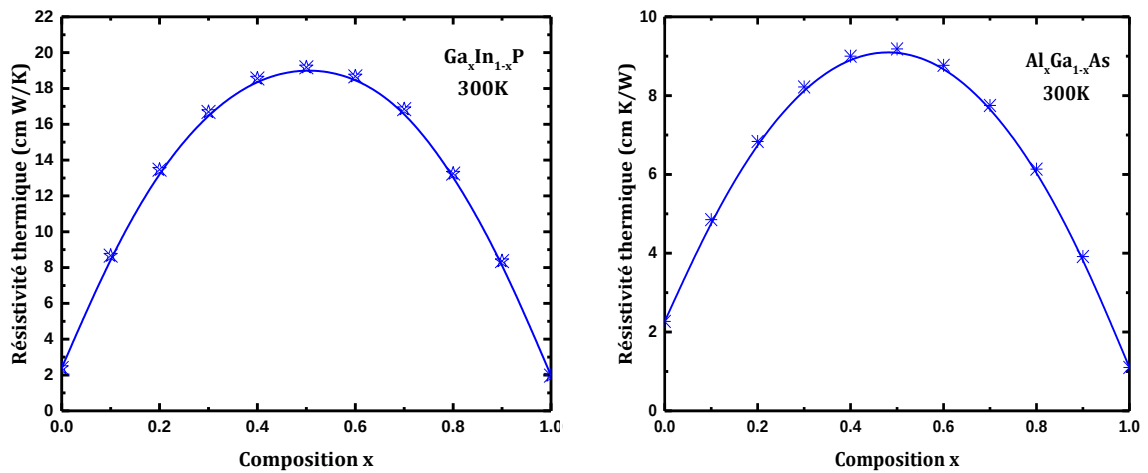


Figure II.5 Variation de la résistivité thermique en fonction de composition x dans les alliages $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ et $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ à 300K.

II.3. Pourquoi la cellule à double jonctions

En réalité, les cellules solaires à jonction simple présentent des limites fondamentales qui affectent leur efficacité. Pour surmonter cet inconvénient, il est essentiel de maximiser la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la densité de courant de court-circuit (J_{cc}).

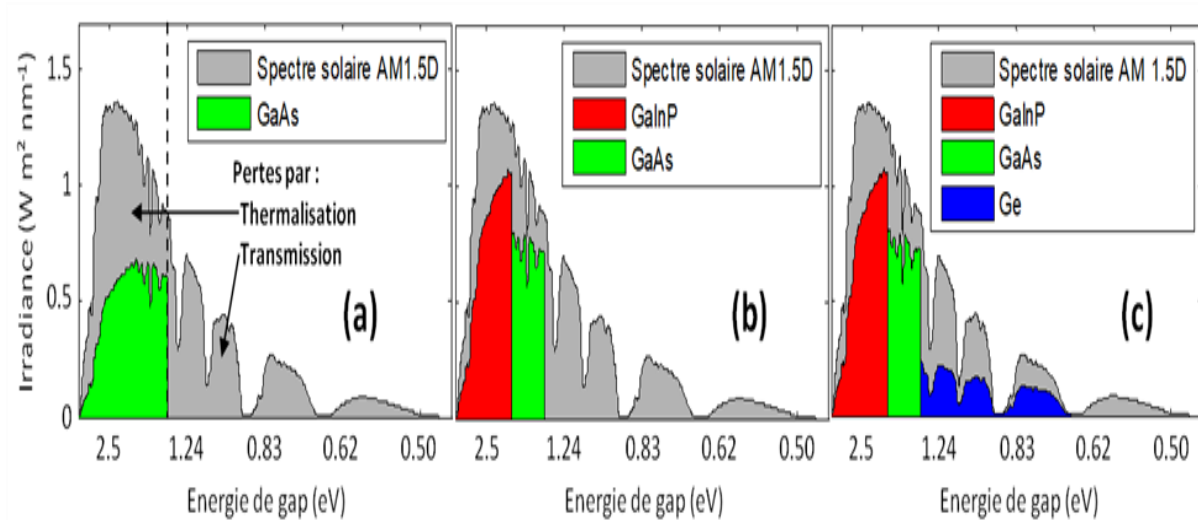


Figure II.6 Proportion d'énergie du spectre solaire AM1.5 convertible par des cellules en GaAs, GaInP/GaAs et GaInP/GaAs/Ge (en couleurs) et pertes par transmission et par thermalisation [17].

Cependant, lorsque l'énergie des photons (E_{ph}) dépasse la bande de gap du matériau (E_g), cela entraîne une augmentation des pertes, ce qui détériore l'efficacité de la cellule solaire. Les

sources principales de pertes identifiées dans l'étude menée par Masden et Backus sur une cellule solaire simple jonction **GaAs** sont représentées dans la Figure II.6.a. Ces pertes résultent principalement d'un excès ou d'une insuffisance de l'énergie E_{ph} , entraînant des pertes par thermalisation ou par transmission [17].

En 1955, E.D. Jackson a développé une approche novatrice qui a conduit à la création des cellules solaires à multi-jonctions. Les premières expériences pour valider cette approche ont été menées en 1978. L'idée principale est d'empiler plusieurs cellules solaires avec des bandes interdites décroissantes, chacune convertissant efficacement une partie spécifique du spectre solaire. Cette méthode permet d'éviter les pertes dues à la thermalisation des photons à haute énergie, qui dégrade la tension V_{co} , ainsi que des pertes engendrées par la transmission des photons à faible énergie, ce qui dégrade le courant I_{cc} . (Figure II.6.b. et II.6.c).

II.4. Description des cellules multi-jonctions

Généralement, les homo-jonctions **p-n** sont utilisées comme jonctions photo-actives dans les CS's à multiples jonctions III-V. Les sous-cellules sont connectées par des jonctions tunnel. Des hétérojonctions de même type (isotypes) sont formées des deux côtés de la jonction **p-n** afin d'éviter la recombinaison photo-active aux interfaces.

Dans cette section, nous examinons le fonctionnement d'une CSDJ en analysant l'importance des différentes couches qui composent chaque sous-CS en se basant sur les cellules solaires à simple jonction **GaInP** (CSSJ).

II.4.1. Histoire et développement de la sous-CS GaInP

Les cellules solaires à simple jonction **GaInP**, initialement proposées par T. Takamoto en 1994 (Figure II.7.a), ont montré une efficacité (η) de 17,4% en utilisant la méthode de dépôt chimique en phase vapeur organométallique (MOCVD) avec des épaisseurs d'émetteur et de base de 0,05 μm et 1,5 μm respectivement [19].

En 1997, Ming-Ju Yang a fabriqué un CSSJ **GaInP** sur des substrats en **GaAs** et en **Si** par MOCVD (Figure II.7.b) permettant un rendement record de 18,5% à AM1.5 avec une épaisseur de dispositif totale de 2,38 μm [20]. En 2009, J. W. Leem a optimisé l'épaisseur de la base de la sous-CSSJ **GaInP** supérieure (Figure II.8.a), atteignant une conversion de 13,34% avec une épaisseur de cellule solaire de 0,91 μm (Figure II.8.a) [21]. En 2011, Shulong Lu a utilisé une technique d'épitaxie par faisceau moléculaire (MBE) à l'état solide pour concevoir une cellule **GaInP** avec une fenêtre **AlInP**, une couche de champ de surface arrière (BSF) en **GaInP** et une couche tampon en **GaAs** (Figure II.8.b).

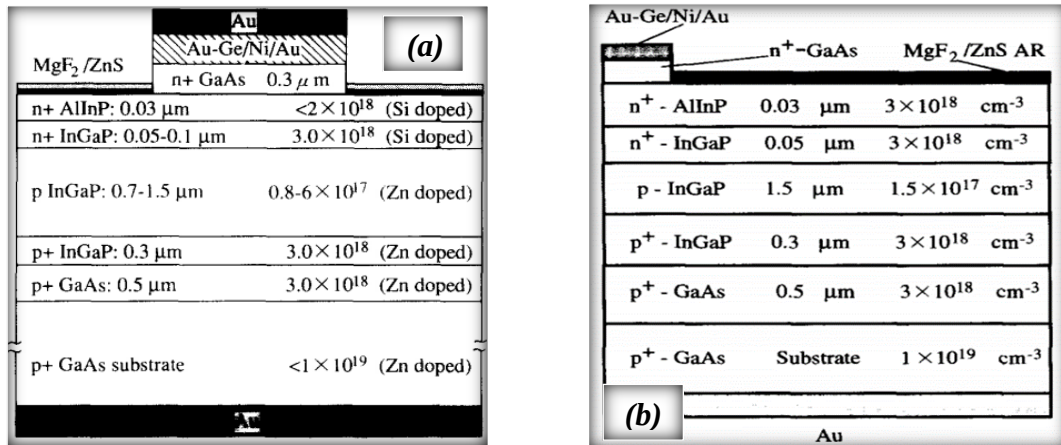


Figure II.7 Coupe schématique transversale d'une cellule en GaInP proposée par : (a) T. Takamoto [18], (b) Ming-Ju Yang [19].

L'épaisseur totale de cette cellule est de **0,93 μm** et son rendement de conversion est de **16,4%** obtenu à une concentration de 1 soleil et une masse d'air de **AM1,5G** [18]. En 2013, J. F. Geisz a développé une hétérojonction arrière **GaInP** par épitaxie en phase vapeur organométallique à pression atmosphérique (**MOVPE**) en atteignant une efficacité de **20,08%** avec une épaisseur totale de **1 μm** [22]. En 2015, P.P. Nayak a atteint une efficacité de **21,85%** à 1 soleil et **AM1.5G** en utilisant une double couche de **BSF** en **AlGaInP** et une épaisseur totale de cellule de **0,68 μm** pour la cellule supérieure [23].

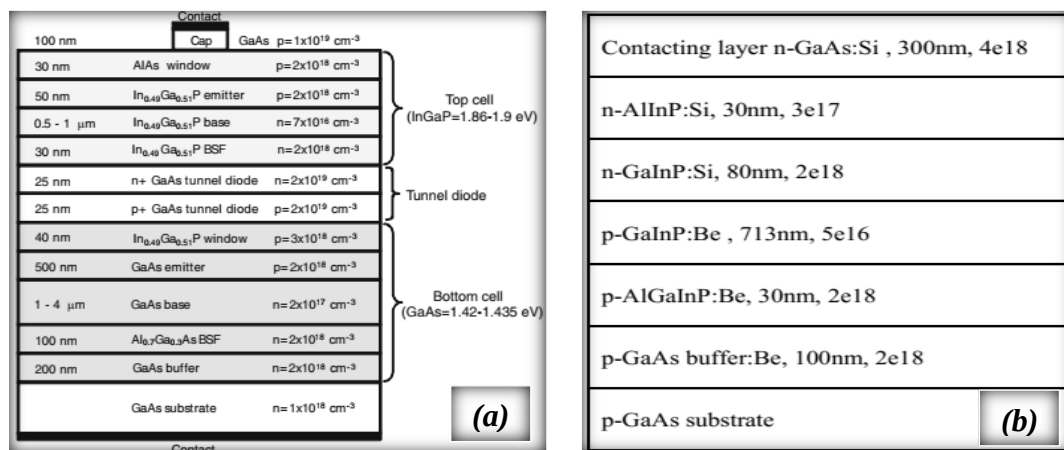


Figure II.8. Schéma de structure des sous-cellules solaires étudiées : (a) DJ GaInP/GaAs par J. W. Leem [20], (b) SJ GaInP par Shulong Lu [21].

En 2018, A. Benlekhdid a reporté une efficacité de conversion de **18,55%** pour une CS **GaInP**. Pour atteindre ce résultat, il a optimisé les deux couches (fenêtre et tampon) en **AlGaAs**,

ainsi que la couche BSF en GaInP en utilisant l'outil Atlas Silvaco. L'épaisseur totale de cette structure est de $0,86 \mu\text{m}$ [24].

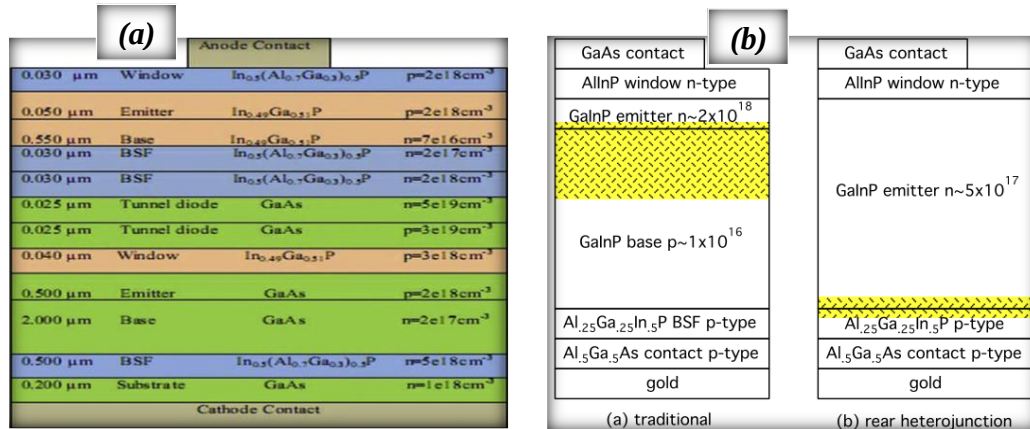


Figure II.9 Diagramme schématique (a) : DJ GaInP/GaAs par P. P. Nayak [22],
(b) CSSJ GaInP par J. F. Geisz [23].

. En 2018, Kuan W. K. Chee a optimisé l'épaisseur et le dopage de la couche de base en comparant les CSSJ's aux CSDJ's en termes d'efficacité. Son étude a montré que la sous-cellule supérieure (GaInP) avait une efficacité de 17,89% sous un éclairement AM0, avec une épaisseur de dispositif de $0,66 \mu\text{m}$ [25]. Récemment, le laboratoire national de l'énergie renouvelable américain (NREL) a démontré un rendement élevé de 22,00% pour une cellule solaire GaInP mesurée sous le spectre global AM1.5 (1000 W/m²) à 25°C [26].

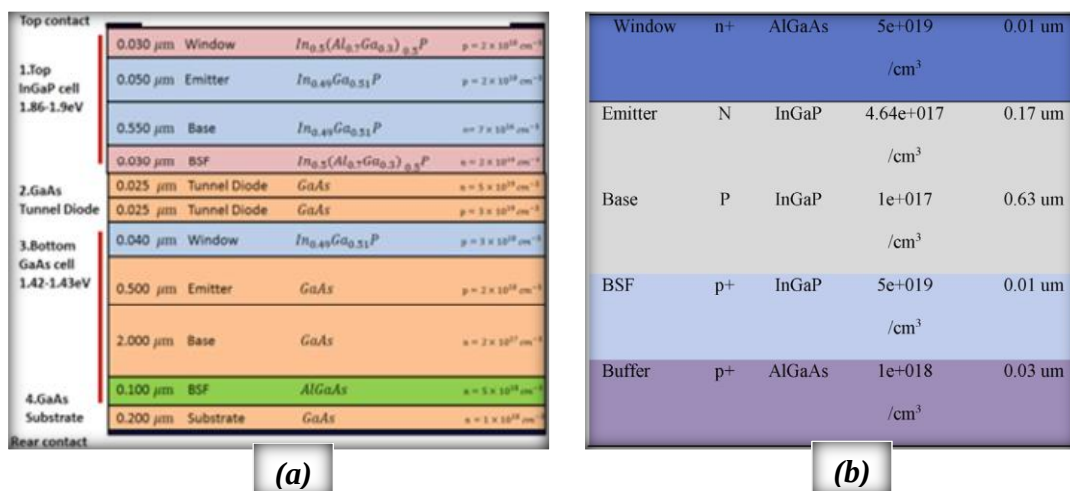


Figure II.10 Diagramme schématique (a) : SCDJ GaInP/GaAs par W. A. Chee [24],
(b) : SJ GaInP par A. Benlekhdim [25].

De plus, en 2020, M. Benaïcha a utilisé une couche de GaInP comme cellule supérieure dans une cellule solaire monolithique à jonctions multiples GaInP/Si avec une épaisseur de $1,07$

μm et qui donne une efficacité de 20,99% [27]. En outre, Manish Verma a obtenu un rendement de 21,59% pour une CSSJ GaInP avec un BSF double couche à spectre AM1.5G et avec une épaisseur de 0,725 μm [28].

Les sous-cellules solaires GaInP ont connu des progrès significatifs en termes d'efficacité de conversion. Les chercheurs ont utilisé des techniques de dépôt telles que le EPVOM et le MBE, ainsi que des optimisations par simulation pour réduire les pertes de recombinaison. Ces optimisations ont impliqué l'utilisation de couches de passivation à l'avant et à l'arrière, comme la fenêtre, BSF et le tampon. Ces avancées ont un impact considérable sur l'amélioration des cellules tandem à base de GaInP.

II.4.2. Structure de sous-CSSJ à base de semiconducteur III-V

Une structure classique de sous-CS à base de semiconducteurs III-V est présentée en Figure II.3. La structure de cette sous-CS est principalement définie par les deux couches, l'émetteur et l'absorbeur, qui forment la jonction PN. En plus, il y a une couche fenêtre (window) située à l'avant de la cellule, ainsi qu'une couche de champ de surface arrière BSF (Back Surface Field) qui assure la passivation de la face arrière [17].

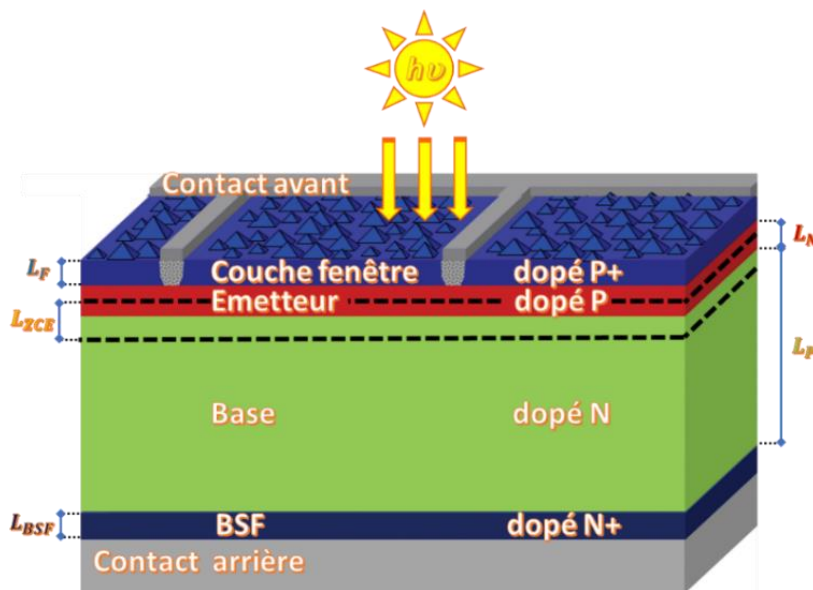


Figure II.11 Structure classique d'une sous-CS à base de semi-conducteurs III-V.

Comme illustré dans la Figure II.12, les barrières de potentiel des deux côtés de la jonction PN empêchent la recombinaison des porteurs minoritaires aux contacts et aux jonctions tunnel. D'un autre côté, les couches de barrière ne doivent pas limiter le transport des porteurs majoritaires. La barrière de potentiel à l'avant est appelée fenêtre à large bande interdite, tandis que la barrière à l'arrière est appelée champ de surface arrière (BSF) [17] [29].

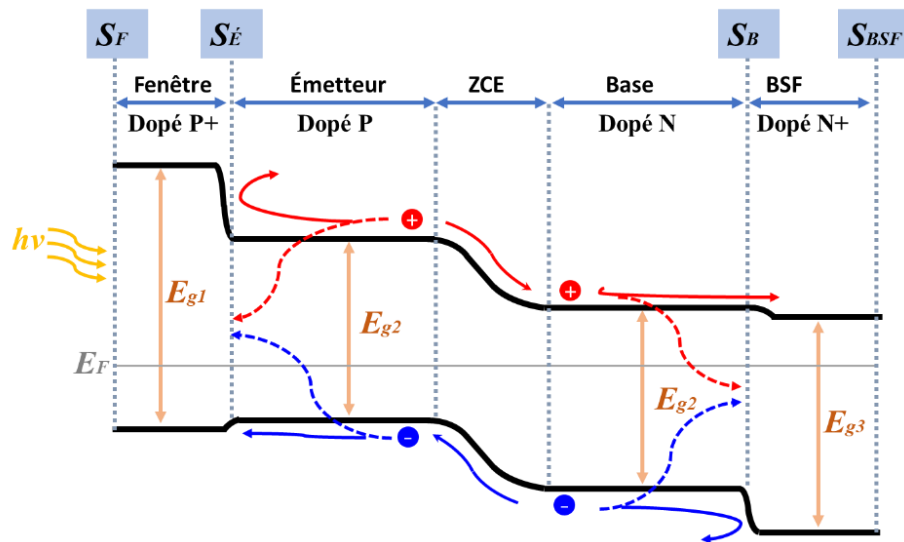


Figure II.12 Schéma du diagramme des bandes d'une sous-CSSJ basé sur la structure présentée dans la Fig II.6.

Avec :

S_F , S_E , S_B et S_{BSF} sont des notations qui expriment les vitesses de recombinaison présentes au niveau des interfaces., ZCE est la zone de charge d'espace et E_F est le niveau de Fermi.

L'objectif principal de la passivation, que ce soit pour les interfaces avant ou arrière de la jonction **PN** des cellules à base de semiconducteurs **III-V**, est de réduire de manière significative les taux de recombinaison aux interfaces, identifiés par les notations S_E et S_B . Cette approche diffère notablement de celle adoptée pour les cellules à base de **silicium**. Dans les technologies axées sur le silicium, les surfaces sont passivées au moyen de diélectriques tels que le **SiO2** ou le **SiNx**. En contraste, pour les cellules **III-V**, une approche distincte est mise en œuvre : on emploie des couches caractérisées par des propriétés bien spécifiques, telles qu'une large bande interdite d'énergie, un dopage plus élevé et un accord de maille approprié, pour servir de couches **BSF** (Back Surface Field) ou fenêtre.

L'optimisation de ces couches au sein de la structure de la sous-cellule **III-V** repose sur trois points clés. En premier lieu, Une discontinuité est requise dans les bandes des porteurs minoritaires, créant ainsi une barrière de potentiel qui permet aux porteurs minoritaires d'éviter les interfaces où leur recombinaison se produirait. Ensuite, il est nécessaire de parvenir à un ajustement adéquat de la structure cristalline (par un accord de maille) entre les couches **Fenêtre**, **BSF** et la jonction **PN**. Cette concordance vise à réduire les défauts aux interfaces et à minimiser les taux de recombinaison. Enfin, il est crucial que la couche **Fenêtre** soit transparente à la jonction **PN**, tandis que le **BSF** doit faciliter le passage de la lumière absorbée par la sous-CS inférieure.

II.4.3. Performances d'une sous-CSSJ GaInP

Le critère d'évaluation des sous-cellules repose sur leur rendement quantique (QE), qui permet d'évaluer leur capacité d'absorption. Cette évaluation repose sur deux mesures : le rendement quantique interne (EQI), représentant le rapport entre le nombre de porteurs de charge collectés par la CS et le nombre de photons qui y sont absorbés, et le rendement quantique externe (EQE), qui se calcule en comparant le nombre de porteurs de charge collectés ou absorbés par la CS au nombre de photons incidents.

Le rendement quantique externe total (EQE_{tot}) d'une cellule idéale, caractérisée par une épaisseur totale (d_{ZCE}) couvrant les trois zones de la jonction PN (d_E , d_{ZCE} et d_B), est calculé en se basant sur la somme des rendements quantiques externes individuels (EQE). Cette somme englobe le rendement quantique de la base (EQE_{Base}), le rendement quantique de l'émetteur (EQE_{Émetteur}) ainsi que le rendement quantique de la zone de déplétion (EQE_{Déplétion}), conformément aux équations suivantes [30-31] :

$$EQE_{Tot} = EQE_{Émetteur} + EQE_{Déplétion} + EQE_{Base} e^{-\alpha(d_E + d_{ZCE})} \quad (II.3)$$

$$EQE_{Émetteur} = \frac{\alpha L_E}{(\alpha L_E)^2 - 1} \left[\frac{l_e + \alpha L_E e^{(-\alpha d_E)} \times [l_e \cosh(\beta_e) + \sinh(\beta_e)]}{\cosh(\beta_e) + l_e \sinh(\beta_e)} - \alpha L_E e^{(-\alpha d_E)} \right] \quad (II.4)$$

$$EQE_{Déplétion} = [1 - e^{(-\alpha d_{ZCE})}] e^{(-\alpha d_E)} \quad (II.5)$$

$$EQE_{Base} = \frac{\alpha L_B}{(\alpha L_B)^2 - 1} \left[-\frac{(\alpha L_B - l_b) e^{(-\alpha d_B)} + l_b \cosh(\beta_b) + \sinh(\beta_b)}{\cosh(\beta_b) + l_b \sinh(\beta_b)} + \alpha L_B \right] \quad (II.6)$$

$$\beta_e = \frac{d_E}{L_E}, \quad \beta_b = \frac{d_B}{L_B}, \quad l_b = \frac{q S_B L_B}{k T \mu_B} \quad \text{et} \quad l_e = \frac{q S_E L_E}{k T \mu_E} \quad (II.7)$$

Où $\mu_{B(E)}$, $L_{B(E)}$ et $S_{B(E)}$ représentent respectivement : la mobilité, la longueur de diffusion et la vitesse de recombinaison en surface pour les porteurs minoritaires dans la Base (Émetteur), T est la température absolue. d_E , d_{ZCE} et d_B sont les épaisseurs de la Base, de l'Émetteur et de la zone de déplétion respectivement.

La relation qui exprime la dépendance de l'EQE_{Tot} par rapport à l'épaisseur totale du dispositif $d_{Tot} = d_E + d_{ZCE} + d_B$ est donnée par :

$$EQE_{Tot}(\lambda) = 1 - e^{[-\alpha(\lambda) d_{Tot}]} \quad (II.8)$$

La densité de courant J_{cc} est établie en fonction du rendement quantique EQE et du flux de photons du spectre (ϕ_{inc}) à AM1.5G, comme exprimé dans l'équation (II.9) :

$$J_{cc} = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} EQE_{tot}(\lambda) \phi_{inc}^{AM1.5G}(\lambda) d\lambda \quad (II.9)$$

Où q est la charge élémentaire (e^-), λ_1 est la longueur d'onde de coupure du spectre solaire et λ_2 est la longueur d'onde de coupure de GaInP déterminée par le coefficient d'absorption α , et elle est approximativement égale à hc/E_g , où E_g est le gap d'énergie de GaInP [32].

II.4.4 Structure d'une CSDJ GaInP/GaAs

D'après l'étude précédente des sous-CSSJ, il apparut que ces dernières ne permettent pas une exploitation optimale du spectre solaire. En effet, une partie de ce spectre n'est pas efficacement exploitée pour générer des paires ($e^- - h^+$), car les photons avec une énergie supérieure au gap perdent leur excès d'énergie sous forme de chaleur. Par conséquent, la réponse photovoltaïque des cellules à simple jonction est limitée. Pour remédier à cet inconvénient, une solution envisagée consiste à utiliser des CS's avec plusieurs jonctions où le gap de chaque jonction est différent. Ces jonctions sont connectées ensemble avec une diode à effet tunnel p^+/n^+ . Cette configuration permet d'absorber progressivement le spectre solaire sur une plus large gamme de longueurs d'onde, améliorant ainsi l'efficacité globale de la conversion photovoltaïque [5].

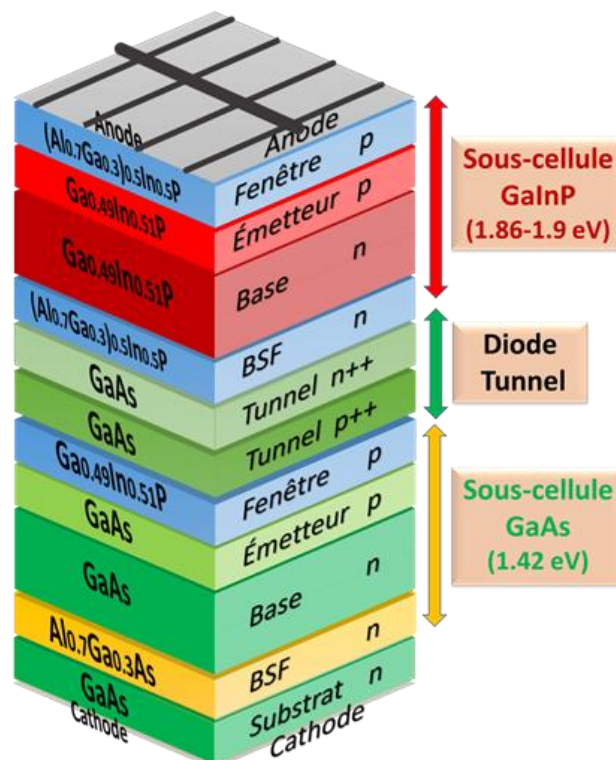


Figure II.13 Schémas de structure de la CSDJ GaInP/GaAs étudiée par W. K. Chee [25].

Dans cette section, nous prenons comme exemple une CSDJ GaInP/GaAs , étudiée par W. K. Chee et représentée dans la Figure II.8 [25]. L'étude de cette cellule examine l'effet de plusieurs paramètres, tels que l'épaisseur de la couche de base, la concentration de dopage de base, la température de jonction, l'épaisseur de la couche de BSF et le matériau de jonction tunnel. Les CSDJ's en GaInP/GaAs sont composées de plusieurs couches différentes (comprenant généralement plus de 11 couches), avec une composition variée et de nombreuses interfaces distinctes.

La Figure III.13 présente la structure d'une cellule solaire tandem monolithique [25]. Un matériau n-type GaAs , dont la constante de réseau est très proche de celle de l' AlGaAs et du $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$, est utilisé comme substrat. La jonction supérieure est constituée de GaInP ($E_g = 1.9 \text{ eV}$), capable d'absorber les photons ayant une énergie $h\nu > 1.9 \text{ eV}$. La jonction inférieure, quant à elle, est une jonction p-n de GaAs ($E_g = 1.42 \text{ eV}$), capable d'absorber les photons ayant une énergie comprise entre $1.9 \text{ eV} > h\nu > 1.42 \text{ eV}$. Une jonction tunnel n+-p+ de GaAs est placée entre les jonctions supérieure et inférieure pour connecter les sous-cellules. Où l'effet tunnel, effet quantique, est exploité pour le transfert de porteurs de charge à travers une barrière de potentielle relativement très étroite de l'ordre de quelques nanomètres [5] [33].

Sous la jonction supérieure, on trouve une couche de n- AlGaInP formant une jonction haute-basse n- $\text{AlGaInP}/\text{n-GaInP}$, tandis qu'une couche de n- GaInP est située sous la jonction inférieure pour former une jonction haute-basse n- $\text{GaInP}/\text{n-GaAs}$. Ces couches agissent également comme un "Champ de Surface Arrière", comme mentionné précédemment.

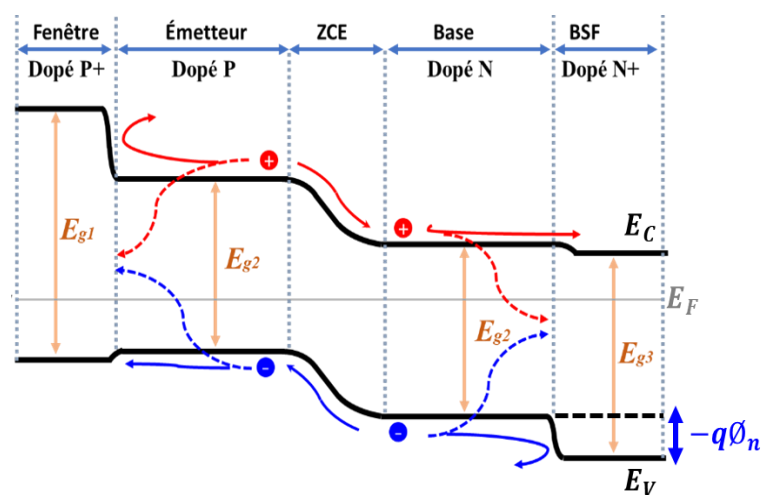


Figure II.14 Diagramme des bandes d'énergie de la sous-CSDJ GaInP/GaAs .

La barrière d'énergie potentielle $q\phi_n$ du champ de surface arrière peut être plus élevée pour les hétérojonctions que pour les homo-jonctions n-n+ (Figure II.14), ce qui dirige les porteurs minoritaires (trou) vers la région de faible bande interdite de la jonction haute-basse.

Les sous-CS,s possèdent des fenêtres en haut. Ces fenêtres sont composées de fines couches de matériaux semi-conducteurs à large bande interdite, du **p-AlGaInP** pour la sous-CS Top et du **p-GaInP** pour la sous-CS Bottom, permettant à la lumière solaire d'atteindre le matériau à bande interdite étroite avec peu de perte. De plus, ces couches de fenêtre peuvent passiver les défauts de surface normalement présents dans une cellule homo-jonction, surmontant ainsi la recombinaison de surface et améliorant l'efficacité de la CS. La couche de fenêtre est généralement fortement dopée [5].

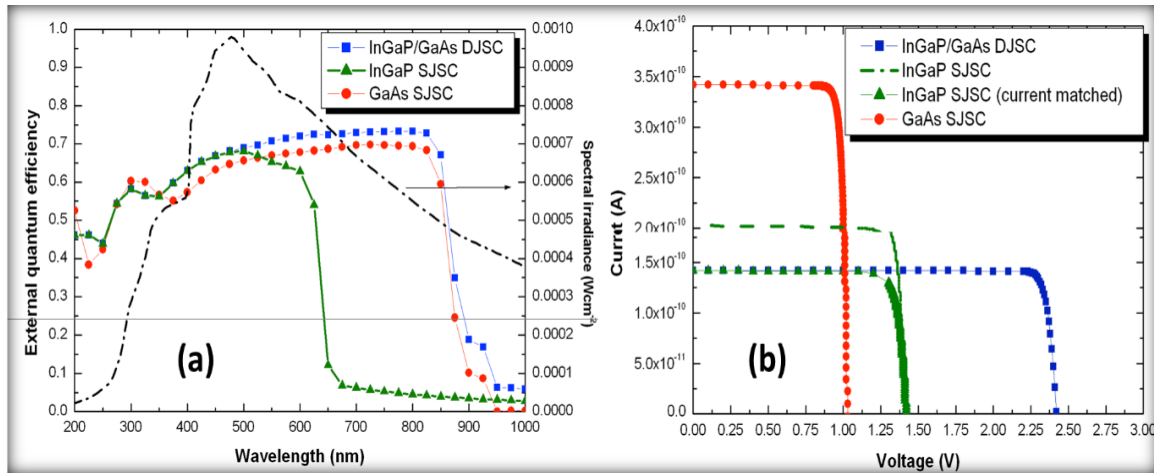


Figure II.15 Efficacités quantiques externes et caractéristiques courant-tension des CSSJ's GaAs, SJSC GaInP et CSDJ GaInP/GaAs étudiée par K. W. Chee [25].

Dans cette étude, K. W. Chee a examiné et analysé différents aspects liés à l'optimisation de l'efficacité des **CSDJ's**. Des modèles de référence ont été établis pour déterminer l'épaisseur optimale de la couche de base et la concentration de dopage. Des comparaisons ont été réalisées entre les **CSSJ's** à base de **GaInP** ou de **GaAs** et les **CSDJ's** à base de **GaInP/GaAs** afin d'évaluer leurs performances en termes d'efficacité de conversion photovoltaïque, de réponse spectrale (Fig II.5), de densité de courant de court-circuit et de tension de circuit ouvert (Fig II.5.b). Selon cette étude, l'épaisseur optimale de la couche de base en **GaAs** pour les **CSSJ's** en **GaAs** et les **CSDJ's** en **GaInP/GaAs** a été déterminée à **3 μm** , tandis que la concentration de dopage optimale est d'environ **$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$** .

Tableau II.3 Caractéristiques des cellules solaires obtenues par K. W. Chee [25].

Type de cellule	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF (%)	η (%)
CSSJ GaInP	20.28	1.41	85.54	17.89
CSSJ GaAs	34.18	1.02	88.67	22.61
CSDJ GaInP/GaAs	-	-	-	32.4

Les CSSJ's en GaAs et en GaInP ont atteint une efficacité maximale de conversion de puissance de 22,6% et 17,9%, respectivement, en accord avec leurs bandes interdites respectives. Les DJSC's en GaInP/GaAs ont démontré une efficacité supérieure à 23,1% grâce à une exploitation plus avantageuse du spectre solaire. Cette efficacité peut être portée à au moins 32,4 % en utilisant AlGaInP comme matériau de couche BSF et à 25,4 % en utilisant GaInP comme matériau de diode de jonction tunnel.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous analysons les paramètres et les propriétés fondamentales des matériaux III-V constituant les sous-cellules solaires à double jonction. Par la suite, nous explorons les cellules solaires basées sur les matériaux III-V. Nous retraçons l'évolution historique de la sous-cellule GaInP et nous examinons les détails de la composition de leurs structures fondamentales ainsi que leurs performances. A la fin de ce chapitre, nous présentons les structures des cellules à double jonction en utilisant un exemple d'une cellule solaire basée sur les matériaux GaInP et GaAs.

 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE II

- [1] E. Ochoa-Martínez, L. Barrutia, M. Ochoa, E. Barrigón, E. Garcia, I. Rey-Stolle & M. Gabás, "Refractive indexes and extinction coefficients of n-and p-type doped GaInP, AlInP and AlGaInP for multijunction solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 388, 2018.
- [2] F. Dimroth et S. Kurtz, "High – Efficiency Multijunction Solar Cells", *MRS bulletin*, 32(3), 230-235, 2007.
- [3] X. Blot, "Réalisation, caractérisation et modélisation de collages de matériaux III-V pour cellules photovoltaïques à concentration", *Thèse de doctorat, Université de Grenoble alpes*, 2015.
- [4] P. C. Rakotoarimanana, "Ingénierie de surface maîtrisée à l'échelle nanométrique de films de type polyphosphazène comme support de passivation sur InP", *Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay*, 2021.
- [5] S. M. Sze, M. K. Lee, "Semiconductor Devices : Physics and Technology", 3rd Edition, John Wiley & Sons, INC, 2012. ISBN 978-0470-53794-7
- [6] A. Mahfoud, "Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement ", *Thèse de Doctorat, Université de Sétif*, 2015.
- [7] G. B. Stringfellow, "The importance of lattice mismatch in the growth of $Ga_x In_{1-x}P$ epitaxial crystals", *Journal of Applied Physics*, 43(8), 3455-3460, 1972.
- [8] S. Adachi, "GaAs, AlAs, and $Al_x Ga_{1-x} As$: Material parameters for use in research and device applications", *Journal of applied physics*, 58(3), R1-R29, 1985.
- [9] F. Djaafar, "Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques" *Thèse de doctorat, Université de USTOMB*, 2018.
- [10] Atlas User's Manual, *DEVICE SIMULATION SOFTWARE*, Silvaco, Inc, Santa Clara, CA 95054, Août 2016.
- [11] Y. A. Goldberg, "Gallium indium phosphide ($Ga_x In_{1-x}P$) ", *Handbook Series on Semiconductor Parameters : Volume 2 : Ternary and Quaternary III-V Compounds*, 37-61, 1996.
- [12] S. Adachi, " Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors Numerical Data and Graphical Information", *Department of Electronic Engineering Gunma University Kiryu-shi, Gunma 376-8515, Japan*, 1st edition 1999.
- [13] D. E Aspnes et A. A. Studna, "Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV", *Physical review B*, 27(2), 985, 1983.
- [14] O. J. Glembocki et K. Takarabe, "Aluminum gallium arsenide ($Al_x Ga_{1-x} As$)", *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, 513, 1997.

- [15] M. Schubert, V. Gottschalch, C. M. Herzinger, H. Yao, P. G. Snyder, & J. A. Woollam, "Optical constants of $Ga_x In_{1-x} P$ lattice matched to GaAs", *Journal of Applied Physics*, 77(7), 3416-3419, 1995.
- [16] Y. A. Goldberg, "ALUMINIUM GALLIUM ARSENIDE ($Al_x Ga_{1-x} As$)", *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, Vol. 2 : Ternary and Quaternary Iii-v Compounds, 43(F43m), 1, 1996.
- [17] A. Vauthelin, "Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires", *Thèse de doctorat, Université de Montpellier*, 2018.
- [18] T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita, M. Ohmori, "Structural optimization for single junction InGaP solar cells", *Solar energy materials and solar cells*, 35, 25, 1994.
- [19] M. J. Yang, M. Yamaguchi, T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita, M. Ohmori, "Photoluminescence analysis of InGaP top cells for high-efficiency multi-junction solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 45(4), 331, 1997.
- [20] S. Lu, L. Ji, W. He, P. Dai, H. Yang, M. Arimochi, M. Ikeda, "High-efficiency GaAs and GaInP solar cells grown by all solid-state molecular-beam-epitaxy", *Nanoscale research letters*, 6(1), 1, 2011.
- [21] J. W. Leem, Y. T. Lee, J. S. Yu, "Optimum design of GaInP/GaAs dual-junction solar cells with different tunnel diodes", *Optical and quantum electronics*, 41(8), 605, 2009.
- [22] J. F. Geisz, M. A. Steiner, I. Garcia, S. R. Kurtz, D. J. Friedman, "Enhanced external radiative efficiency for 20.8% efficient single-junction GaInP solar cells", *Applied Physics Letters*, 103(4), 041118, 2013.
- [23] P. P. Nayak, J. P. Dutta, G. P. Mishra, "Efficient GaInP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 325, 2015.
- [24] A. Benlekhdim, A. Cheknane, L. Sfaxi, H. S. Hilal, "Efficiency improvement of single-junction InGaP solar cells by advanced photovoltaic device modeling", *Optik*, 163, 8, 2018.
- [25] K. W. Chee, Y. Hu, "Design and optimization of ARC less GaInP/GaAs single-/multi-junction solar cells with tunnel junction and back surface field layers", *Superlattices and Microstructures*, 119, 25, 2018.
- [26] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao, "Solar cell efficiency tables (version 56)", *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 28(7), 629, 2020.
- [27] M. Benaïcha, L. Dehimi, F. Pezzimenti, F. Bouzid, "Simulation analysis of a high efficiency GaInP/Si multijunction solar cell", *Journal of Semiconductors*, 41(3), 032701, 2020.
- [28] M. Verma, S. R. Routray, G. P. Mishra, "Analysis and optimization of BSF layer for highly efficient GaInP single junction solar cell", *Materials Today : Proceedings*, 43, 3420, 2021.

- [29] X. Wang, & Z. M. Wang, "High-efficiency solar cells. Physics, materials, and devices", Springer Series in Materials Science, 190, 2014.
- [30] J.M. Olson, D.J. Friedman, S. Kurtz, "High-efficiency III-V multijunction solar cells", In : Luque, A., Hegedus, S. (eds.) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 359-411, 2003.
- [31] H. J. Hovel, "Semiconductors and semimetals". Volume 11. Solar cells, United States, 1975.
- [32] C. T. Sah, P. C. H. Chan, C. K. Wang, R. Y. Sah, K. A. Yamakawa, R. Lutwack, *IEEE Trans. Electron Devices*, 28(3), 304, 1981.
- [33] H. Mathieu, H. Fanet, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 6^{ème} édition, Dunod, Paris, 2009.

Chapitre III

MODELES PHYSIQUE ET LOGICIEL DE SIMULATION

III.1. Introduction

Les équations différentielles physiques (de poisson, de continuité et de transport) forment le modèle le de dérive-diffusion (DD) le plus utilisé pour décrire les composants à semiconducteurs [1]. Ce système non linéaire d'équations à dérivées partielles est le modèle le plus reporté dans la littérature pour les simulations des composants semiconducteurs et il est la base pour divers logiciels numériques de modélisation des composants des semiconducteurs [2].

Dans ce chapitre nous donnons une brève présentation du logiciel [Silvaco](#) utilisé pour effectuer les différentes simulations nécessaires pour nos travaux. Le chapitre est divisé en quatre parties. Dans la première partie, nous détaillons les équations physiques et les différents types de recombinaisons utilisés dans les modèles de calculs de [Silvaco](#).

La deuxième partie est dédiée à la présentation des différents outils de [Silvaco](#), en particulier le simulateur [Atlas](#) qui permet d'établir le code de simulation des dispositifs électroniques et optiques telles que les CS's. La troisième partie présente les explications des différents segments du code, la définition de la structure et description des modèles physiques utilisés. En dernière partie, on donne les résultats d'un exemple de simulation obtenus pour deux différentes structures de CS's : l'une à simple jonction (à base de [GaInP](#)) et l'autre à double jonction (tandems [GaInP/GaAs](#) avec deux terminaux).

III. 2. Modèles physiques

Les densités de courant, présentes dans les équations de continuité, peuvent être approximées grâce à un modèle de DD, selon la théorie de transport de Boltzmann. Ce modèle représente l'un des fondements les plus élémentaires du transport dans la physique des semi-conducteurs et est employé pour résoudre numériquement les équations de transport et de continuité. Par conséquent, les densités de courant J_B et J_E (B pour les e^- et E pour les h^+) sous le modèle DD sont décrites par les équations (III.1) et (III.2) [3-4] :

$$\vec{J}_B = -q\mu_B n \nabla \phi_B \quad (III.1)$$

$$\vec{J}_E = -q\mu_E p \nabla \phi_E \quad (III.2)$$

Où $n(p)$ est la concentration des électrons (trous), $\mu_{B(E)}$ est la mobilité des électrons (trous), $\phi_{B(E)}$ est de quasi niveau de fermi d'électrons (trous) et ∇ est l'opérateur gradient.

Les équations basées sur le modèle de DD, incluant les équations de continuité pour les e^- (III-4) et les h^+ (III-5), ainsi que l'équation de Poisson (III-3), sont résolues à l'aide de méthodes numériques. Ces équations sont définies par les expressions III.3, III.4 et III.5 [3] :

$$\text{div}(\varepsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (III.3)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_B = G_B - R_B \quad (III.4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_E = G_E - R_E \quad (III.5)$$

Où ε est la permittivité électrique, ψ est le potentiel électrostatique, ρ est la densité de charge d'espace, $n(p)$ est la concentration des e^- (h^+), $\vec{J}_{B(E)}$ est la densité de courant pour les e^- (h^+), $G_{B(E)}$ est le taux de génération des e^- (h^+), $R_{B(E)}$ est le taux de recombinaison des e^- (h^+) et q est la grandeur de la charge des e^- .

III. 3. Différents types de recombinaisons

Différents mécanismes de recombinaison peuvent avoir lieu dans un semi-conducteur et en particulier dans une cellule solaire. Ces recombinaisons sont en général parmi les causes qui font dégrader le rendement photovoltaïque des cellules solaires. On distingue deux types de mécanismes de recombinaisons : **radiative** et **non – radiative**. Le schéma représentatif présenté dans la Figure III.2 réunit les trois processus de recombinaison dans les semi-conducteurs [5-6].

III.3.1 Recombinaison radiative

La recombinaison **radiative** (band-to-band) est le processus inverse de la photo-génération : un électron passe de la bande de conduction (BC) vers la bande de valence (BV) d'un semi-conducteur, rencontre un trou, et les deux porteurs se recombinent en générant un photon avec une énergie égale à la largeur de la bande de gap (Fig III.1.a). Le taux de recombinaison radiatif est exprimé par la formule suivante [7] :

$$R_{rad} = C_{rad} (pn - n_i^2) \quad (III.6)$$

Avec :

 C_{rad} : Coefficient de recombinaison radiative.

Malgré que ce phénomène induit des pertes dans les CS's, toutefois, il est communément exploité pour la fabrication des lasers à semi-conducteur et des diodes électroluminescentes (LED's) [5].

III.3.2 Recombinaison non-radiatif

Deux types de recombinaisons non-radiatives sont identifiées : la recombinaison Auger et la recombinaison de Shockley – Read – Hall (SRH).

III.3.2.1 Recombinaison Shockley-Read-Hall

Ce mode de recombinaison est assisté par niveau de défaut dite aussi recombinaison SRH, Le processus se déroule en deux étapes. Tout d'abord, un électron (e^-) passe de la BC vers un niveau de piège introduit par des défauts dans le cristal situé entre la BC et la BV. Ensuite si ce dernier rencontre un trou (h^+) sur le même niveau d'énergie il y'aura un processus de recombinaison dite recombinaison SRH. L'équation ci-dessous (III.7) décrit le taux de recombinaison selon ce mécanisme spécifique pour un piège d'énergie E_p [5] :

$$R^{rsh} = (p \times n - n_{ie}^2) / \left\{ \tau_E \left[n + n_i \times e^{\left(\frac{E_{trap}}{K \times T_r} \right)} \right] + \tau_B \left[n + n_i \times e^{\left(\frac{-E_{trap}}{K \times T_r} \right)} \right] \right\} \quad (III.7)$$

Avec :

$$\tau_{B(E)} = \frac{1}{N_t v_{th} \sigma_{B(E)}} \quad (III.8)$$

Où :

-  $E_{trap} = E_t - E_i$: les niveaux E_t de piège et E_i de fermi intrinsèque ;
-  n_i : Niveau de concentration intrinsèque ;
-  T_r : Température du réseau ;
-  $\tau_{B(E)}$: Durée de vie S-R-H des électrons (trous);
-  $\sigma_{B(E)}$: Section de capture d'un électron (trou);
-  v_{th} : Vitesse thermique du porteur considéré;
-  N_t : Concentration en centres de recombinaisons.

Ce processus de recombinaison, le **SRH**, est dominant dans les **CS's** construites à partir de matériaux quaternaires et polycristallins [8].

III.3.2.2 Recombinaison Auger

La recombinaison **Auger** est un peu similaire à la recombinaison radiative excepté que ce ne conduit pas à la génération d'un photon mais a un transfert non-radiatif d'énergie. En effet, ce mécanisme met en jeu trois particules : un e^- qui se combine avec un h^+ dans la **BV**, transférant son énergie à un troisième électron (comme illustré dans la Figure III. 2. c). Le taux de recombinaison Auger est exprimé par : [3] :

$$R_{Auger} = (C_B n + C_E p)(np - n_i^2) \quad (III.9)$$

Où :

$C_B(E)$ est le coefficient **Auger** pour les électrons (trous) en cm^6/s .

En général pour le cas de faibles dopages, la recombinaison est dominée par le mécanisme **SRH**, cependant pour les dopages plus élevés la recombinaison **Auger** prédomine. Dans ce cas la durée de vie des porteurs minoritaire est inversement proportionnelle au carré du niveau du dopage [9].

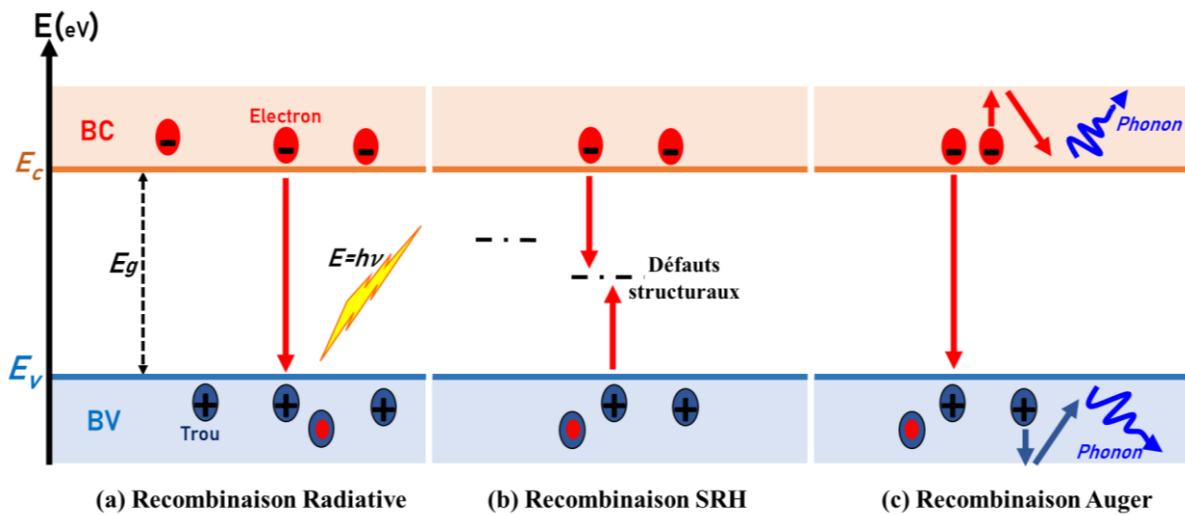


Figure III. 1 Schéma descriptif des trois processus de recombinaison dans un semi-conducteur.

III.3.3 Recombinaison de surface

La recombinaison de **surface** est associée aux défauts induits par la rupture de la périodicité du réseau cristallin à la surface du semi-conducteur. En l'absence de passivation, les atomes en surface ne possèdent pas de liaisons covalentes complètes. Les liaisons pendantes

introduisent des niveaux d'énergie dans la bande de gap qui forment un canal de recombinaison non-radiative efficace [7]. La recombinaison aux interfaces est une composante de la recombinaison S-R-H. Cette recombinaison est décrite par l'équation (III.6), tandis que les durées de vie sont calculées par de la formule (III.10) [10] :

$$\tau_{B(\dot{E})} = \left[\frac{1}{\tau_i^{B(\dot{E})}} + \frac{d_i}{A_i} * S_{B(\dot{E})} \right]^{(-1)} \quad (III.10)$$

Avec :

- ✚ $\tau_i^{B(\dot{E})}$: Durée de vie des e^- et des h^+ calculées au nœud i dans le maillage ;
- ✚ A_i et d_i : Largeur et l'aire de maille au nœud i ;
- ✚ $S_{B(\dot{E})}$: Vitesse de recombinaison surfacique des e^- et des h^+ .

Ce phénomène représente un problème majeur pour les applications photovoltaïques.

III.4. Logiciel de simulation TCAD-SILVACO

Dans le cadre de ce travail, un logiciel de simulation 2D/3D appelé TCAD – Silvaco (Technology Computer Aided Design - Silicon Valley Corporation) est utilisé. Il a été créé en 1984 par le Dr. Ivan Pesic, qui a également développé les outils permettant d'extraire les paramètres d'une structure UTMOS. TCAD-Silvaco offre la capacité de simuler les différents comportements électriques, optiques et thermiques des dispositifs, ainsi que les processus technologiques impliqués dans la fabrication de structures électroniques. Ces processus comprennent le dépôt, la gravure et le dopage, qui peuvent être réalisés par implantation ou diffusion. L'utilisation de ces outils de simulation, qui reposent sur les méthodes des éléments finis, revêt une importance fondamentale lors de l'optimisation de divers paramètres de fabrication et permet de prédire le comportement des dispositifs semiconducteurs, y compris les CS's [6]. Les outils de Silvaco sont regroupés en deux catégories, comme montré dans la Figure III. 2 [3].

- ✚ **Outils de cœur** : Ce groupe comprend les outils qui exécutent des fonctions décrivant les processus technologiques à l'aide de l'outil (simulateur) Athena ou les comportements électriques des dispositifs à l'aide du simulateur Atlas.
- ✚ **Outils interactifs** : Ces outils facilitent la communication avec les différents simulateurs et permettent de visualiser les résultats obtenus. Par exemple, DeckBuild, DevEdit et TonyPlot.

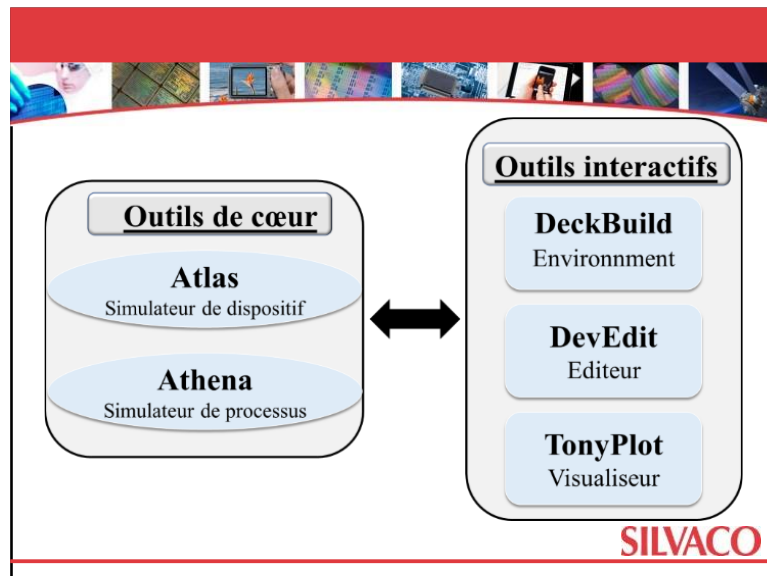
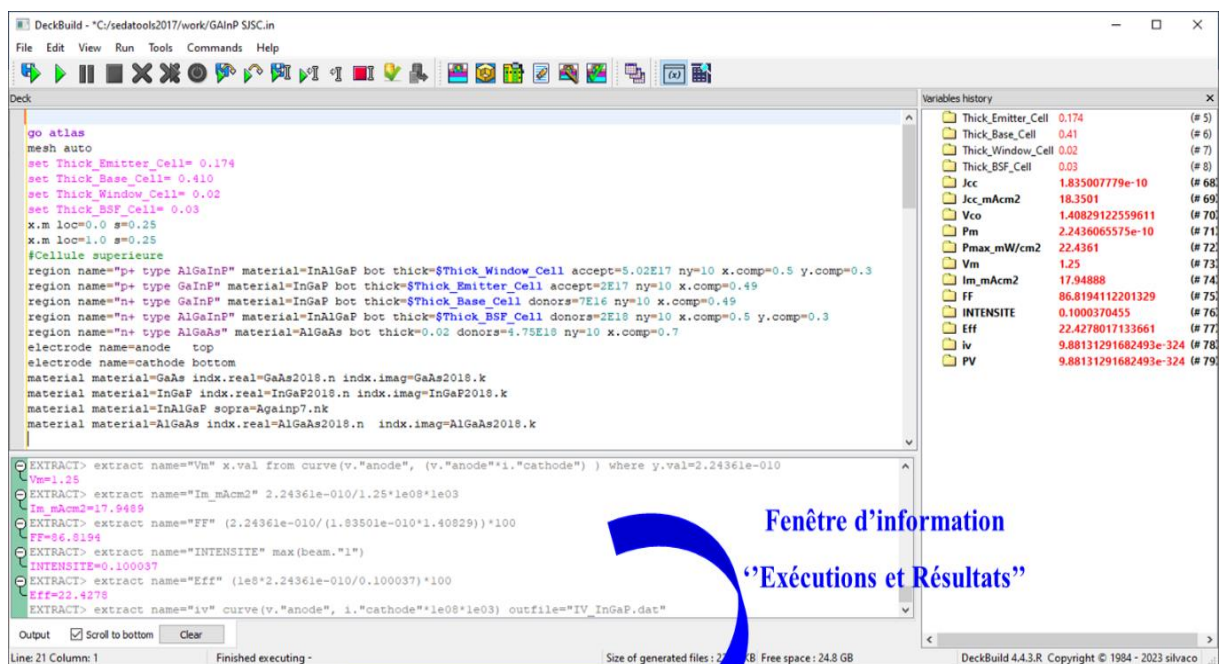


Figure III. 2 Les différents outils de SILVACO.

L'outil **DeckBuild** offre une plateforme pour la saisie des commandes et la visualisation en temps réel de l'exécution du code. Il prend en charge la communication avec différents simulateurs tels qu'**Athena** et **Atlas**.



iteration numbers

solution method
N = Newton
G = Gummel
B = Block

iteration numbers

tolerance values

error values

This error has met its tolerance

voltage at the contact surface

electron, hole, conduction, and total currents

XNORM and RHSNORM errors									
proj	direct	psi	n	p	psi	n	p	rhs	rhs
		x	x	x	x	x	x	x	x
1	N	-1.129	-1.119	-0.987	-29.6*	-6.148	-8.352		
2	N	-2.914	-2.740	-2.442	-29.7*	-9.793	-11.74		
3	N	-7.45*	-6.16*	-5.80*	-29.6*	-14.83	-16.80		
Electrode									
anode		1.500e+000	5.930e-012	1.689e-009	1.695e-009	1.695e-009			
cathode		0.000e+000	-1.693e-009	-1.877e-012	-1.695e-009	-1.695e-009			
Total							-5.189e-016		

Figure III. 3 Environnement de l'éditeur DeckBuild du Logiciel TCAD-Silvaco.

Les résultats de la simulation, comprenant des paramètres technologiques tels que la profondeur de jonction et la concentration de porteurs, ainsi que des paramètres électriques tels que la tension et le courant, sont affichés à travers une fenêtre d'information. Les valeurs des différents paramètres sont extraites lors de l'exécution de la commande "Solve" et sont affichées dans la Figure III.3, située en bas de la fenêtre DeckBuild.

DevEdit se présente comme un éditeur graphique destiné à la construction et à la modification de la structure d'un dispositif, couvrant des aspects tels que le dopage, le maillage et les types de matériaux utilisés. Pour la visualisation des résultats issus des simulations, l'outil TonyPlot est mis à disposition, permettant ainsi d'afficher des éléments tels que la structure en 2D ou 3D, les caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ ainsi que d'autres grandeurs physiques pertinentes. La modélisation des différents aspects électriques et optiques des structures de CS's simple jonction ou à jonction multiple repose sur l'utilisation de l'outil Atlas dans ce travail.

III.4.1. Mode de fonctionnement du simulateur Atlas

L'outil Atlas représente un simulateur de modélisation pour des composants électroniques, et son fonctionnement repose principalement sur l'utilisation de deux fichiers d'entrée et trois fichiers de sortie (Fig III.4). Ce simulateur possède la capacité de prédire les caractéristiques électriques d'une large gamme de dispositifs à semi-conducteurs, que ce soit en régime continu (DC), alternatif (AC) ou transitoire [11].

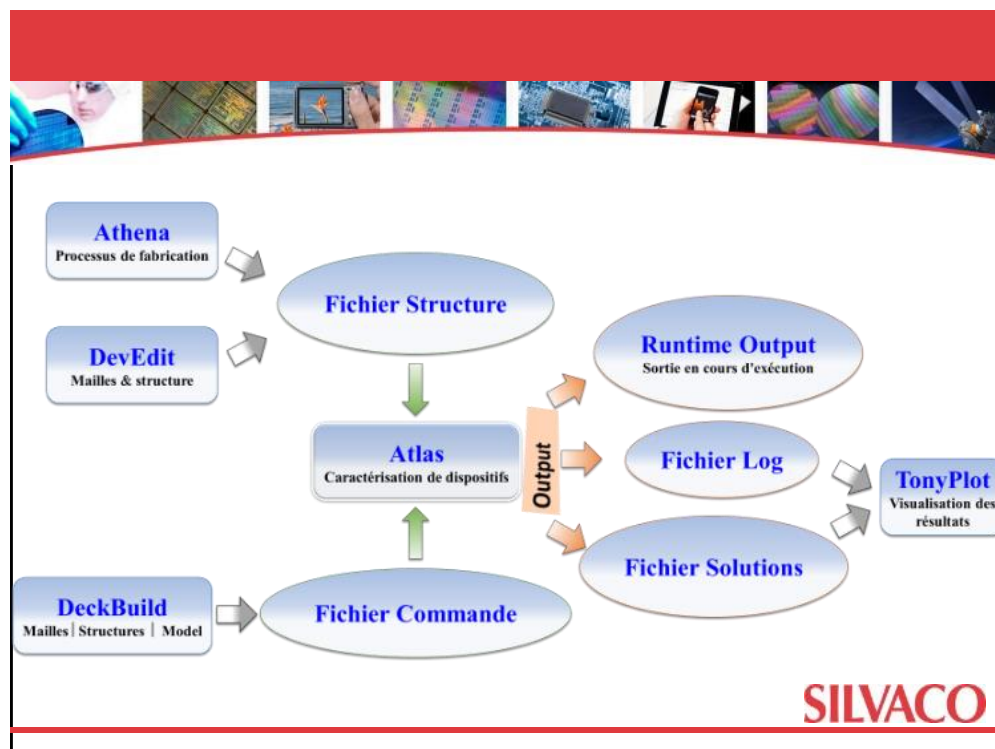


Figure III. 4 Les entrées et les sorties de l'outil Atlas.

Les deux fichiers d'entrée :

- ✚ *Fichier de structure* : il sert à définir la structure du dispositif à simuler.
- ✚ *Fichier de commandes* : contient les instructions ou les commandes nécessaires pour exécuter dans le simulateur *Atlas*.

Les trois fichiers de sortie :

- ✚ *Sortie en temps réel* : également appelée "*Runtime output*" en anglais, elle présente la progression de la simulation et signale les messages d'erreur ainsi que les avertissements en cours.
- ✚ *Fichier Log* : il enregistre les caractéristiques électriques du dispositif simulé.
- ✚ *Fichier de solution* : ce fichier conserve les données spécifiques à la structure 2D ou 3D du dispositif en un point précis.

III.4.2. Étapes de simulation

Après avoir introduit l'outil de simulation *Atlas*, nous allons désormais décrire la séquence des cinq groupes de commandes à suivre pour effectuer des simulations à l'aide *Atlas* [3] [11].

Ordre des groupes de commandes Atlas	
Etape	Déclaration
1. Spécification de la Structure	MAILLAGE RÉGION ÉLECTRODE DOPAGE
2. Spécification des Matériaux et des Modèles	MODÈLES CONTACT INTERFACE
3. Sélection des Méthodes Numériques	MÉTHODE
4. Sélection des Paramètres à Extraire	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Analyse des Résultats	EXTRACT TONYPLOT

SILVACO

Figure III.5 Étapes des commandes définies dans l'outil *Atlas*.

III.4.2.1. Spécifications de la Structure

Les quatre éléments à savoir le **maillage**, les **régions**, les **électrodes** et le **dopage** définissent les spécifications de la structure. Dans Atlas, il existe trois méthodes pour créer une structure de dispositif :

- ✚ La première façon consiste à lire un programme d'une structure existante ;
- ✚ La deuxième façon se résume à l'utilisation des différentes interfaces *DeckBuild* , *DevEdit* et *Athena* pour définir de la structure ;
- ✚ La dernière façon est de créer une structure en utilisant le langage de commande *Atlas*.

a. Spécification de Maillage

Le **maillage** (mesh) est composé d'une grille de lignes horizontales et verticales qui couvre la zone de simulation numérique de la structure (méthode des éléments finis). Dans notre cas, nous utilisons un maillage bidimensionnel. Le format général pour définir le maillage est le suivant :

```
x.mesh location = < Valeur > Espacement = < Valeur >
y.mesh location = < Valeur > Espacement = < Valeur >
```

La Figure III.6 illustre le **maillage** de la structure de la sous-CSSJ GaInP [12] :

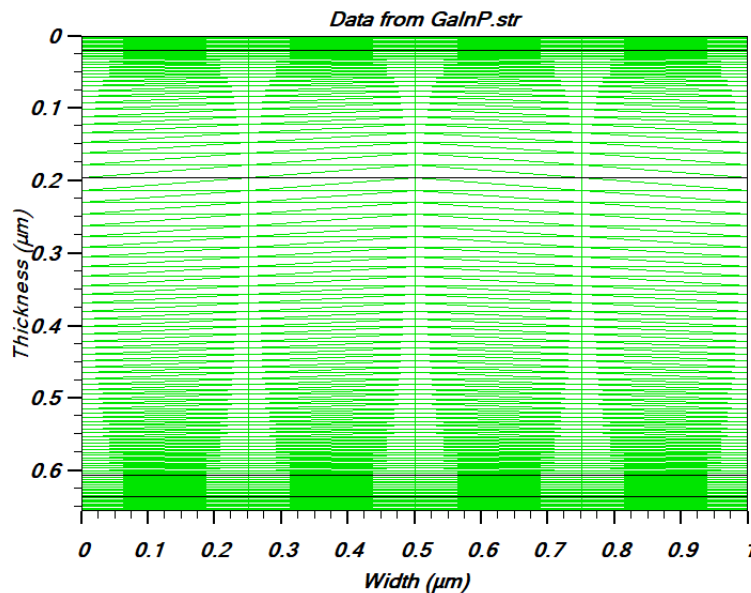


Figure III.6 Maillage de la sous-CSSJ GaInP.

b. Spécification des Régions, Matériaux et Electrodes

Une fois le maillage est défini, il faut définir les **régions** en utilisant le format suivant :

Région numéro = < integer > < Type_de_matériau > < Paramètre_de_position >

Où

Paramètres de Position : dimensions et positions des régions selon les axes x et y.

La Figure III.7 illustre la spécification des matériaux attribués à chaque région de la structure de la sous-CSSJ GaInP [12]. Il est important de souligner que l'utilisation d'un code couleur permet de distinguer le type de matériau de chaque région.

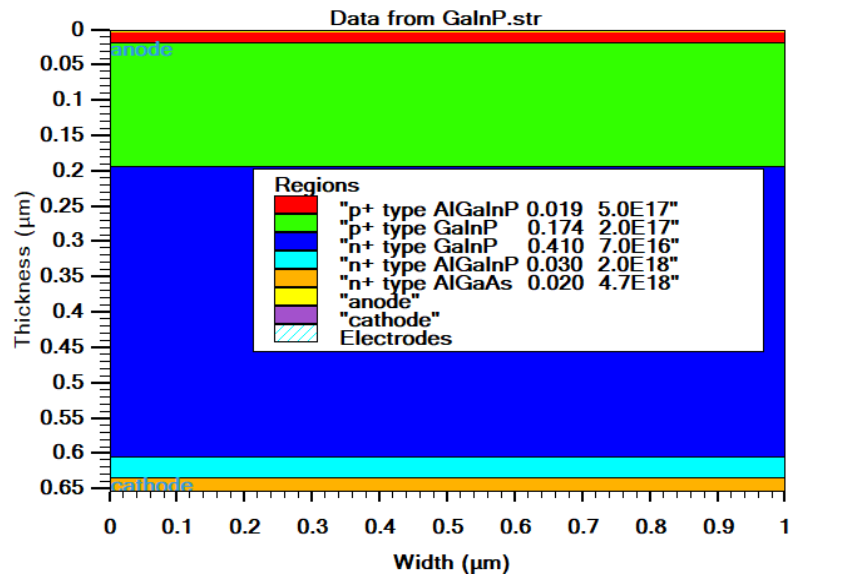


Figure III. 7 Régions et Matériaux de la sous-CSSJ GaInP.

c. Spécification des électrodes

La Figure III. 8 illustre la définition ainsi que l'emplacement des électrodes "*anode*" et "*cathode*" au sein de la structure de la sous-CSSJ GaInP.

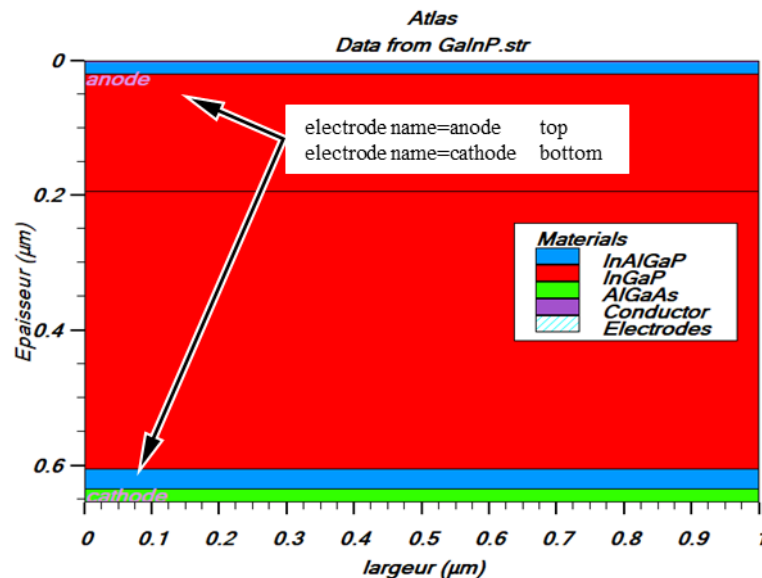


Figure III.8 Position des électrodes de la sous-CSSJ GaInP.

Le format des électrodes est défini de la manière suivante :

Electrode name = < *Nom_électrode* > < *Paramètre_de_position* >

Où :

✚ **Nom d'électrode** : Il s'agit du nom spécifique de l'électrode, tel que "*anode*", "*cathode*", "*source*", "*drain*", "*grille*", etc.

✚ **Paramètres de position** : Les emplacements des électrodes sont déterminés à l'aide de plusieurs instructions. Par exemple, la largeur de l'électrode est spécifiée à l'aide de (*x.min* et *x.max*), tandis que la position est déterminée en utilisant les directives (*Top*, *Left*, *Right* et *Bottom*).

d. Définition du Dopage

La prochaine étape de la spécification de la structure implique le dopage, qui est réalisé en utilisant la commande "*doping*" dans *Atlas* . Cette commande "*doping*" nécessite les paramètres suivants :

Doping < *Type_de_distribution* > < *Type_de_dopage* > < *Paramètre_de_position* >

Avec :

✚ **Type de distribution** : Uniforme (UNIFORM) ou gaussienne (GAUSSIEN),

✚ **Type de dopage** : **N** (Donneur) ou **P** (Accepteur).

Les différents niveaux de dopage de la sous-CSSJ *GaInP* sont illustrés dans la Figure III.9.

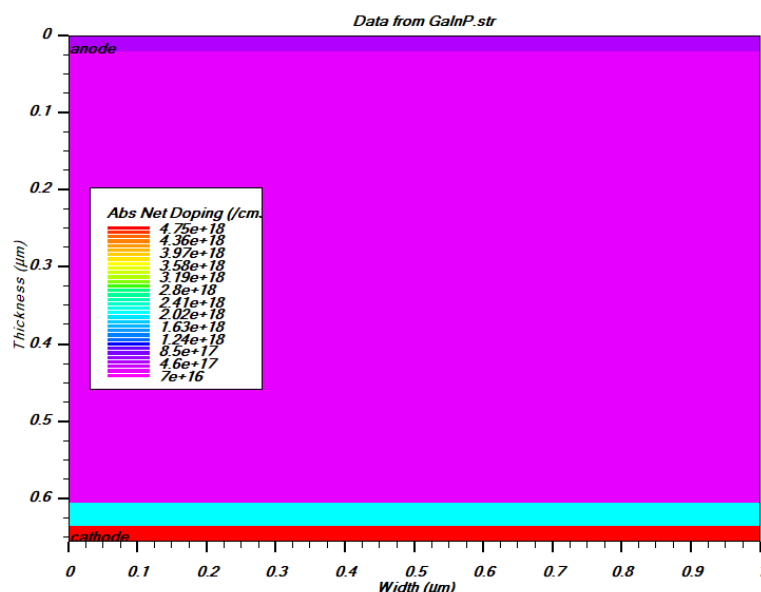


Figure III. 9. Définition de dopage de la sous-CSSJ *GaInP*.

III.4.2.2. Spécifications des Matériaux et des modèles

Après avoir défini la structure, la seconde étape consiste à spécifier les modèles des matériaux, qui sont subdivisés en : matériaux, formes, connectivité et interfaces.

a. Spécifications des Matériaux

Les trois catégories de **matériaux**, à savoir les semi-conducteurs, les isolants et les conducteurs, requièrent chacune un ensemble distinct de paramètres. En ce qui concerne les semi-conducteurs, ils englobent des propriétés telles que l'affinité électronique χ , la largeur de bande de gap E_g , la densité effective d'états $N_{B(E)}$ et la vitesse de saturation v_{sat} [13]. L'instruction "**material**" est utilisée pour spécifier les valeurs des paramètres fondamentaux des matériaux, applicables à un matériau ou une région particulière [3]. Dans **Atlas**, la syntaxe utilisée pour définir un matériau est la suivante :

```
Material < Localisation > < Définition_de_matériaux >
```

La déclaration "**material**" permet également de spécifier d'autres paramètres, tels que la mobilité des e^- (**MUN**) et des h^+ (**MUP**) ainsi que les durées de vie des e^- (**TAUNO**) et des h^+ (**TAUPO**). La déclaration du matériau **GaN** est formulée comme suit :

```
Material material=GaN region=3 Eg300=1.9 Permittivity=11.79 Affinity=4.08 /
| MUN=1945 MUP=141 NC300=6.55e17 NV300=1.49e19 /
| TAUNO=4e-09 TAUPO=4e-09 VSATN=1e6 VSATP=1e6
```

b. Sélection des modèles

La formulation des modèles physiques des semi-conducteurs repose sur la création d'équations mathématiques qui établissent des relations entre le potentiel électrostatique et la densité des porteurs de charge. Dans l'outil d'**Atlas**, ces modèles sont regroupés en cinq catégories [8] :

- ✚ Modèle de Mobilités ;
- ✚ Modèle de Génération-Recombinaison ;
- ✚ Modèle de Statistiques des porteurs ;
- ✚ Modèle d'Ionisation par impact ;
- ✚ Modèle à Effet tunnel (Band-to-Band).

La structure de la commande "**model**" est définie de la manière suivante :

```
Models < Indicateur_modèle > < Paramètres_général > < Paramètres_spécifiques_modèle >
```

Le choix du modèle de simulation dépend des matériaux sélectionnés. Dans cet exemple, on peut observer l'activation de différents modèles :

```
Models ConMob FldMob SRH
```

- ✚ **ConMob** : Dépendant de la Concentration de dopage ;
- ✚ **FldMob** : Dépendance Parallèle au Champ Électrique ;
- ✚ **SRH** : Shockley-Read-Hall.

c. Contact

Les électrodes sont initialement considérées comme des métaux transparents à la lumière et sont réputées avoir une épaisseur nulle par défaut. Des détails supplémentaires concernant diverses propriétés de ces électrodes peuvent être ajoutés en utilisant la commande "**contact**" [13]. Un exemple illustrant l'utilisation de cette commande est présenté ci-dessous pour établir la jonction tunnel dans une **CSDJ** basée sur les matériaux **III-V GaInP** et **GaAs** :

```
Contact name=tunnel resist=1e17
```

d. Interface

Les paramètres des interfaces aux limites entre les semi-conducteurs sont définis en utilisant la commande "**interface**". Cela permet de spécifier des propriétés telles que la densité de charge à l'interface et la vitesse de recombinaison superficielle [14].

III.4.2.3. Sélection des méthodes numériques

Il existe différentes **méthodes numériques** pour résoudre les problèmes liés aux dispositifs à semi-conducteurs. **Atlas-SILVACO** utilise trois types de techniques de résolution pour traiter les équations aux dérivées partielles [15] :

- a. **Méthode de Newton** : Prédominante dans le simulateur **Atlas**, elle résout des systèmes d'équations à multiples inconnues.
- b. **Méthode de Gummel** : Elle s'applique aux équations à une seule inconnue et aux variables constantes, en utilisant une approche itérative jusqu'à atteindre la solution.
- c. **Méthode de Bloc** : Cette méthode combine les deux premières et est particulièrement efficace pour les systèmes d'équations mixtes [15].

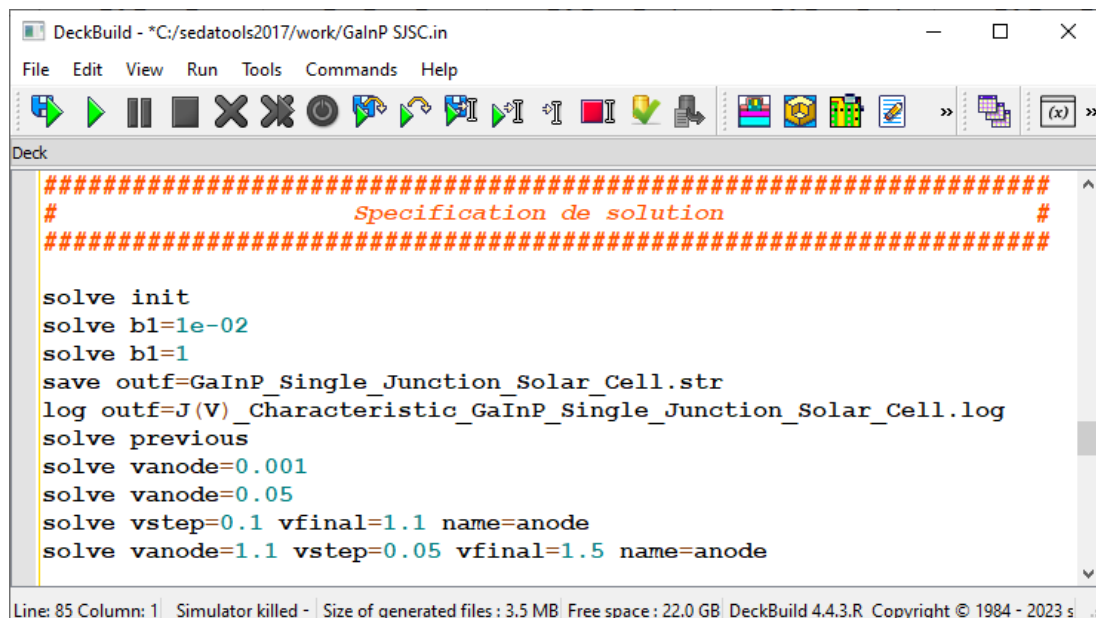
Les solutions couplées avec toutes les équations résolues immédiatement sont les meilleures lorsque les interactions entre les équations sont fortes (par exemple, un courant élevé produisant un chauffage local suffisant [11]).

III.4.2.4. Spécification de Solution

Les trois commandes *log*, *solve* et *save* sont utilisées pour spécifier les solutions dans Atlas.

- ✚ La commande "*log*" enregistre l'ensemble des caractéristiques électriques du dispositif dans un fichier de données. Chaque donnée issue de la commande "*solve*", qu'elle soit de type DC, transitoire ou AC, est sauvegardée une fois la commande 'log' exécutée.
- ✚ La commande "*solve*" intervient systématiquement après l'utilisation de la commande "*log*". Son rôle est de rechercher une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- ✚ L'instruction "*save*" autorise la conservation des informations liées à un point précis d'un maillage dans un fichier dédié à la sortie.

Les syntaxes des trois instructions mentionnées précédemment (*log*, *solve* et *save*) dans Atlas sont illustrées par l'exemple d'une CSSJ GaInP, comme suit :



```

DeckBuild - *C:/sedatools2017/work/GaInP_SJSC.in
File Edit View Run Tools Commands Help
#####
#                               #
#                               #
#####

solve init
solve b1=1e-02
solve b1=1
save outf=GaInP_Single_Junction_Solar_Cell.str
log outf=J(V)_Characteristic_GaInP_Single_Junction_Solar_Cell.log
solve previous
solve vanode=0.001
solve vanode=0.05
solve vstep=0.1 vfinal=1.1 name=anode
solve vanode=1.1 vstep=0.05 vfinal=1.5 name=anode
  
```

Line: 85 Column: 1 | Simulator killed - | Size of generated files : 3.5 MB | Free space : 22.0 GB | DeckBuild 4.4.3.R Copyright © 1984 - 2023 s

Figure III. 10 Spécification de solution de la structure GaInP.

Dans le quatrième groupe de commandes, la définition de la commande "*beam*" est une étape essentielle pour les dispositifs optoélectroniques tels que les CS's. Le flux lumineux

incident sur la CS est défini par cette commande. Dans [Atlas](#), la lumière est modélisée à travers la déclaration suivante [6] :

```
Beam < Paramètres > < Num > < x.origin > < y.origin > < Angle > < Reflects > < AM1.5 >
```

Les paramètres définissant l'origine du faisceau lumineux sont les suivants :

- ✚ [Num](#) : Nombre des faisceaux lumineux ;
- ✚ [x.origin](#) et [y.origin](#) : coordonnées de l'origine de la source lumineuse ;
- ✚ [Angle](#) : Indique le sens de propagation du faisceau ;
- ✚ [Reflects](#) : Réflections du faisceau lumineux ;
- ✚ [AM1.5](#) : Intensité du spectre utilisé.

La syntaxe de la commande "[beam](#)" est utilisée pour définir la concentration d'éclairement lors de la modélisation de la sous-CS [GaInP](#), et ce de la manière suivante :

```
Beam Num=1 x.origin=0.5 y.origin=-0.5 Angle=90 back.refl wavel.start=0.305 /  
wavel.end=3.455 wavel.num=1500 AM1.5 outfile=AM1.5
```

III.4.2.5. Analyse des résultats

L'analyse des résultats de simulation avec l'outil [Atlas](#) joue un rôle essentiel dans la compréhension et l'évaluation des performances de modélisation de la sous-CSSJ [GaInP](#) Top. L'extraction précise des valeurs des paramètres spécifiques à partir des fichiers "[log](#)" ou "[Solve](#)" est accomplie grâce à la commande. Parallèlement, pour simplifier la visualisation graphique du fichier de structure dans la fenêtre [TonyPlot](#), [Atlas](#) enregistre automatiquement ce fichier en utilisant la commande "[Tonyplot](#)". La syntaxe de la commande "[Extract](#)" est présentée dans la fenêtre de [DeckBuild](#) (Fig III. 11).

Les caractéristiques (J-V) et (P-V) de la sous-CSSJ [GaInP](#) sont obtenues en utilisant l'instruction "[Extract](#)", comme décrit dans la fenêtre [DeckBuild](#), illustrée par la Figure III. 11. En outre, la définition des paramètres essentiels PV's tels que J_{cc} , V_{co} , FF et η pour la sous-CSSJ [GaInP](#) est également présentée dans la fenêtre [DeckBuild](#). Toutes ces informations sont enregistrées dans le fichier :

```
"J(V)_Characteristic_GaInP_Single_Junction_Solar_Cell.log"
```

```

DeckBuild - C:/sedatools2017/work/GaInP_SJSC.in
File Edit View Run Tools Commands Help

Deck

#####
#                               Extraction des donnees et Presentation des resultats                               #
#####

extract init infile="J(V)_Characteristic_GaInP_Single_Junction_Solar_Cell.log"

extract name="Jcc" max(curve(v."anode", i."cathode"))
extract name="Jcc (mA/cm2)" "$Jcc*1e08*1e03"
extract name="Vco" x.val from curve(v."anode", i."cathode") where y.val=0.0
extract name="Pmax" max(curve(v."anode", (v."anode" * i."cathode")))
extract name="Pmax (mW/cm2)" "$Pmax*1e08*1e03"
extract name="Vmax" x.val from curve(v."anode", (v."anode"*i."cathode") ) where y.val="$Pmax"
extract name="Jmax (mA/cm2)" "$Pmax/$Vmax*1e08*1e03"
extract name="FF" ($Pmax/($Jcc*$Vco))*100
extract name="P_inc" max(beam."1")
extract name="Eff" (1e8*$Pmax/$P_inc)*100
extract name="J(V)" curve(v."anode", i."cathode"*1e08*1e03) outfile="J(V)_GaInP.dat"
extract name="P(V)" curve(v."anode", i."cathode"*1e08*1e03*v."anode") outfile="P(V)_GaInP.dat"

tonyplot GaInP_Single_Junction_Solar_Cell.str
tonyplot J(V)_GaInP.dat
tonyplot P(V)_GaInP.dat

#####
#                               Fin de Programme                               #
#####

quit

Line: 82 Column: 16   Finished executing -   Size of generated files : 2.9 MB Free space: 20.9 GB   DeckBuild 4.4.3.R Copyright © 1984 - 2023 silvaco

```

Figure III. 11 Extraction des caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ de la sous-CSSJ GaInP.

Par la suite, les données contenues dans ce fichier sont tracées à l'aide de l'outil "Tonyplot". La Figure III. 12 présente le résultat de la courbe obtenue à partir de cette instruction.

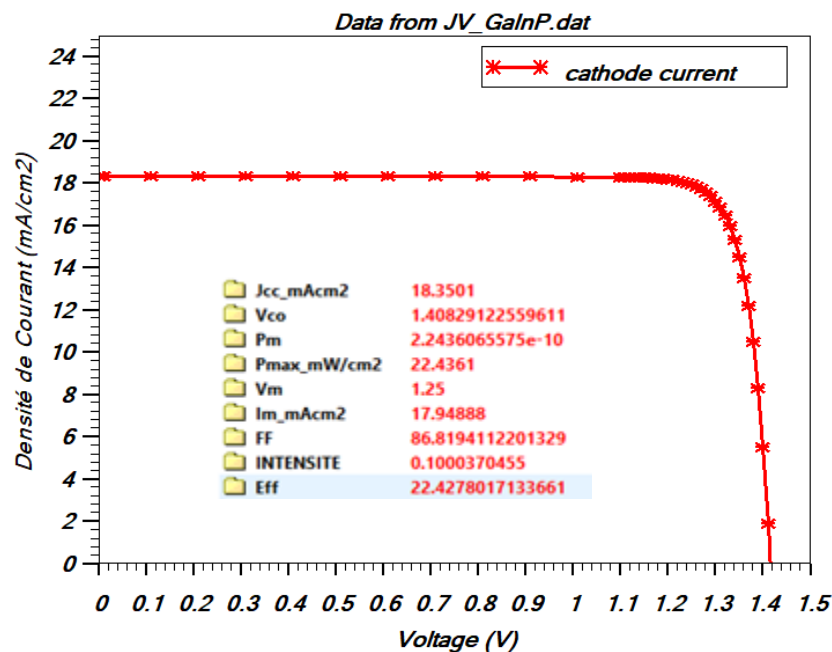


Figure III. 12 Représentation de la caractéristique (J-V) de la sous-CSSJ GaInP avec Tonyplot.

III.5. Optimisation de l'efficacité de la cellule CSDJ GaInP/GaAs

Les modèles de simulation représentent une solution appropriée en vue d'améliorer l'efficacité des CS's, anticiper leur comportement, et diminuer à la fois les coûts et la durée des expérimentations. Leurs utilisations permettent l'amélioration de l'efficacité des CS's de manière efficace et économique. La modélisation des cellules solaires à double jonction (CSDJ's) GaInP/GaAs a été réalisée en utilisant l'outil Atlas de Silvaco. Cet outil permet la conception de la cellule en tenant compte des différents paramètres physiques tels que les types de matériaux, leurs compositions, les concentrations de dopage et l'épaisseur.

Contact Avant				
Fenêtre Avant	AlGaInP	type p+	0.030μm	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Émetteur	GaInP	type p	0.050μm	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Base	GaInP	type n	~	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
BSF	AlGaInP	type n+	0.030μm	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
Diode Tunnel	GaInP	type n+	0.025μm	$5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Diode Tunnel	GaInP	type p+	0.025μm	$3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Fenêtre Arrière	GaInP	type p+	0.040μm	$3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Émetteur	GaAs	type p	0.50μm	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Base	GaAs	type n	~	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
BSF	AlGaAs	type n+	0.100μm	$5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Substrat	GaAs	type n+	0.200μm	$1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Contact Arrière				

Figure III. 13 Structure de la CSDJ GaInP/GaAs [16].

Dans le cadre de l'optimisation du modèle de A. W. Chee illustré dans la Figure III.15 [16], nous avons effectué une étude détaillée des paramètres PV, notamment la densité de courant J_{cc} et la tension V_{co} ainsi que du facteur de forme (FF). Pour cela, nous avons procédé, en premier temp, à des variations concernant les épaisseurs des couches de Base, à la fois supérieure (GaInP Top) et inférieure (GaAs Bottom). Les paramètres physiques nécessaires à la simulation du modèle, tels que l'indice de réfraction, le coefficient d'extinction, la bande de gap, la mobilité des électrons (trous), ont été obtenus à partir de la base de données des matériaux d'Atlas et des modèles d'Adachi. Afin de refléter les conditions réelles, les différentes simulations ont été réalisées sous un éclaircissement de 1 soleil AM1.5G.

III.5.1 Effet des épaisseurs des bases de sous-cellules GaInP Top et GaAs Bottom

Afin de comprendre l'impact des épaisseurs des couches de base sur les performances de la CSDJ GaInP/GaAs, nous avons réalisé une étude visant à optimiser ces paramètres. Dans le

cas de la CSDJ, la densité de courant total de la cellule (J_{cc}^{Totale}) est égale aux densités de courant de la sous-CS ayant la plus faible valeur entre les sous-cellules supérieure (J_{cc}^{Top}) et inférieure (J_{cc}^{Bottom}). Dans le but d'améliorer le courant de court-circuit de la sous-CS supérieure (J_{cc}^{Top}), l'épaisseur de cette couche (Base) a été ajusté adéquatement. Pour maximiser la densité de courant de la cellule CSDJ et améliorer son efficacité, l'épaisseur de la sous-CS supérieure a été optimisé afin d'atteindre cette condition. Ainsi, nous avons fait varier l'épaisseur de la Base supérieure GaInP dans une plage allant de $0,15 \mu\text{m}$ à $0,65 \mu\text{m}$, tout en gardant l'épaisseur, de la base de la sous-CS inférieure en GaAs, fixe à $2 \mu\text{m}$ [17].

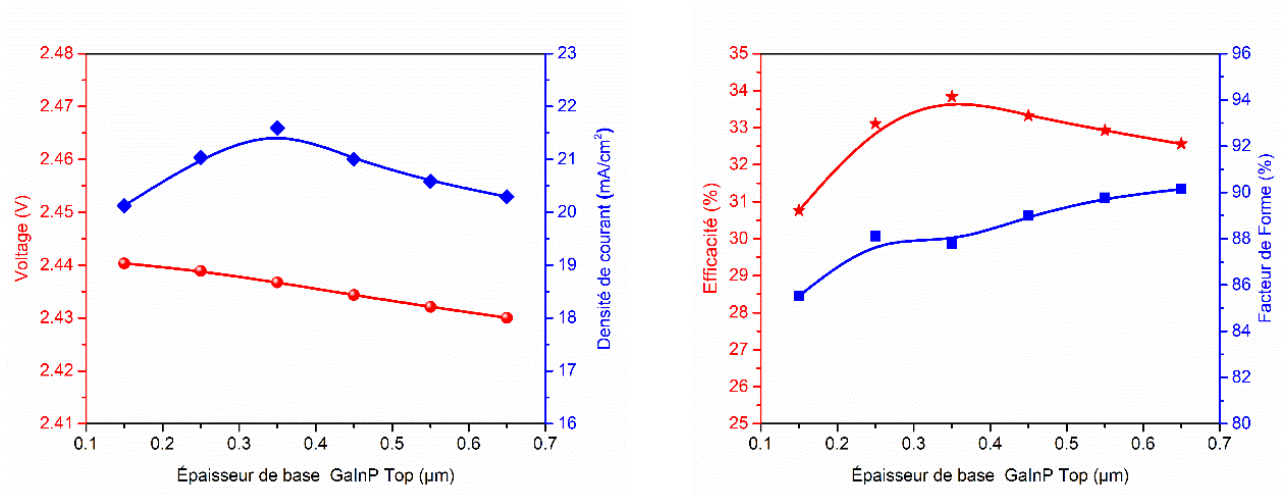


Figure III.14 Variations des paramètres PV en fonction de l'épaisseur de la base GaInP Top.

L'agrandissement de l'épaisseur de la sous-CS supérieure GaInP Top confère manifestement un avantage en termes d'absorption accrue de photons. Cependant, si la longueur de diffusion L_D est inférieure à l'épaisseur de la Base, cela engendre une forte diminution du photocourant [18]. En conséquence, une optimisation du courant de court-circuit et du rendement de conversion a été considérée.

La Figure III.14 montre la variation du rendement η de la CSDJ GaInP/GaAs en fonction de l'épaisseur de la base GaInP Top. De manière similaire à la densité de courant, le rendement η de la CSDJ atteint un maximum à l'épaisseur optimale de $0,35 \mu\text{m}$ pour la Base de GaInP. À cette épaisseur, le rendement η de la CSDJ augmente progressivement à partir de $32,5\%$ à une épaisseur de $0,15 \mu\text{m}$, atteignant un maximum de $33,84\%$. Cependant, au-delà de l'épaisseur optimale, le rendement diminue progressivement jusqu'à $21,33\%$ à une épaisseur de $0,65 \mu\text{m}$.

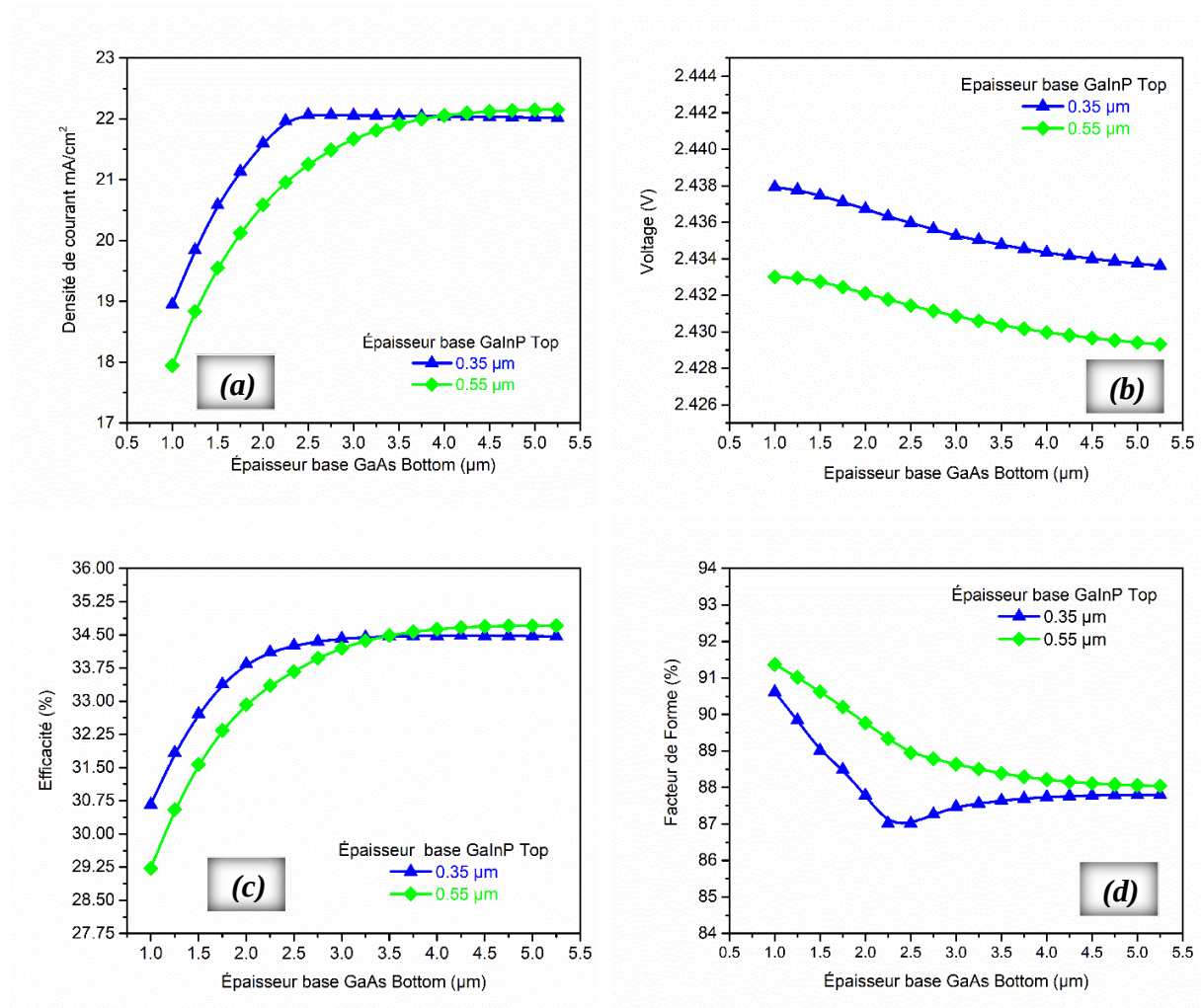


Figure III. 15 Variation des paramètres J_{cc} , V_{co} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la Base GaAs Bottom et pour deux l'épaisseurs de la Base GaInP Top.

Dans le deuxième cas, nous avons effectué une variation de l'épaisseur de la base GaAs Bottom dans une plage de 0,1 μm à 5.5 μm, tout en utilisant deux valeurs spécifiques pour l'épaisseur de la base GaInP Top, à savoir 0,35 μm (optimisée) et 0,55 μm (initiale).

Après avoir examiné les variations des paramètres η , FF , J_{cc} et V_{co} de la CSDJ GaInP/GaAs en fonction de l'épaisseur de la base GaAs Bottom (Figure III. 15), nous avons constaté que la meilleure efficacité de la cellule GaInP/GaAs est obtenu avec les paramètres initiaux de l'épaisseur de la base inférieure, c'est-à-dire 2 μm de GaAs. De plus, nous avons observé que l'efficacité de la cellule GaInP/GaAs est plus affecté par l'épaisseur de la base supérieure (GaInP) que par l'épaisseur de la base inférieure (GaAs).

Les caractéristiques (J-V) et (P-V) des CSDJ's GaInP/GaAs après optimisation et avec paramètres initiaux, sous le rayonnement solaire AM1.5G, sont représentées sur la figure III. 16,

ainsi que les paramètres électriques correspondants à cette CSDJ sont énumérés dans la même Figure.

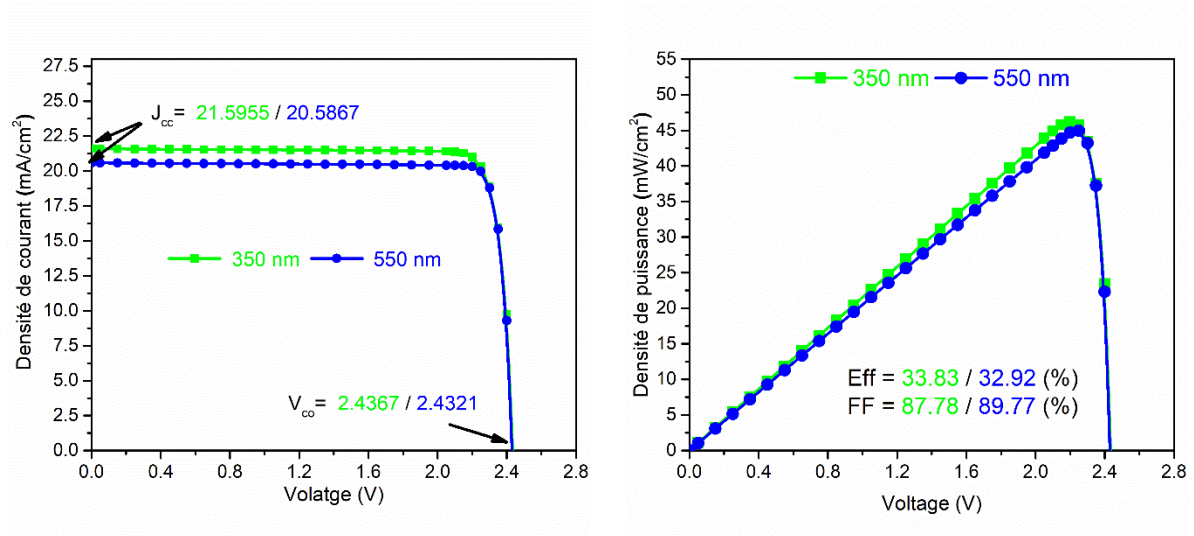


Figure III. 16 Caractéristiques (J-V) et (P-V) pour deux différentes épaisseurs de la Base GaInP Top.

Le rendement η de la CSDJ GaInP/GaAs avec les paramètres optimaux est égale à 33.83%, ce qui est supérieur au rendement de conversion 32.92% obtenu avec les paramètres initiaux.

III.5.2. Impact de couches Fenêtre sur la performance de la CSDJ GaInP/GaAs

Les couches qui encapsulent les deux jonctions p-n à l'avant ou à l'arrière pour les SCDJ's sont généralement désignées sous le terme de couches 'Fenêtres'. La première couche de la sous-CS Top, à l'avant, est désignée sous le nom de 'Window', tandis que la deuxième couche de la sous-CS Bottom, à l'arrière, est appelée 'Back-Surface-Field'. Ces couches sont fabriquées à partir de matériaux ayant une largeur de bande de gap E_g plus grande que celle des matériaux des photodiodes (Émetteurs). De plus, elles présentent une concentration électronique relativement élevée (de l'ordre de $n \geq 10^{18} \text{cm}^{-3}$) et un important décalage de la BC (ΔE_{cl}) par rapport aux émetteurs, créant ainsi une barrière de potentiel pour les électrons minoritaires. De plus, elles possèdent une qualité matérielle (en termes de structure physique) suffisante pour permettre une faible vitesse de recombinaison aux interfaces. Enfin, leur constante de maille doit être en accord avec les deux jonctions p-n à celle du GaInP et du GaAs, ce qui leur confère des propriétés spécifiques essentielles pour leur rôle en tant que couches de fenêtre efficaces dans une telle sous-cellule [19]. Cette caractéristique les rend transparentes au rayonnement qui atteint ces couches, ce qui justifie leur appellation de 'Fenêtres'. En conséquence, elles jouent

un rôle fondamental en limitant le taux de recombinaison des porteurs au niveau des interfaces avant et arrière des jonction p-n.

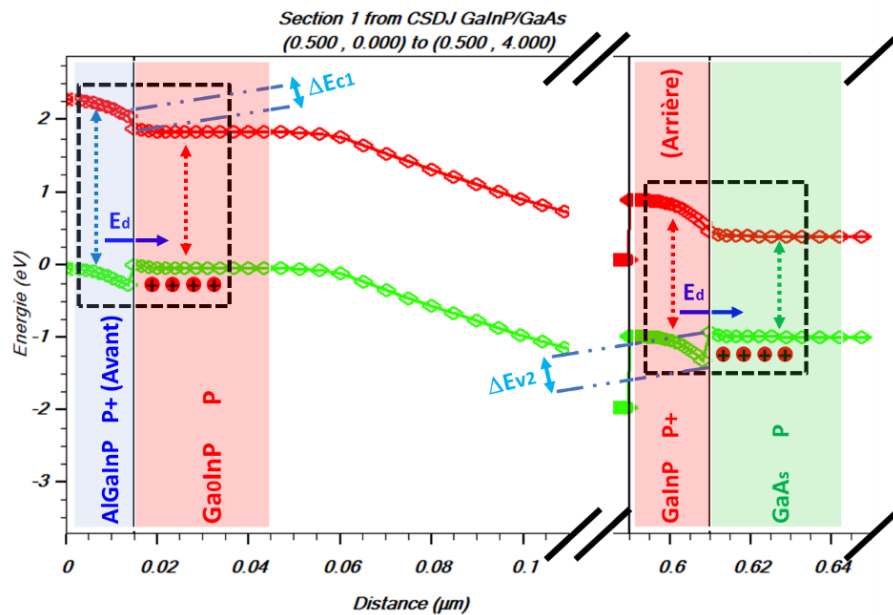


Figure III. 17 Diagramme des bandes d'énergie illustrant les couches Fenêtres (a) AlGaInP avant, et (b) GaInP arrière [20].

En considérant les constations du paragraphe précédent, il est nécessaire de réduire la vitesse de recombinaison à la surface pour améliorer l'efficacité de la CSDJ GaInP/GaAs. Dans cette partie, nous examinons l'effet des couches de fenêtre supérieure (Top) et inférieure (Bottom) sur les performances d'une CSDJ GaInP/GaAs. Quatre configurations ont été étudiées pour évaluer les performances des cellules dans chaque cas [20] :

- ✚ Absence de couches fenêtre dans les deux sous-CS's (Top et Bottom).
- ✚ Avec une couche fenêtre dans la sous-CS supérieure (GaInP sur Top).
- ✚ Avec une couche fenêtre dans la sous-CS inférieure (AlGaInP sur Bottom).
- ✚ Avec des couches de fenêtre pour les sous-CS's (GaInP sur Top et AlGaInP sur Bottom).

III.5.1.1 Sans les fenêtres GaInP Top et AlGaInP Bottom

Le premier scénario, dans lequel la cellule est dépourvue des deux couches fenêtre, révèle une caractéristique courant-tension (J-V) illustrée dans la Figure III. 18. Dans ce cas, la CSDJ GaInP/GaAs montre un courant J_{cc} très faible, enregistrant seulement 16.30 mA/cm^2 . La tension de circuit ouvert (V_{co}) atteint 2.29 V , tandis que l'efficacité de conversion est de 24.57% . Ces performances sont influencées par les pertes dues à la réflexion à l'interface air/substrat, ce qui conduit à une absorption limitée des photons dans les sous-CS's.

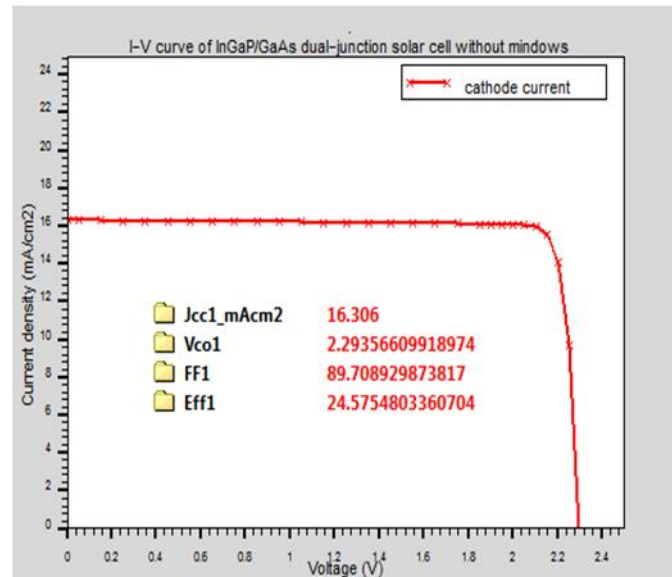


Figure III.18 Caractéristiques courant-tension (J-V) en l'absence des fenêtres.

III.5.2.2 Avec une couche Fenêtre GaInP Top et sans couche Fenêtre AlGaInP

Dans le deuxième scénario, où seule la sous-cellule supérieure est pourvue d'une couche fenêtre, **GaInP** Top, Les caractéristiques courant-tension (**J-V**) illustrées dans la Figure III.19 révèlent une légère diminution par rapport au premier scénario sans couches Fenêtres. Le courant J_{cc} est réduite de 16,31 à 15,59 mA/cm², la tension de circuit ouvert (V_{co}) se stabilise à 2,35 V, tandis que l'efficacité de conversion subit une légère réduction à 24,44 %. Toutefois, cette diminution demeure limitée du fait que la sous-CS inférieure ne possède pas de couche Fenêtre **AlGaInP** Bottom, ce qui entraîne des performances presque similaires à celles du premier scénario sans Fenêtres.

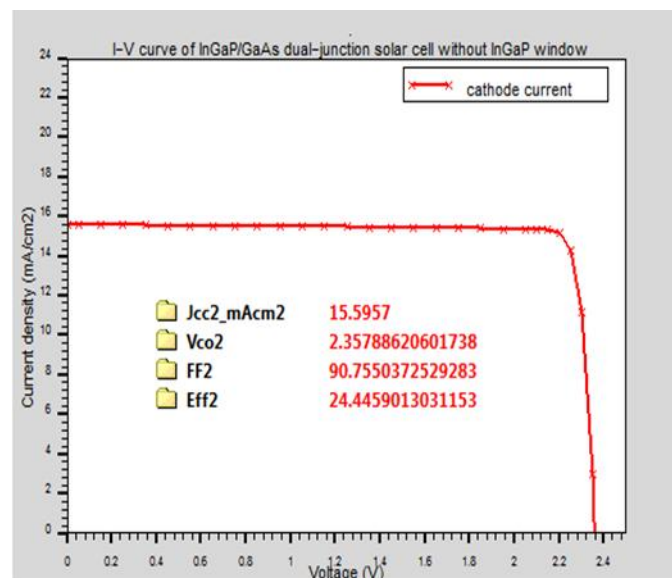


Figure III.19 Caractéristiques courant-tension (J-V) avec fenêtre GaInP Top.

III.5.2.3. Avec une fenêtre AlGaInP Bottom et sans fenêtre GaInP

Le troisième scénario, où seule la sous-cellule inférieure possède une couche Fenêtre AlGaInP Bottom, on observe une amélioration significative de la performance de la CSDJ GaInP/GaAs (Figure III. 21). Le courant de court-circuit J_{cc} passe de 15.59 à 19,25 mA/cm², la tension de circuit ouvert présente une légère augmentation de 0.01V (V_{co} = 2,36 V) et l'efficacité de conversion s'établit à 29,50 %, ce qui représente une amélioration de 20 % par rapport au deuxième scénario. La présence de la couche Fenêtre sur la sous-CS inférieure, AlGaInP Bottom, permet une meilleure absorption des photons, ce qui augmente le courant de court-circuit et améliore l'efficacité de conversion.

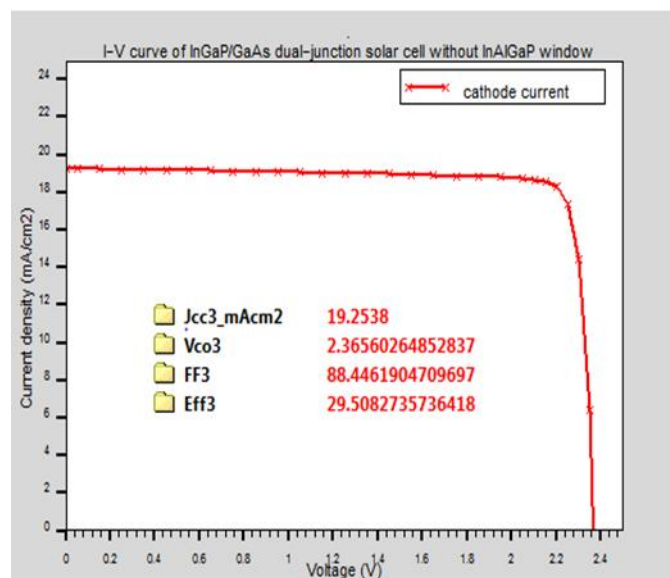


Figure III. 20 Caractéristiques courant-tension (J-V) avec fenêtre AlGaInP Bottom.

III.5.2.4. Avec couches fenêtre GaInP sur Top et AlGaInP sur Bottom

Enfin, le quatrième scénario, qui intègre l'utilisation de deux couches fenêtre, une sur la sous-CS supérieure GaInP Top et l'autre sur la sous-CS inférieure AlGaInP Bottom, démontre une nette amélioration des performances (Figure III. 22). Le courant J_{cc} s'établit à 21.58 mA/cm², la tension V_{co} évolue de 2.35V à 2.43 V, et l'efficacité de conversion culmine à 34.01 % (représentant une augmentation de 15 % par rapport au troisième scénario). Cette configuration à double couche fenêtre se traduit par une nette réduction des pertes engendrées par la réflexion au sein des deux sous-CS's, ainsi qu'une amélioration notable de l'absorption des photons.

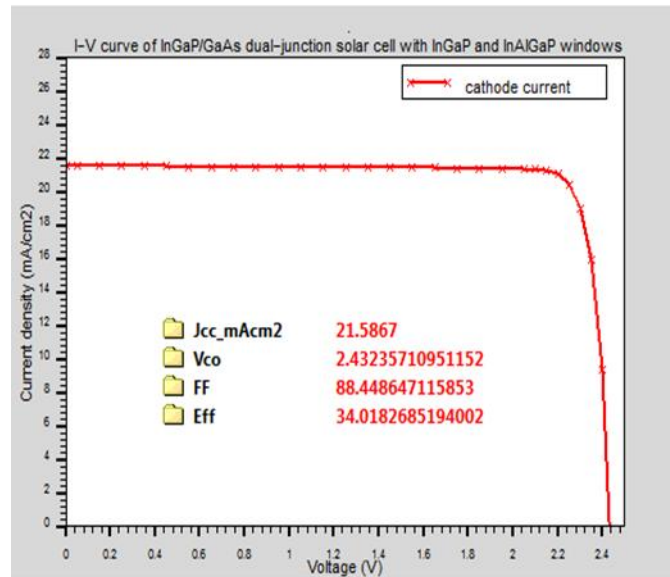


Figure III.21 Caractéristiques (J-V) avec couches fenêtre GaInP Top et AlGaInP Bottom.

Les caractéristiques courant-tension (J-V) pour les quatre scénarios sont illustrées respectivement dans la Figure III. 21, tandis que les résultats issus de ces simulations de ces cas sont répertoriés dans le tableau III. 1.

Tableau III. 1 Comparaison des performances de CSDJ's GaInP/GaAs pour différents scénarios de couches de fenêtre.

Scénario	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF (%)	η (%)
Sans couches Fenêtre (GaInP Top et AlGaInP Bottom)	16.30	2.29	89.70	24.57
Avec Fenêtre GaInP Bottom et sans AlGaInP Top	15.59	2.35	90.75	24.44
Avec Fenêtre GaInP Top et sans AlGaInP Bottom	19.25	2.36	88.44	29.50
Avec couches Fenêtre (GaInP Top et AlGaInP Bottom)	21.58	2.43	88.44	34.01

L'analyse des différentes situations révèle que les couches fenêtre GaInP Top (avant) et AlGaInP Bottom (arrière) ont un important impact sur les performances de la CS GaInP/GaAs. Nous constatons que le rendement est davantage influencé par la fenêtre avant GaInP Top par rapport à la fenêtre arrière AlGaInP Bottom. Il est également important de souligner que l'ajout simultané de ces couches fenêtre, à savoir GaInP Top et AlGaInP Bottom, conduit à des améliorations significatives des performances en réduisant les pertes et en augmentant l'absorption des photons.

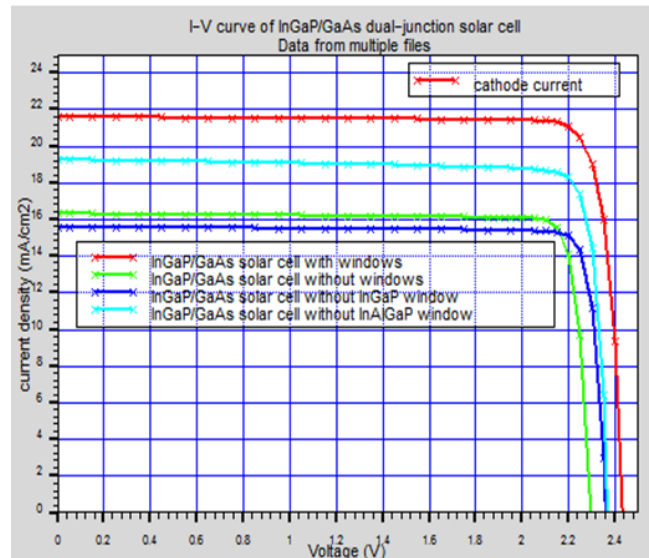


Figure III.22 caractéristiques (J-V) sans et avec fenêtres pour les 4 cas.

III.5.3 Impact de Couche BSF AlGaInP Top

La réduction des pertes de porteurs minoritaires près du contact ohmique arrière est un élément clé pour l'amélioration de rendement des CS's. Parmi les approches les plus déployées à cette fin, on trouve l'application d'un **champ de surface arrière** (BSF). Le **BSF** implique la création d'une région fortement dopée, stratégiquement placée à l'arrière de la région de base des CS's (diagramme de bande de la Figure III. 23). Son objectif principal est de réduire les pertes des porteurs minoritaires près du contact ohmique arrière, augmentant ainsi la probabilité de leur collecte. Les critères requis pour une couche **BSF** efficace sont similaires à ceux d'une couche fenêtre de surface avant. De plus, cette couche présente une grande transparence aux photons destinés à la sous-SC Bottom sous-jacente en **GaAs**.

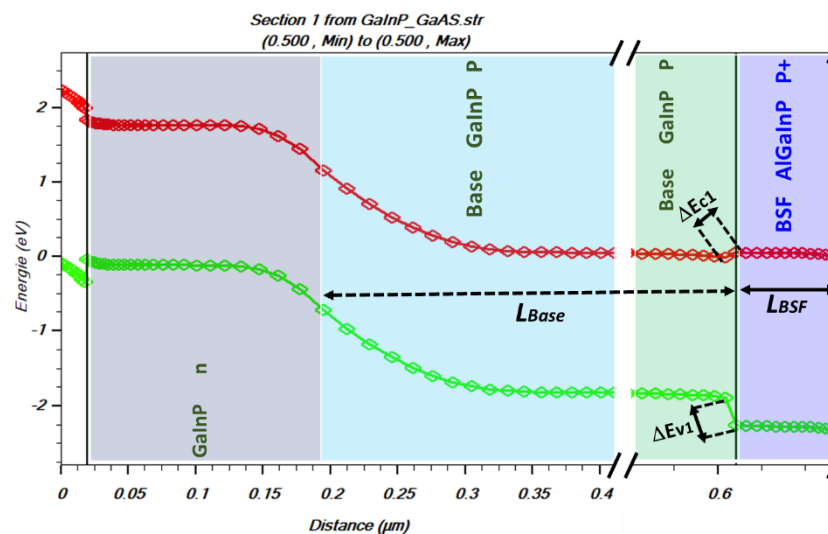


Figure III. 23 Diagramme des bandes d'énergies de la sous-CS GaInP Top illustrant la passivation arrière par la BSF AlGaInP [23].

La fonction de la barrière de surface arrière de la CS supérieure est de passiver l'interface entre la base $p\text{-GaInP}$ de la sous-CS GaInP Top et l'interconnexion de jonction tunnel (ICTJ). De plus, dans certains cas, elle permet de réduire la diffusion des dopants à partir du ICTJ [21].

Pour évaluer l'influence des paramètres de cette couche de fenêtre (à savoir son épaisseur et son dopage), nous avons employé une couche transparente en AlGaInP d'une épaisseur variant de 0 à 70 nm, avec cinq niveaux de dopage : $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Cette couche agit en tant que couche supérieure de fenêtre, possédant une largeur de bande interdite élevée, notée $E_g = 2.33 \text{ eV}$. L'épaisseur de cette couche peut être beaucoup plus élevée en raison de son gap suffisamment élevé. Le diagramme des bandes de la structure de la sous-CS GaInP illustrée dans la Figure III.23 montre que l'hétérojonction formée à l'interface entre la $\text{BSF } p^+ \text{-(Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ et la couche de base $p\text{-GaInP}$ dans toutes les sous-jonctions de GaInP est caractérisée par un offset de BV plus élevé par rapport à l'offset de BC [22].

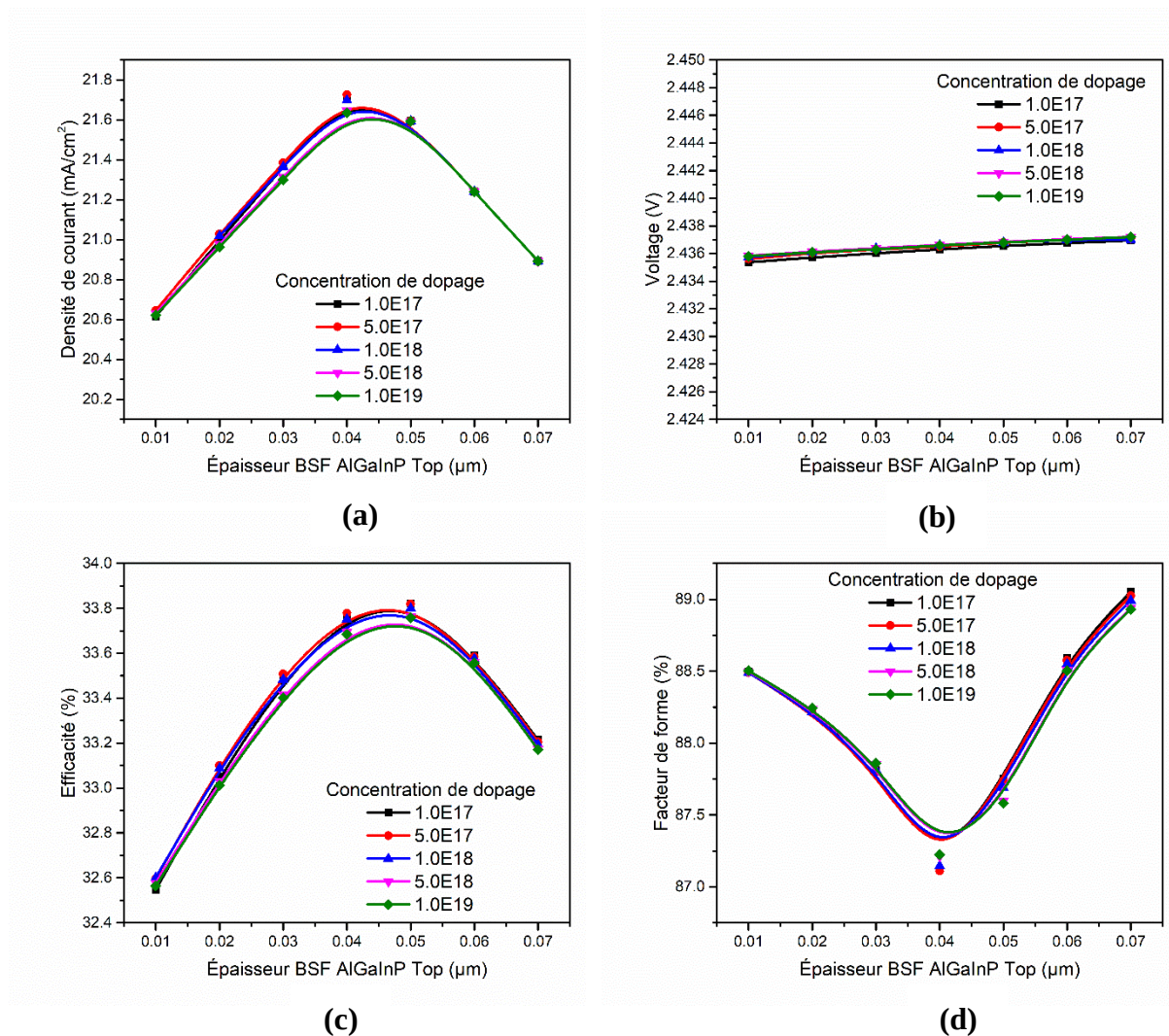


Figure III. 24 Evolution des paramètres J_{cc} , V_{co} , FF et η de la SCDJ GaInP/GaAs .

Dans cette section, nous avons examiné l'impact de deux paramètres clés, à savoir l'épaisseur et le dopage de la couche **BSF AlGaInP** de la sous-CS Top, sur les performances d'une CSDJ **GaInP/GaAs**, à savoir J_{cc} , V_{co} , FF et η , qui sont présentés dans la Figure III.24. L'analyse de ces caractéristiques met en évidence de manière frappante l'impact significatif de l'épaisseur, tandis qu'on observe un effet plus léger en ce qui concerne le dopage [23]. Nous constatons que la densité J_{cc} augmente à mesure que l'épaisseur L_{BSF} augmente, atteignant un pic de 21.72 % à une épaisseur de 45 nm. Au-delà de cette valeur, une diminution est observée. Cette variation pourrait être expliquée par les interactions complexes entre la collecte de charges et les phénomènes de recombinaison qui varient en fonction de l'épaisseur. De manière similaire, la Figure III.24.c démontre que l'efficacité η suit de près la tendance de la densité de courant, atteignant un maximum de 34.80 %, ce qui souligne la relation étroite entre ces deux paramètres.

En ce qui concerne la tension V_{co} (Figure III.24.b), nous observons une légère augmentation de 0.0015 V sur toute la plage d'épaisseur de la couche **BSF**, allant de 10 à 70 nm. Cette constatation suggère que la tension de circuit ouvert demeure relativement stable face aux variations de l'épaisseur L_{BSF} . Pour le facteur de forme (FF), nous observons une tendance inverse à celle de la densité de courant. Lorsque l'épaisseur L_{BSF} augmente, le FF diminue de 88.5% à 87.5% à une épaisseur de 45 nm. Au-delà de cette valeur, le FF commence à augmenter. Cette variation peut être attribuée, d'une part, à des changements dans les pertes ohmiques, notamment une augmentation de la résistance en série, entraînant ainsi une augmentation des pertes. D'autre part, l'épaisseur de la couche joue également un rôle. À mesure que l'épaisseur diminue, l'absorption de la lumière augmente pour les longueurs d'onde plus longues. Cette interaction complexe entre les pertes ohmiques, les pertes par recombinaison et les effets de polarisation de la jonction, en fonction de l'épaisseur de la couche **BSF**, contribue à la variation observée dans le FF .

Nous remarquons une variation légère de l'effet du dopage sur la couche **BSF AlGaInP** de la sous-CS supérieure. Les concentrations de dopage plus élevées, telles que 5.0×10^{18} et $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, entraînent une légère diminution du J_{cc} et du rendement η au point où les performances atteignent leur maximum.

Suite aux optimisations précédentes (**Base**, **Fenêtre** et **BSF**), nous avons déduit les paramètres optimaux en utilisant des méthodes classiques paramétriques. Cependant, il est devenu évident que cette approche, où un paramètre est varié tandis que les autres demeurent constants, ne conduit pas toujours à des résultats cohérents. Par exemple, dans la dernière simulation, l'effet de la couche **BSF** a révélé une augmentation du rendement coïncidant avec une diminution du FF . De plus, nous avons observé que la prise en compte d'un grand nombre

de paramètres, tels que les épaisseurs et les dopages de 11 couches différentes, peut rapidement devenir complexe, avec jusqu'à 22 paramètres possibles. Nous envisageons une nouvelle approche dans le chapitre à venir.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par donner une présentation du logiciel **Silvaco** que nous avons utilisé pour effectuer les simulations nécessaires pour nos travaux. A cet effet, nous avons présenté, au début du chapitre, les équations physiques et les différents types de recombinaisons utilisés par le simulateur **Silvaco**. Ensuite, on a présenté les différents outils de **Silvaco** permettant d'établir le code de simulation des dispositifs électroniques et optiques. Nous avons aussi présenté les explications des différents segments du code, la définition de la structure et la description des modèles physiques utilisés pour les simulations de **Silvaco**. A la fin de ce chapitre, nous avons donné les résultats d'un exemple de simulation obtenus pour deux différentes structures de CS's : l'une à simple jonction (à base de **GaInP**) et l'autre à double jonction (tandems **GaInP/GaAs** avec 2 terminaux) en considérant l'optimisation des trois couches : la **Base**, les **Fenêtres** et la **BSF**.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-
- [1] Z. Touati, " Contribution à la modélisation non linéaire et l'optimisation des transistors à effet de champ à hétérojonction par des méthodes intelligentes, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2019.
- [2] D. Hadji, "Modélisation et simulation tridimensionnelle des composants à semiconducteur de taille submicronique", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1999.
- [3] Atlas User's Manual, DEVICE SIMULATION SOFTWARE, Silvaco, Inc, Santa Clara, CA 95054, Août 2016.
- [4] M. El-Gahouchi, "Cellules solaires multi-jonctions dupliquées pour le photovoltaïque à très haute concentration", Thèse de doctorat, Université Sherbrooke, 2021.
- [5] J. L. Gray, " The Physics of the Solar Cell", Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Chapter 3, John Wiley & Sons Inc, pp. 82–128, 2011.
- [6] A. Adaine, " Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN", Thèse de doctorat, Science des matériaux, Université de Lorraine, 2018.
- [7] O. Saket, " Caractérisation électrique de nanofils de semi-conducteurs III-V pour des applications photovoltaïques ", Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2020.
- [8] M. Elbar, "Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco", Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider Biskra, 2018.
- [9] R. K. Ahrenkiel, R., Ellingson, S., Johnston, & M. Wanlass, "Recombination lifetime of In_{0.53}Ga_{0.47}As as a function of doping density", Applied Physics Letters, 72(26), 3470-3472, 1998.
- [10] W. El-Huni, "Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V ", Thèse de Doctorat, Université Paris Saclay (COMUE)), France, 2016.
- [11] C. K. Sarkar, "Technology Computer Aided Design : Simulation for VLSI MOSFET", CRC Press, 2013.
- [12] L. djedoui, A. Aissat, A. Djemouai, & J. P. Vilcot, "Improving the efficiency of a GaInP solar cell using an AlGaAs buffer layer by optimizing the thicknesses of the PN junction", Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 17(4), 1191-1202, 2022.
- [13] C. Leon, "Adaptation des techniques de caractérisation basées sur des mesures de capacité et d'admittance aux cellules solaires multi-jonctions : expériences et modélisations", Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 2020.
- [14] M. Bayjja, " TP logiciel SILVACO ATLAS", université Abdelmalek Essaïdi, ENSA, Tétouan, 2015.
-

- [15] B. Bouanani, "Simulation et optimisation des cellules solaires monolithiques à double hétérojonctions, à base de CIGS, utilisant le logiciel atlas-silvaco", Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, 2020.
- [16] K. W. Chee, & Y. Hu, "Design and optimization of ARC less InGaP/GaAs single-/multi-junction solar cells with tunnel junction and back surface field layers", *Superlattices and Microstructures*, 119, 25-39, 2018.
- [17] L. Djedoui, A. Aissat, "Optimization of the efficiency of GaInP/GaAs Double-Junction solar cell", *SIEDD 2020 1st International Symposium Environment & Sustainable Development*, February 10 -11, 2020, Université de Relizane, Algeria, 2020.
- [18] A. Mekemeche, "Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules", Thèse de Doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
- [19] A. Luque, S. Hegedus "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, England, 2003.
- [20] L. Djedoui, A. Aissat, "Characterization of GaInP/GaAs Double Junction solar cell with InGaP and InAlGaP window layers", *WMCPV'20 Algiers*, November 25-26, CERIST - Ben Aknoun – Algiers, 2020.
- [21] S. P. Philipps, F. Dimroth, & A. W. Bett, "High-efficiency III–V multijunction solar cells". In *McEvoy's handbook of photovoltaics*, pp. 439-472, Academic Press, 2018.
- [22] J. Batey and S. L. Wright, "Energy band alignment in GaAs:(Al,Ga)As heterostructures: The dependence on alloy composition," *J. Appl. Phys.*, vol. 59, no. 1, pp. 200–209, 1986.
- [23] L. Djeoui, A. Aissat, "Efficiency of GaInP/GaAs double junction solar cell with AlGaInP BSF layer", *XIIIème Journées Maghrébines des Sciences des Matériaux JMSM'2020, Oran (Algérie)* 09–11 Mars 2020.

Chapitre IV

SIMULATION DE LA CELLULE A JONCTION SIMPLE GAINP

IV.1. Introduction

Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'amélioration des performances des cellules solaires, nous citons l'optimisation paramétrique. Cette méthode consiste à modifier un seul paramètre physico-géométrique et maintenir les autres tels qu'ils sont, tout en étudiant son impact sur les performances du dispositif. Dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrons sur l'étude et l'optimisation du rendement de conversion de la sous-CS **GaInP** à simple jonction. L'objectif de cette étude est de parvenir à une optimisation permettant d'atteindre le rendement optimal de cette sous-CS. Pour ce faire, une approche est mise en œuvre qui consiste à varier simultanément deux paramètres **physico-géométriques** de cette dernière en raison de déterminer l'ensemble de paramètres offrant le meilleur rendement de conversion.

Nous avons abordé ce défi en réalisant plusieurs tests d'optimisation menant à maximiser l'efficacité de conversion de la sous-CS. Dans une première étape, nous avons concentré nos efforts sur l'optimisation des épaisseurs des deux couches **GaInP** formant la jonction **PN** de la cellule. Ceci est très important par ce que ces épaisseurs ont une influence directe sur le rendement global de conversion.

Dans la deuxième étape, nous exploitons les paramètres de dopage et l'épaisseur de la couche **Fenêtre** du matériau **AlGaInP**. Cela se fait en ajustant ces paramètres pour le but de chercher à maximiser de l'efficacité de la CS en optimisant l'absorption de la lumière incidente. Par la suite, nous examinons l'effet de l'insertion de la couche **Tampon AlGaAs** sur les performances de la sous-CS. Notre étude s'est concentrée sur l'optimisation des paramètres de cette couche afin de trouver la configuration optimale qui minimise la recombinaison des porteurs de charge permettant l'amélioration du rendement de la sous-CS.

En revanche, afin de valider l'approche proposée et approfondir la compréhension des améliorations potentielles, nous procédons à une comparaison des résultats de simulation avec ceux reportés dans d'autres études dans la littérature. Cette comparaison nous a permis de confirmer l'efficacité de notre approche et d'identifier de nouvelles opportunités d'amélioration. Grâce à ces différentes étapes d'optimisation, tout en prenant en compte les paramètres clés mentionnés, nous avons cherché aussi à atteindre le rendement de conversion optimal pour la sous-CS GaInP.

IV.2 Etude des cellules solaires à simple jonction PN en GaInP

IV.2.1. Description de la structure

La structure modélisée de la sous-CS GaInP à simple jonction est présentée schématiquement sur la Figure IV. 1. Cette structure est constituée d'une couche GaInP dopée p et une couche dopée n , ainsi que d'une couche Fenêtre et BSF en alliage AlGaInP (Figure IV. 1a). Une couche Tampon (Buffer) de AlGaAs fortement dopée n peut être ajoutée après la couche BSF de la cellule (Figure IV.1b) pour réduire l'effet de recombinaison de surface.

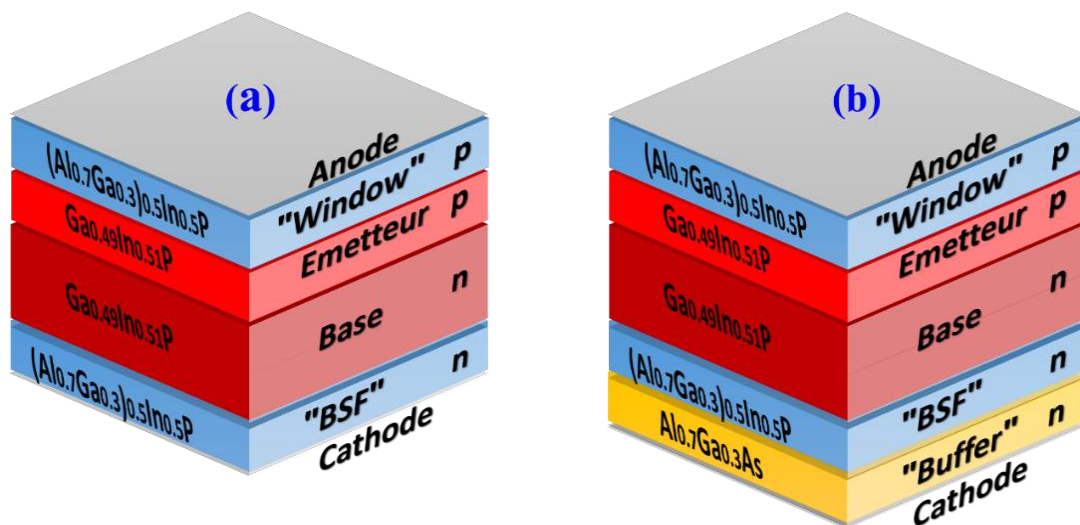


Figure IV. 1 Structure de la CSSJ PN en GaInP (a) Sans Tampon, (b) Structure proposée avec Tampon.

Les paramètres d'optimisation, les plages de valeurs ainsi que les valeurs initiales utilisées pour optimiser la structure de la sous-CS solaire PN sont répertoriés dans le Tableau IV. 1. La structure simulée a été étudiée dans un environnement de fonctionnement standard (une illumination AM1.5, une densité de puissance de $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ et une température de 300K). Ces simulations sont effectuées en utilisant l'outil Atlas, dans lequel nous avons intégré nos modèles physiques. L'outil Atlas permet de prédire les caractéristiques électriques des structures physiques à étudier en tenant compte des conditions de polarisation.

La résolution des trois équations différentielles de Poisson, de continuité et de transport, dérivées des lois de Maxwell, permet de prédire les caractéristiques électriques des cellules solaires. Ces équations sont résolues sur une grille (maillage) bidimensionnelle qui définit la structure de la sous-CS. La résolution de ces équations à chaque nœud de la grille repose sur l'utilisation de la méthode de Newton [1].

Table IV. 1 Paramètres et intervalles d'optimisation de la structure GaInP.

Couches	Matériaux	Type de Dopage	Epaisseur (μm)		Concentration (cm^{-3})	
			Paramètres initiaux [2]	Intervalles d'optimisation	Paramètres initiaux [3]	Intervalles d'optimisation
Fenêtre	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	P	0.030	[0.015 - 0.0225]	5.0×10^{17}	[1.0×10^{16} - 1.0×10^{18}]
Émetteur	$\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	P	0.550	[0.100 – 0.700]	2.0×10^{17}	–
Base	$\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$	N	0.050	[0.010 – 0.030]	7.0×10^{16}	–
BSF	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	N	0.030	–	2.0×10^{18}	–
Tampon	$\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$	N	Varié	[0.010 – 0.030]	4.7×10^{18}	[1.0×10^{18} - 8.0×10^{18}]

La structure et le maillage de la sous-CS GaInP dans le simulateur DeckBuild sont illustrés par les Figures IV.2

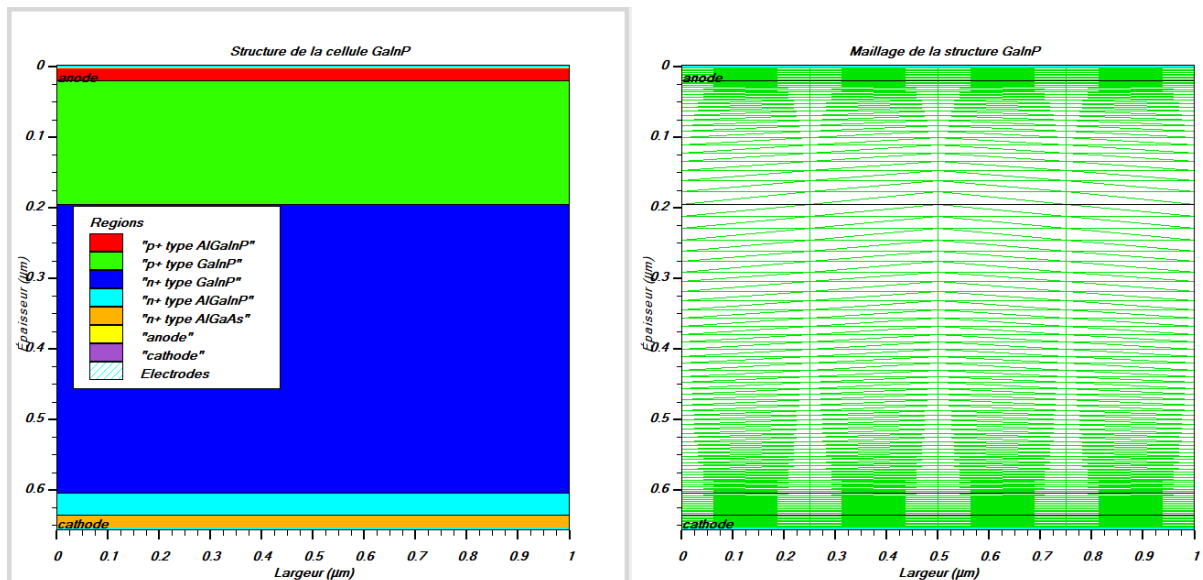


Figure IV. 2 Structure et maillage en deux dimensions de la sous-CS GaInP.

IV.2.2. Modèles et paramètres de simulation

a. Propriétés électriques

Les propriétés fondamentales des matériaux semi-conducteurs utilisés dans les simulations, comprenant des caractéristiques telles que l'énergie de bande de gap E_g , l'affinité χ ,

la permittivité ϵ_r , les densités effectives d'états $N_{B(\tilde{E})}$, les mobilités $\mu_{B(\tilde{E})}$ et les masses effectives $m_{B(\tilde{E})}$ des e^- et des h^+ sont énumérées dans le Tableau IV. 1 [4-9] :

Tableau IV. 1 Paramètres des matériaux GaAs, Ga_{0.51}In_{0.49}P, Al_{0.7}Ga_{0.3}As, et (Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P.

Paramètres	GaAs	GaInP	AlGaAs	AlGaInP
Energies de gap E_g [eV] à 300K	1.424	1.9	2.06	2.33
Constante de maille a [Å]	5.6533	5.65	5.66	5.65
Permittivité électrique ϵ_r	12.9	11.79	11.2	11.7
Affinité Electronique χ [eV]	4.07	4.08	3.54	4.2
Mass effective des électrons [m_B^*/m_0]	0.067	3	2.4	2.85
Mass effective des trous [m_E^*/m_0]	0.642	0.64	0.755	0.64
Mobilité des électrons μ_B [cm ² /(eV×s)]	8000	1945	2000	2150
Mobilité des trous μ_E [cm ² /(eV×s)]	400	141	138	141
Concentration des porteurs intrinsèque n_i (per cc)	2.1×10^6	$7.40 \times 10^{+04}$	$1.37 \times 10^{+03}$	1
v_{satB} [cm/s]	7.7×10^6	$1.00 \times 10^{+06}$	$7.70 \times 10^{+06}$	$1.00 \times 10^{+06}$
v_{satE} [cm/s]	7.7×10^6	$1.00 \times 10^{+06}$	$7.70 \times 10^{+06}$	$1.00 \times 10^{+06}$
Densité effective d'états des e^- N_B [/cm ³]	4.7×10^{17}	$1.30 \times 10^{+20}$	$4.35 \times 10^{+17}$	$1.20 \times 10^{+20}$
Densité effective d'états des h^+ N_E [/cm ³]	9.8×10^{18}	$1.28 \times 10^{+19}$	$8.16 \times 10^{+18}$	$1.28 \times 10^{+19}$

b. Propriétés optiques

Les indices optiques d'un matériau semi-conducteur, tels que l'indice de réfraction $n(\lambda)$ et le coefficient d'extinction $k(\lambda)$, revêtent une importance primordiale pour les composants opto-électroniques. Elles régissent la propagation et l'interaction de la lumière au sein de ces composants et par conséquent, influencent le fonctionnement de ces composants. A cet égard, la compréhension de ces propriétés optiques est essentielle pour la conception et l'optimisation des cellules solaires.

La modélisation avancée des dispositifs optoélectroniques, notamment les CS's, par l'outil *Atlas-Silvaco* se basent sur deux indices optiques fondamentaux pour chaque matériau $n(\lambda)$ et $k(\lambda)$ [5]. Par conséquent, il est nécessaire de définir correctement ces paramètres, qui sont déterminés à l'aide du modèle d'Adachi largement utilisé pour les matériaux composites tels que GaInP et AlGaAs. La Figure IV.3 [10-13] présente les résultats obtenus à partir de ce modèle, illustrant les variations de $n(\lambda)$ et $k(\lambda)$ en fonction de l'énergie du photon. Ces données sont

essentielles pour une modélisation précise et une compréhension approfondie des propriétés optiques de ces matériaux dans le cadre de notre étude.

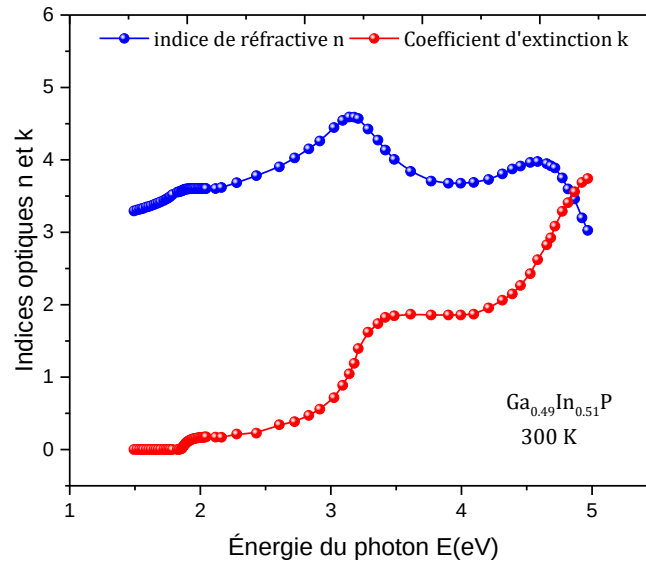


Figure IV.3 Variations des indices optiques n et k du matériau $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$.

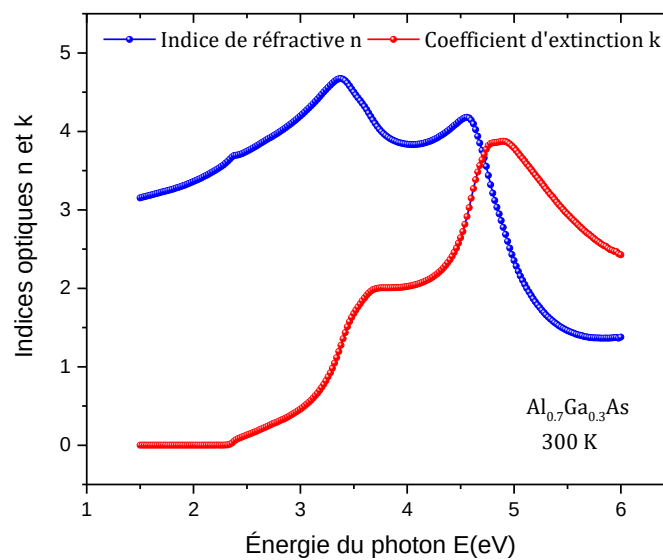


Figure IV.4 Variations des indices n et k du matériau $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$.

IV.2.3. Diagramme de bande d'énergie

Les diagrammes des bandes d'énergie et les variations du champ électrique des deux CSSJ's GaInP sont obtenus à partir de l'outil *Atlas* et qui sont reportés dans les Figures IV.5 et IV.6

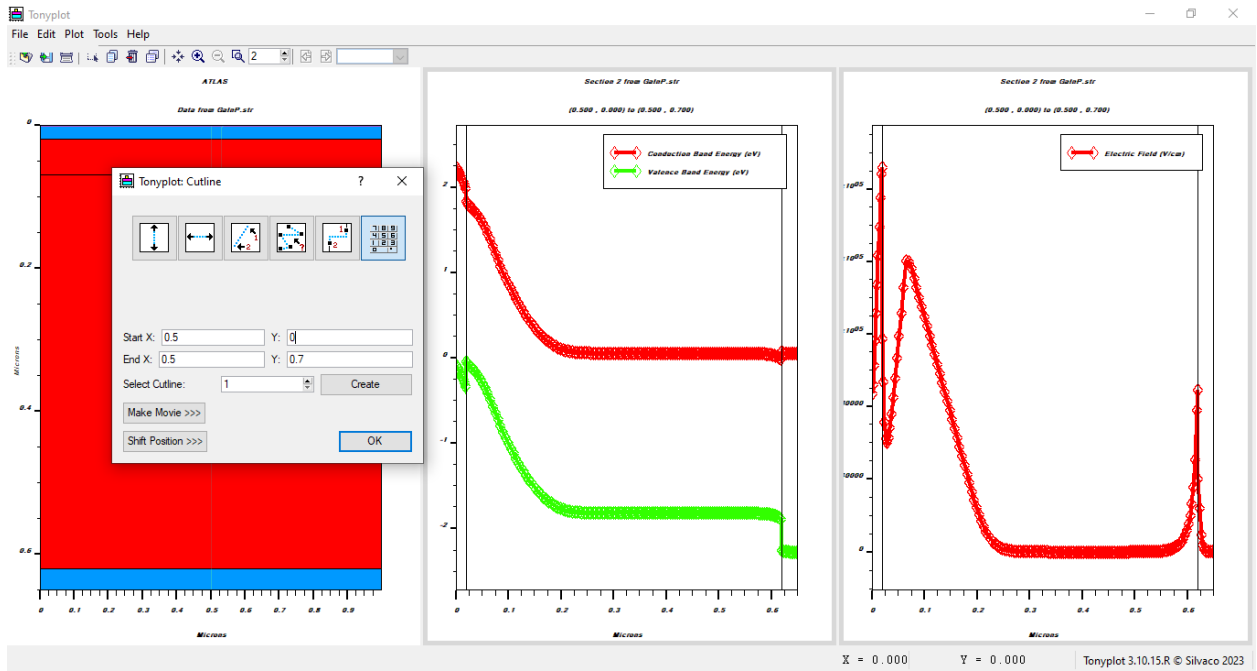


Figure IV.5 Diagramme de bandes d'énergie et champ électrique à travers la structure de la sous-CSSJ GaInP sans couche tampon.

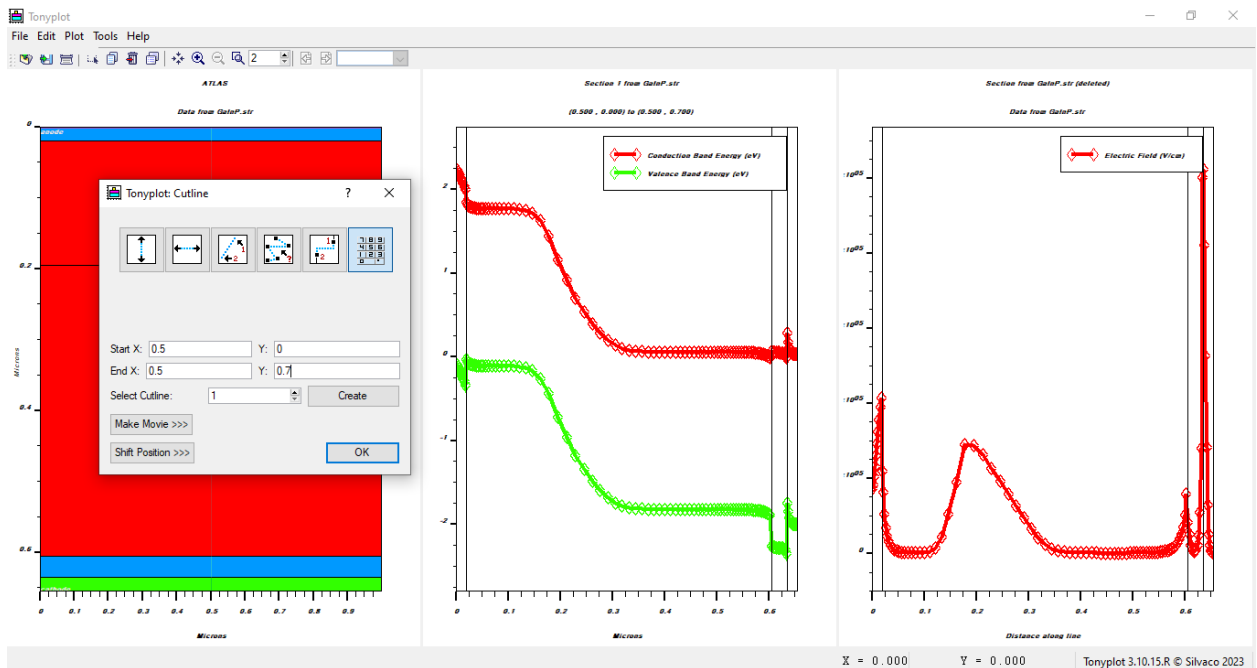


Figure IV.6 Diagramme de bandes d'énergie et champ électrique à travers la structure de la sous-CSSJ GaInP avec couche tampon.

Dans la Figure IV.7, le diagramme des bandes de la Figure IV.6 est reproduit avec un agrandissement pour bien montrer les différents détails.

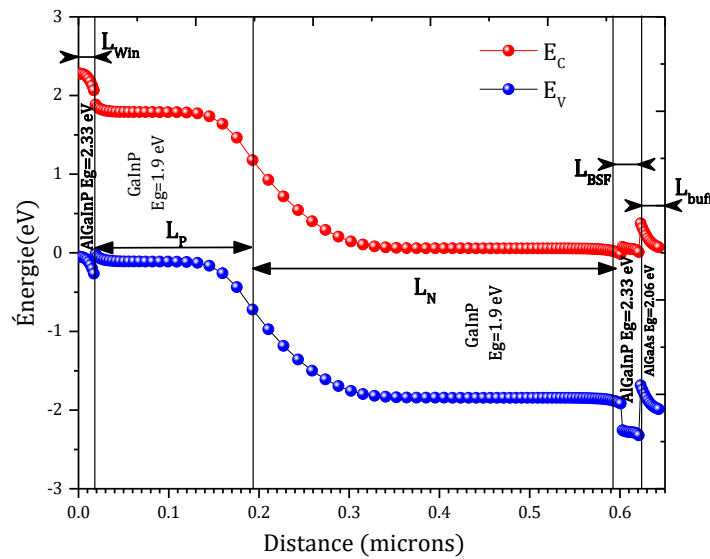


Figure IV.7 Agrandissement du diagramme de bandes d'énergie de la sous-CSSJ GaInP avec couche tampon.

IV.2.4 Performance de la sous-CSSJ GaInP

La conception des structures de cellule solaires (SC's) nécessite la considération des effets des réflexions et des interférences optiques sur les performances de ces structures. En effet, des réflexions multiples et les phénomènes d'interférence peuvent affecter les performances des dispositifs optiques tels que les SC's ou les revêtements de films minces. Le phénomène de réflexions résulte du fait que lorsque la longueur d'onde (λ) ou la profondeur de pénétration (α^{-1}) sont supérieures à l'épaisseur du dispositif (d), des réflexions multiples peuvent se produire aux interfaces du dispositif. Ceci se produit lorsque la lumière interagit avec un dispositif (comme par exemple un film mince ou une structure multicouche), une réflexion partielle de l'onde incidente peut se produire à chaque interface.

Le phénomène d'interférence se manifeste lorsque la profondeur de pénétration de la lumière est supérieure à l'épaisseur du dispositif. Dans de tel cas, les ondes réfléchies peuvent voyager aller-retour à l'intérieur du dispositif, entraînant une interférence constructive ou destructive. L'interférence constructive se produit lorsque les ondes réfléchies se renforcent mutuellement, ce qui entraîne des effets optiques améliorés tels qu'une absorption accrue ou un piégeage de la lumière amélioré. En revanche, l'interférence destructive se produit lorsque les ondes réfléchies s'annulent mutuellement, ce qui entraîne des effets optiques réduits. Pour minimiser les effets des interférences et par conséquent améliorer les propriétés optiques des structures comme l'absorption ou la transmission de la lumière, il est nécessaire d'optimiser

l'épaisseur et l'indice de réfraction des couches à l'intérieur de la structure pour maximiser l'interférence constructive et minimiser l'interférence destructive [14].

Des simulations numériques de la structure de la sous-CSSJ en $\text{Ga}_{0.49}\text{In}_{0.51}\text{P}$ ont été effectuées pour déterminer les paramètres physico-géométriques optimaux de cette structure. Afin d'améliorer les performances de la sous-CS, les épaisseurs de la base et de l'émetteur ont été optimisées en premier temps. Une couche tampon en $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ a été ensuite ajoutée pour améliorer ces performances. Finalement, les paramètres du champ de surface arrière (BSF) ont été optimisés. Les performances PV, tels que la densité de courant J_{cc} , la tension V_{co} , le rendement η et l'efficacité quantique externe EQE, ont été aussi calculés. Les caractéristiques courant-tension $J(V)$ et puissance-tension $P(V)$ ont également été extraites et tracées à l'aide de TonyPlot de l'outil Atlas-silvaco.

IV.3 Variation des épaisseurs de l'Émetteur et de la Base

L'épaisseur d'une cellule photovoltaïque (PV) influence sa performance énergétique en raison de l'absorption limitée des photons. Une diminution de l'épaisseur de la sous-cellule supérieure dans une cellule à deux jonctions redistribue la lumière et augmente le courant de la sous-cellule inférieure. Cela impacte la conversion d'énergie de la cellule PV.

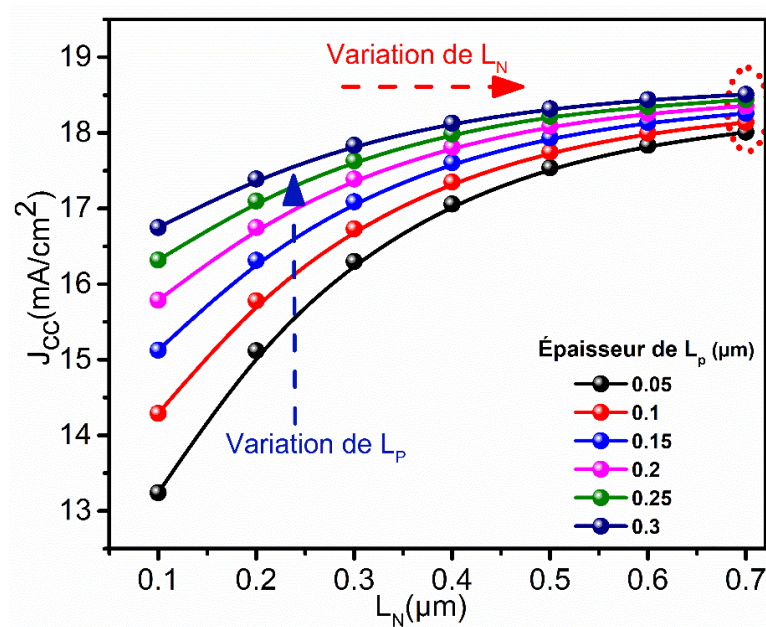


Figure IV. 8 Densité de courant J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la base L_N pour différentes épaisseurs de l'émetteur L_P .

En effet, les épaisseurs de l'émetteur et de la base entraînent la réduction de la zone de charge d'espace (ZCE) et par conséquent augmenter le champ électrique dans la jonction.

L'augmentation du champ électrique conduit à une élévation du V_{co} , tandis que la diminution de la ZCE entraîne une réduction du J_{cc} . Ainsi, ces deux tendances opposées du V_{co} et du J_{cc} contribuent à déterminer les rendements optimaux en fonction de l'épaisseur et du dopage des deux couches P et N [15].

La Figure IV.8 montre la variation de la densité de courant de court-circuit (J_{cc}) en fonction de l'épaisseur de la base (L_N) avec différentes épaisseurs d'émetteur (L_P). En modifiant l'épaisseur de la base (L_N) pour différentes épaisseurs de l'émetteur (L_P), nous constatons que les variations des deux épaisseurs peuvent modifier les propriétés optiques et électriques de la sous-CS et par conséquent, ils font influencer la génération et la collecte des porteurs de charge. Ces variations montrent qu'il y a plus d'absorption de photons optiques, ce qui se traduit par une densité de courant J_{cc} plus élevée avec l'augmentation des deux épaisseurs L_N et L_P [2]. Cette densité de courant J_{cc} atteint une saturation à 18.30 mA/cm^2 , correspondant à une épaisseur de base $L_N = 0,7 \text{ }\mu\text{m}$ (quelle que soit l'épaisseur de l'émetteur). A ce niveau le courant J_{cc} est indépendant de l'épaisseur de l'émetteur p . Nous notons également que le courant J_{cc} augmente avec l'accroissement de L_N et devient quasi-linéaire lorsque l'épaisseur L_N atteint $0,3 \text{ }\mu\text{m}$, puis devient relativement stable avec cette valeur d'épaisseur.

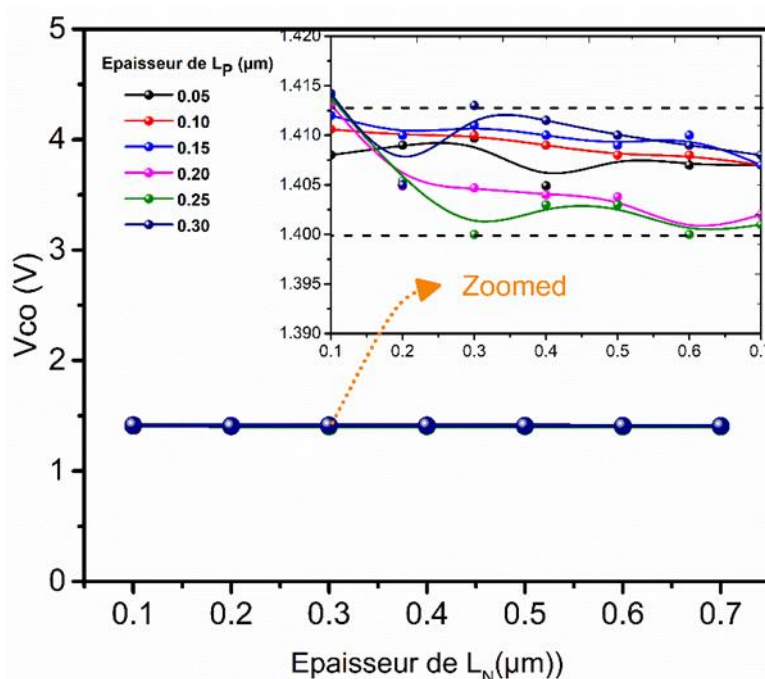


Figure IV.9 Tension V_{co} en fonction de l'épaisseur de la base L_N pour différentes épaisseurs de l'émetteur L_P .

La Figure IV.9 présente la variation de la tension en circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur L_N pour différentes épaisseurs L_P . Cette tension montre une légère diminution en fonction de l'accroissement de l'épaisseur de la couche de n-base. Elle montre aussi une légère

diminution avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche p-émetteur L_P . Par conséquent, le V_{co} est relativement indépendant de l'épaisseur de la couche d'émetteur p (L_N).

Les performances d'une CS sont évaluées à travers sa caractéristique $J(V)$ qui fournit des informations précises sur les paramètres clés de la cellule tel que le facteur de forme (FF). Cette caractéristique peut également être utilisée pour ajuster les paramètres physiques de la CS, tel que l'épaisseur des couches, permettant ainsi une optimisation précise [15]. Le FF, qui mesure la qualité d'une CS, est illustré dans la Figure IV.10. Nous observons une forte dépendance du FF vis-à-vis de l'épaisseur de la couche de base L_N . Ceci est interprété par la variation de la résistance de masse de la couche d'absorption, qui dépend de l'épaisseur de la couche de base L_N .

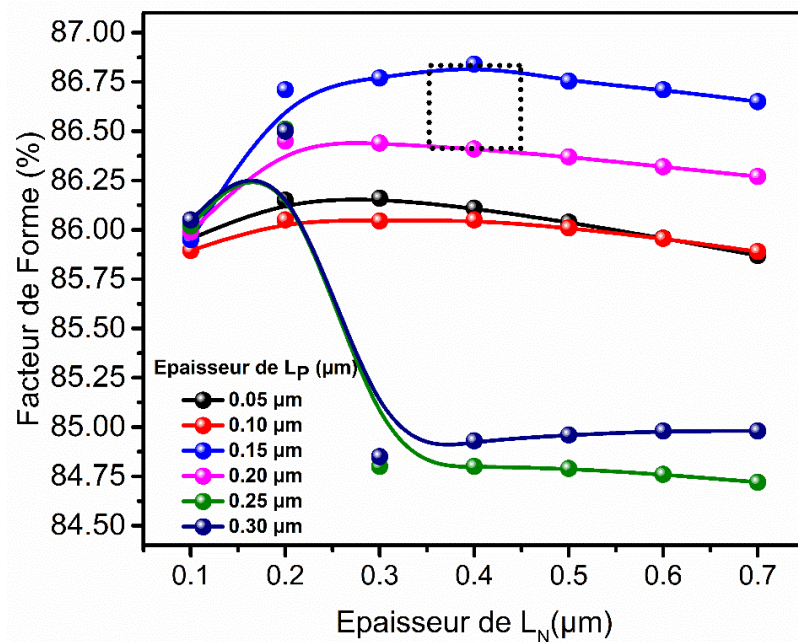


Figure IV. 10 Facteur de Forme de la sous-CSSJ GaInP en fonction de l'épaisseur L_N pour différentes épaisseurs L_P .

D'après ces résultats, la meilleure valeur du FF se situe dans la région délimitée par l'intervalle d'épaisseur [0,15 0,20] de la couche d'émetteur L_P et l'intervalle d'épaisseur [0,35 0,45] de la couche de base n. De plus, d'après la Figure IV.10, le FF diminue avec l'augmentation L_P et L_N .

IV.5 Optimisation du rendement

Comme c'est mentionné dans l'introduction de ce chapitre, dans le but d'offrir un meilleur rendement de la structure, nous allons mettre en œuvre une approche qui consiste à faire varier simultanément deux paramètres physico-géométriques tout en maintenant fixe les autres

paramètres de la sous-CSSJ. En effet, en modifiant les épaisseurs des deux couches, de la base et de l'émetteur (L_N et L_P) de la structure PN, on fait augmenter l'épaisseur de la zone de charge d'espace (ZCE), et par conséquent améliorer la génération de paires $e^- - h^+$. L'augmentation du courant J_{cc} est donc le résultat l'augmentation de la concentration de porteurs photo-générés, tandis que l'augmentation de la tension V_{co} est due à l'élargissement de la ZCE [14].

D'après les résultats précédents de courants J_{cc} , de tensions V_{co} et de facteurs de forme (FF) on remarque que les variations d'épaisseur de la couche d'émetteur p et de la couche de base dans la sous-CSSJ GaInP, dans les intervalles respectifs de [0,15 - 0,20] et [0,35 - 0,45], ont de peu d'influence sur le rendement. Par conséquent, il est difficile de déterminer les valeurs optimales de la structure uniquement à partir de ces analyses.

Afin de déterminer les valeurs optimales des épaisseurs L_{Nopt} et L_{Poppt} qui correspondent à un rendement optimal (η_{opt}) de la sous-cellule, une méthode analytique a été utilisée. Cette méthode permet l'extraction des paramètres (L_{Nopt} et L_{Poppt}) à partir des résultats expérimentaux. Dans cette approche, l'outil **Contour Profile** du logiciel **OriginLab** a été utilisé pour analyser les variations de rendement en fonction des deux épaisseurs L_N et L_P (Figure IV. 10).

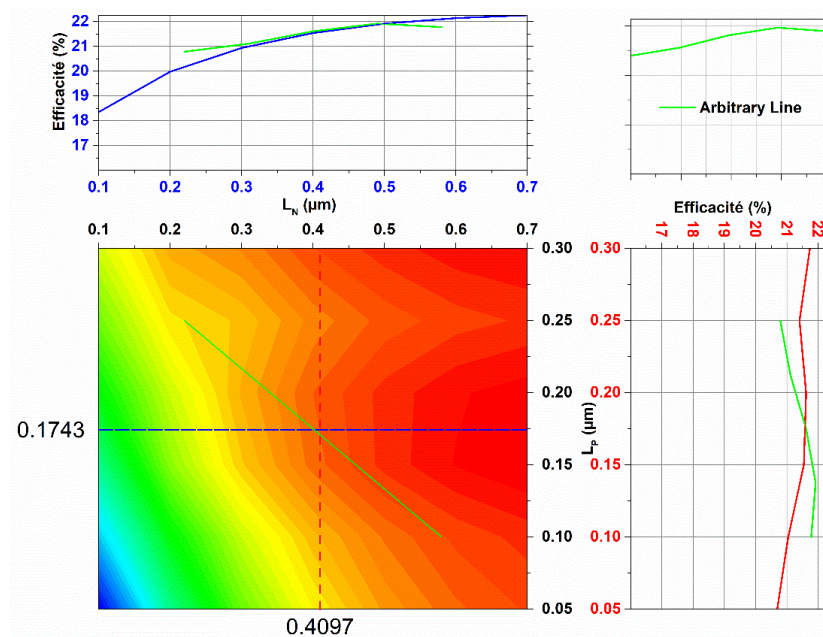


Figure IV. 11 Variation de l'efficacité η de la sous-CSSJ GaInP en fonction des épaisseurs L_N et L_P .

La fonction '**Arbitrary Line**' de l'**OriginLab** est un moyen puissant qui permet de tracer des lignes arbitraires sur un graphe et d'extraire les valeurs correspondantes des variables étudiées. Ainsi, en utilisant cette fonction, une ligne a été tracée à travers le profil de rendement en fonction des épaisseurs L_N et L_P , permettant ainsi d'extraire les valeurs optimales.

De plus, le paramètre de qualité "*mean*" (moyenne) dans la fonction *Arbitrary Line* et les épaisseurs optimales ont été déterminées à $L_P = 0,174 \mu\text{m}$ et $L_N = 0.410 \mu\text{m}$ qui correspondent à une efficacité optimale mesurée de $\eta_{opt} = 21.61\%$.

IV.6 Efficacité quantique externe de la sous-CSSJ GaInP

Parmi les facteurs déterminants de l'efficacité quantique des cellules solaires, il y'a les facteurs intrinsèques du matériau tels que le coefficient d'absorption, la vitesse de recombinaison en surface et la longueur de diffusion. Ces facteurs ne peuvent pas être modifiés une fois le matériau de la cellule solaire est choisi.

Pour évaluer les propriétés électriques des CS's, la technique de caractérisation la plus importante est l'Efficacité Quantique Externe (EQE). Cette technique est extrêmement intéressante car elle permet la compréhension du processus de la collecte des porteurs de charge en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Selon l'équation II.1, il est clair que l'efficacité quantique externe d'une CS est influencée par l'ensemble d'EQE's : $EQE_{\text{émetteur}}$, EQE_{base} et EQE_{ZCE} .

Toutefois, il est possible d'ajuster l'épaisseur des différentes couches durant le processus de conception. A cet égard, il est possible d'optimiser l' EQE_{tot} en faisant varier les épaisseurs des couches de la Base et de l'Émetteur. En particulier, deux quantités, L_P/L_E et L_N/L_B , jouent un rôle essentiel dans la détermination des deux EQE's ($EQE_{\text{émetteur}}$, EQE_{base}). Des sous-CS's GaInP ont été simulées avec différentes épaisseurs de couches de base L_N (μm) et d'émetteur L_P (μm), comme c'est illustré dans la Figure IV.12 et les caractéristiques des matériaux correspondants sont reportées dans le Tableau IV.2. Les courbes EQE's résultantes de cinq de ces échantillons sont illustres dans la Figure IV.12.

La première observation que nous constatons est que l'augmentation de l'épaisseur de la base L_N entraîne une augmentation du courant J_{cc} . Cette augmentation du J_{cc} est principalement due à une réponse accrue dans le spectre rouge, ce qui est cohérent avec les épaisseurs les plus importantes de la base L_N (courbes verte et violette). Cette constatation suggère que l'absorption de la lumière dans la partie rouge du spectre électromagnétique est améliorée avec une base plus épaisse, ce qui conduit à une augmentation de la génération de courant dans la sous-CS. La diminution de l'EQE suggère une absorption insuffisante de la lumière dans la sous-CS, en raison d'une faible épaisseur de base (courbes rouge et bleue). A partir de ces résultats nous observons que l'EQE de la sous-CS augmente avec l'augmentation de l'épaisseur L_N jusqu'à un certain seuil.

Au-delà de ce seuil, l'augmentation de l'épaisseur L_N a peu ou pas d'impact sur le rendement quantique.

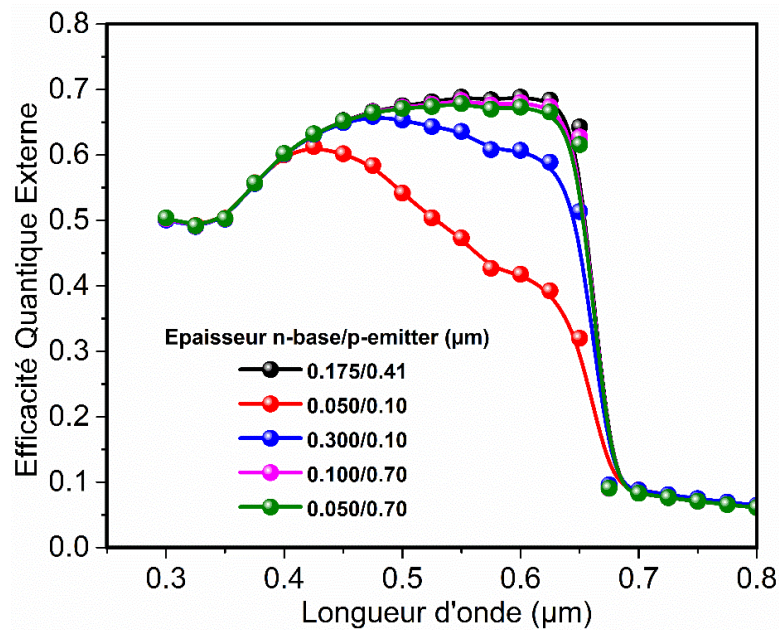


Figure IV. 12 Variations de l'efficacité EQE de la sous-CSSJ GaInP en fonction de λ pour différentes épaisseurs L_p/L_n .

En revanche, l'augmentation de l'épaisseur L_P a tendance à diminuer l'EQE dans la plupart des cas. La raison derrière cela réside dans le fait que l'énergie nécessaire pour les trous est plus élevée que celle des électrons. D'après la Figure IV.12 la valeur d'EQE optimale de la sous-CSSJ GaInP est de 0,688. Cette valeur est obtenue avec des épaisseurs optimales de la base $L_N=0,410 \mu\text{m}$ et de l'émetteur $L_P=0,175 \mu\text{m}$. L'EQE optimisée est obtenue dans la plage de longueur d'onde de $\lambda=550 \text{ nm}$. Ce résultat est très significatif en comparaison avec celui rapporté dans la littérature [17], où une valeur optimale d'EQE de 0,672 a été signalée pour la sous-cellule supérieure ce qui prouve la validité de notre approche.

IV.7 L'impact de la couche Fenêtre (Window)

Afin d'étudier l'impact des paramètres de la couche Fenêtre sur l'efficacité η , l'épaisseur et la concentration de dopage des autres couches ont été maintenues à leurs valeurs initiales et optimales. Ensuite, nous avons varié l'épaisseur L_{win} et la concentration de dopage N_{win} de la couche de fenêtre dans les intervalles de 0,0150 à 0,0225 μm et de 1×10^{16} à $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, respectivement. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure IV.13.

Notons que l'efficacité η atteint un maximum pour une concentration de dopage N_{win} de $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, puis commence à diminuer avec l'augmentation de la concentration. De plus, le

rendement augmente lentement avec l'augmentation de l'épaisseur de la fenêtre (avec un pas de 0,1% qui correspond à une variation de 0,0025 μm).

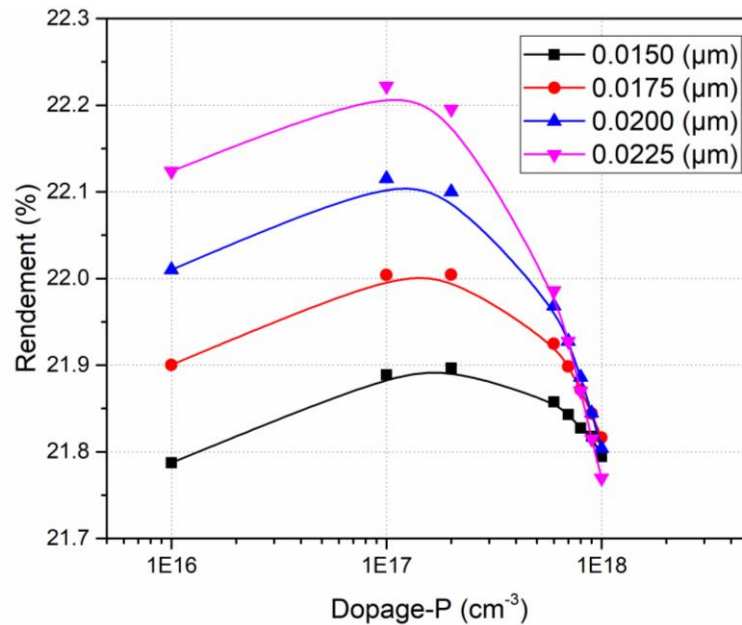


Figure IV.13 Variation de l'efficacité η de la sous-CSSJ GaInP en fonction de la concentration de dopage du Fenêtre pour différentes épaisseurs.

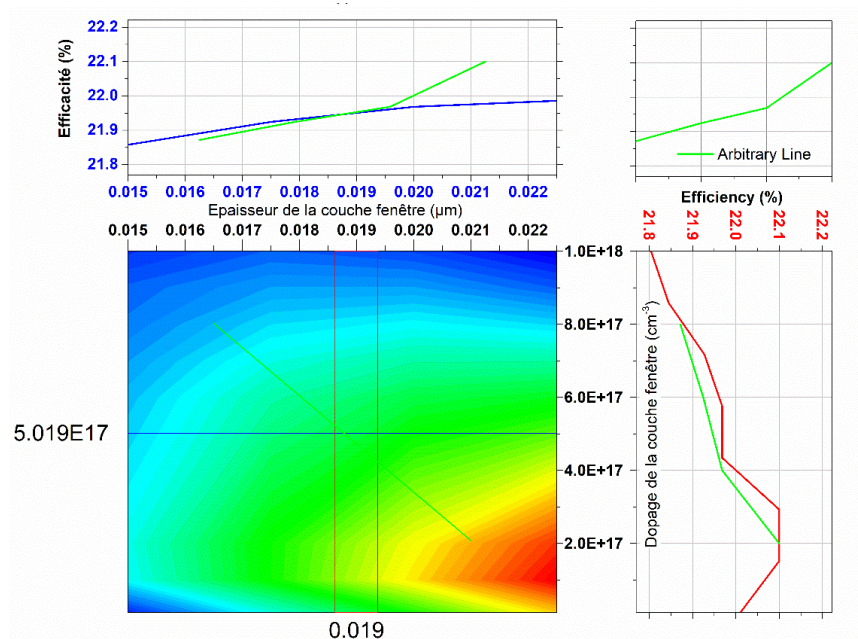


Figure IV.14 Valeurs optimales du dopage et de l'épaisseur de la couche fenêtre déduites de l'efficacité de la sous-CSSJ GaInP.

De la même manière que pour l'optimisation de la jonction PN de la sous-CSSJ GaInP, nous avons utilisé la méthode analytique précédemment mentionnée pour extraire les paramètres optimaux de la couche fenêtre. Ces paramètres ont été obtenus en analysant les variations de

l'efficacité η de la sous-CS en fonction des épaisseurs et de dopage de la couche fenêtre, comme illustré dans la Figure IV.14.

La valeur maximale du rendement est obtenue en optimisant à la fois l'épaisseur (L_{win}) et la concentration de dopage (N_{win}) de la couche Fenêtre. Ainsi, les valeurs des paramètres correspondent à l'efficacité maximale sont : $L_{win} = 0,019 \mu m$ et $N_{win} = 5,019 \times 10^{17} cm^{-3}$. Ces paramètres permettent une transmission adéquate de la lumière incidente à travers la couche Fenêtre tout en minimisant les pertes (par réflexion et par absorption).

IV.8 L'insertion de la nouvelle couche Tampon (Buffer)

La couche **Tampon** contribue à réduire la dispersion des porteurs de charge, de sorte que ces porteurs s'accumulent près de cette couche, augmentant ainsi le taux de photo-génération [18]. Le choix de cette couche mince et fortement dopée ($> 10^{18} cm^{-3}$) est fait en tenant compte de certains critères importants. Tout d'abord, l'énergie de bande interdite de cette couche doit être supérieure à celle de la base. De plus, il est essentiel que la couche tampon présente une faible vitesse de recombinaison de surface.

Dans le but d'améliorer les performances de notre structure, une couche **Tampon** (Buffer) en **AlGaAs** a été ajoutée à la sous-CSSJ **GaInP**. Cette couche Tampon a été intégrée en augmentant le dopage du matériau semi-conducteur à proximité des surfaces. Ceci a comme effet la création d'une jonction supplémentaire de type **n-n⁺** située en bas de la sous-cellule. Cette jonction supplémentaire joue un rôle crucial dans l'amélioration de la collecte des porteurs de charge et la réduction des pertes de recombinaison.

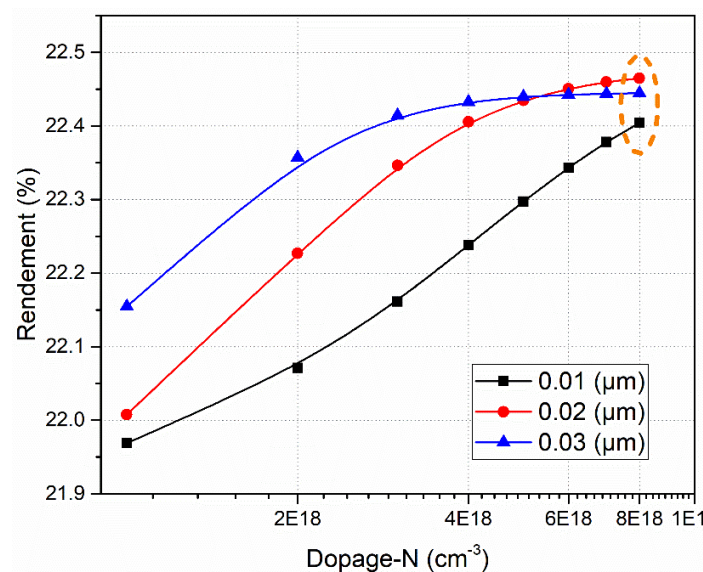


Figure IV.15 Variation de l'efficacité η de la sous-CSSJ GaInP en fonction du dopage de Tampon AlGaAs pour différentes épaisseurs.

La Figure IV.15 illustre la dépendance de l'efficacité η de la sous-structure en fonction de concentration de dopage N_{tampon} pour différentes épaisseurs d_{tampon} . Nous notons que l'efficacité η atteint un maximum pour une concentration de dopage $N_{\text{tampon}} = 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, et reste relativement stable avec une augmentation de la concentration dépassant cette valeur. On constate aussi que la concentration à croit progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche tampon dans la plage de concentration de dopage du tampon N_{tampon} , $[1 \times 10^{18}, 6 \times 10^{18}] \text{ cm}^{-3}$, puis commence à diminuer en dehors de cette plage.

La Figure IV.16 illustre l'efficacité η de la sous-CSSJ GaInP en fonction de deux paramètres d_{tampon} et N_{tampon} (l'épaisseur et concentration de dopage) de la couche tampon. A partir des résultats reportés de l'efficacité, on peut déterminer les valeurs optimales de ces paramètres permettant l'amélioration des performances de la sous-CS.

Dans la Figure IV. 13, une valeur optimale de l'efficacité $\eta = 22.41\%$ a été observée pour une épaisseur de tampon $d_{\text{tampon}} = 0.0199 \mu\text{m}$ et une concentration de dopage de tampon $N_{\text{tampon}} = 4.75 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Nous constatons que la présence de la couche tampon en AlGaAs entraîne une amélioration de l'efficacité de conversion η en raison de la réduction du taux de recombinaison dans cette zone.

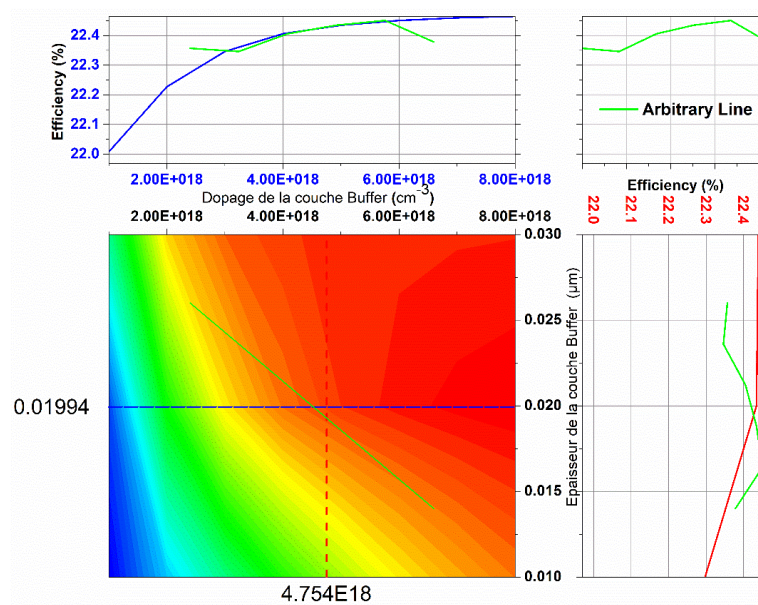


Figure IV.16 Valeurs optimales du dopage et de l'épaisseur de tampon AlGaAs déduites de l'efficacité η de la sous-CSSJ GaInP.

IV.9 Comparaisons des performances

III.9.1 Comparaison de structures sans et avec couche tampon

Dans la Figure IV.17, nous avons présenté les caractéristiques courant-tension $J(V)$ de trois structures : la structure avec les paramètres initiaux, la structure optimisée sans tampon et

la structure optimisée avec tampon. En analysant les courbes reportées dans cette figure, nous constatons des différences significatives dans les performances des cellules solaires. Plus précisément, la structure avec tampon présente des performances légèrement supérieures aux autres structures. Son rendement atteint 22,43%, ce qui est légèrement plus élevé que le rendement de la structure optimisée sans tampon (21,65%) et celui de la structure avec les paramètres initiaux (20,51%). Cela suggère que l'ajout du tampon contribue à améliorer les performances de la CSSJ GaInP.

Cette observation souligne l'importance de l'optimisation des paramètres physico-géométriques, y compris l'épaisseur et la concentration de dopage de la couche tampon, pour améliorer les performances de la sous-CS. Les résultats obtenus soulignent l'efficacité de l'approche d'optimisation appliquée qui permet d'atteindre des rendements plus élevés et d'améliorer l'efficacité énergétique de la CSSJ GaInP.

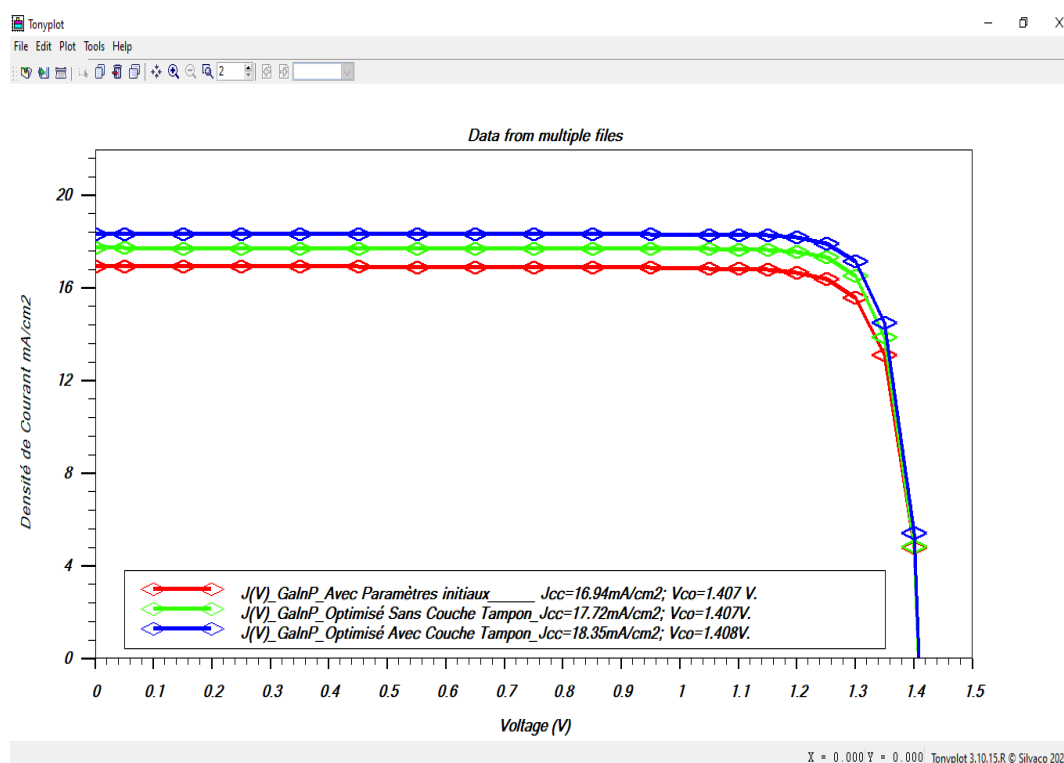


Figure IV.17 Caractéristiques $J(V)$ de la sous- CSSJ GaInP (paramètres initiaux, sans tampon et avec tampon).

La disparité entre les performances de ces différentes structures s'explique par le fait que, dans le cas de la structure avec couche tampon, le courant de court-circuit (J_{cc}) est légèrement supérieur à celui de la structure sans couche tampon. En effet, comme c'est le cas pour la structure avec AlGaAs, l'introduction de la couche tampon dans la structure permet d'élargir la zone de charge d'espace (ZCE) et, par conséquent, améliorer la génération de paires (e^- , h^+)

La couche tampon joue un rôle essentiel en créant un champ électrique en face arrière, ce qui réduit la valeur effective de la vitesse de recombinaison des porteurs. Elle agit comme une seconde barrière de potentiel pour les trous minoritaires (Figure IV.5 et IV.6)

IV.9.2 Caractéristiques J-V et P-V de la sous-CSSJ GaInP

La courbe J(V) représente la relation entre le courant de sortie de la cellule solaire et la tension appliquée à ses bornes. Quant à la courbe P(V), elle montre à son tour la puissance de sortie de la sous-CS en fonction de la tension. Ces courbes sont essentielles pour l'évaluation des performances globales de la CS et pour la détermination des paramètres optimaux tels que le rendement, la densité de courant et la tension de fonctionnement.

Le Tableau IV.3 présente les paramètres optimaux de la sous-CSSJ GaInP optimisée, tandis que la Figure IV.18 montre les caractéristiques courant-tension J(V) et puissance-tension P(V) correspondantes. Les paramètres optimaux obtenus ont été soigneusement sélectionnés pour maximiser les performances de la sous-CS.

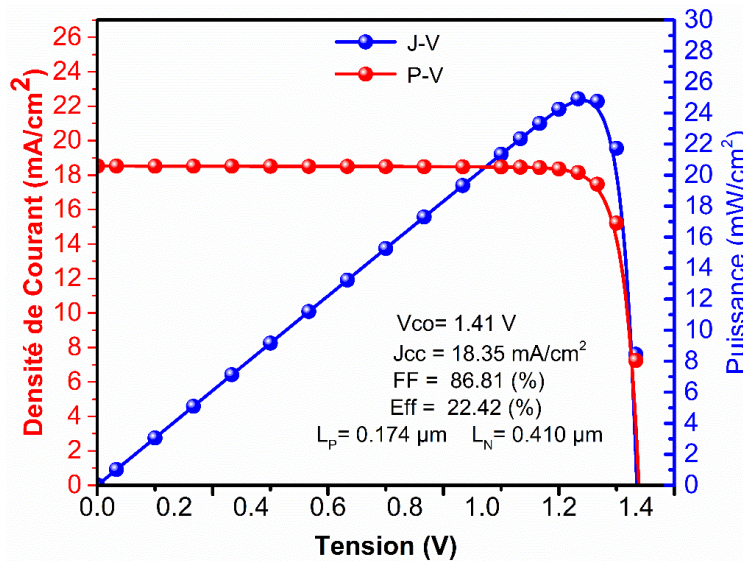


Figure IV.18 Caractéristiques J(V) et P(V) de la sous-CSSJ GaInP optimisée.

Les paramètres optimaux de la sous-CSSJ GaInP correspondant au point de puissance maximale (MPP) sont les suivants :

- ✚ Tension au point de puissance maximale (V_{opt}) : 1.25 V
- ✚ Courant au point de puissance maximale (I_{opt}) : 17.94 mA/cm²
- ✚ Puissance maximale (P_{max}) : 22.44 mW/cm²

Les performances d'une sous-CSSJ GaInP sont directement affectées par leur paramètre physico-géométriques ainsi que par la présence de la couche Tampon en AlGaAs. Ces paramètres

ont un impact significatif sur l'augmentation relative du courant J_{cc} , du facteur FF et de l'efficacité η . Les valeurs optimales de ces paramètres sont répertoriées dans le Tableau IV.3.

Tableau IV.3 Caractéristique et paramètres de la sous-CSSJ GaInP optimisé.

CSSJ	J_{cc} ($\frac{mA}{cm^2}$)	V_{co} (V)	FF (%)	η (%)	Émetteur	Base	Fenêtre		Tampon	
					L_p (μm)	L_n (μm)	L_{win} (μm)	N_{win} (cm^{-3})	L_{buff}	P_{buff} (cm^{-3})
GaInP	18.35	1.41	86.81	22.43	0.174	0.410	0.019	5.0×10^{17}	0,020	$4,754 \times 10^{18}$

IV.9.3 Validation des résultats

Le Tableau IV.4 présente une comparaison des paramètres clés, évalués sous un éclairement AM1.5, de la sous-cellule proposée et des cellules publiées. Nous observons que la sous-cellule proposée présente un rendement de conversion η nettement élevé de 22,42%, surpassant les cellules publiées qui atteignent en moyenne 19,14%. Cette amélioration est attribuée à l'optimisation des paramètres de conception, telles que l'épaisseur et la concentration de dopage de l'émetteur et de la base, ainsi qu'à l'utilisation de matériau AlGaAs performants dans la structure de la sous-CS.

Tableau. IV.4 Comparaison des paramètres importants de la sous-CS proposée et des CS's publiées sous un éclairement AM1.5.

Description [Réf]	Épaisseur de la structure (μm)	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (V)	FF (%)	η (%)
CSSJ GaInP [19]	2.380	28.79	1.39	86.90	17.40
CSSJ GaInP [20]	2.380	15.12	1.39	87.90	18.49
CSSJ GaInP [21]	0.910	10.60	1.26	85.25	13.34
CSSJ GaInP [22]	0.930	13.50	1.37	88.00	16.40
CSSJ GaInP [23]	1.000	16.00	1.46	89.30	20.80
CSSJ GaInP [24]	0.680	16.79	1.50	90.25	21.85
CSSJ GaInP [25]	0.860	14.80	1.41	88.67	18.55
CSSJ GaInP [26]	-	16.63	1.47	90.20	22.00
CSSJ GaInP [27]	1.070	16.75	1.45	86.11	20.99
CSSJ GaInP [28]	0.725	18.33	1.44	85.60	21.59
GaInP proposée [29]	0.650	18.35	1.41	86.81	22.42

En ce qui concerne le courant de J_{cc} , la cellule proposée génère un courant de 18.35 mA/cm^2 supérieur à la moyenne des cellules publiées qui est de 16.73 mA/cm^2 . Cette caractéristique démontre une bonne génération de courant et une efficacité élevée de la conversion photovoltaïque dans la cellule proposée. En revanche, la tension V_{co} de la sous-cellule proposée est légèrement inférieure à celle des cellules publiées, avec une valeur de 1.41 V comparée à la moyenne des cellules publiées de 1.42 V. Cela peut être dû à des différences dans

les matériaux utilisés ou à d'autres paramètres de conception qui influencent la tension en circuit ouvert. Le **FF** de la sous-CS proposée est de l'ordre de **86,81%**, tandis que pour les cellules publiées la valeur moyenne du **FF** de **87,81%**. Cette caractéristique indique une utilisation efficace de la puissance disponible dans la cellule proposée, ce qui contribue à une efficacité globale plus élevée de la sous-CSSJ **GaInP**.

En résumé, les résultats obtenus, dans le tableau **IV.4**, mettent en évidence les performances supérieures de la sous-CS proposée par rapport aux cellules publiées, en termes d'efficacité η , de courant J_{cc} , de facteur **FF** et de rendement **EQE**. De plus il faut noter que l'épaisseur totale de la structure de la CS proposée est le plus faible comparée aux épaisseurs des autres structures. Ces résultats confirment l'efficacité et l'optimisation de la cellule proposée, ouvrant ainsi la voie à des avancées significatives dans le domaine de la conversion photovoltaïque et en particulier pour les cellules à double jonction du groupe III V.

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, des simulations numériques ont été effectuées pour déterminer les paramètres optimaux de la structure de la sous-cellule solaire à simple jonction en **Ga_{0.49}In_{0.51}P**. Dans un premier temps et afin d'améliorer les performances de la sous-CS, les épaisseurs de la base et de l'émetteur ont été optimisées. Ensuite, une couche tampon en **Al_{0.7}Ga_{0.3}As** a été ajoutée pour améliorer ces performances. Enfin, les paramètres de la fenêtre en **(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P** ont été optimisés aussi. Les performances **PV**, telles que la densité de courant J_{cc} , la tension V_{co} , le rendement η et l'efficacité **EQE**, ont été calculées. Les caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ ont également été extraites et tracées à l'aide de **TonyPlot** de l'outil **Atlas-Silvaco**.

Les résultats de simulation de la cellule ont montré une amélioration de l'efficacité, avec une densité de courant J_{cc} de **18,35 mA/cm²**, une tension V_{co} de **1,41 V** et un facteur **FF** de **86,81%**. La sous-CS est simulée dans des conditions de **1 soleil** et du spectre solaire **AM1.5G** à **25°C** avec une épaisseur totale du dispositif de **0,650 μm** présente une efficacité (η) de **22,42%** et une **EQE** optimale de **0,688**. Les résultats de simulation de la CS ont été obtenus en utilisant les paramètres optimaux suivants : une épaisseur de couche de base **n** de **0,410 μm**, une épaisseur de couche d'émetteur **p** de **0,174 μm**, une épaisseur de la couche Fenêtre **AlGaInP** (de **0.019 μm** et un dopage de **5.019x10¹⁷ cm⁻³**) et une couche tampon **AlGaAs** d'épaisseur **0,02 μm** et dopage de **4,75x10¹⁸ cm⁻³**. Une étude comparative avec d'autre cellules solaires publiées nous a permis de noter que l'efficacité de conversion (η) de la CS proposée est de **22,42%** dépassant la moyenne des cellules publiées qui atteignent **19,14%** à **AM1.5**.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-
- [1] M. O. Gómez, "TCAD Modelling, simulation and characterization of III-V multijunction solar cells", Thèse de doctorat, Université de Polytechnique de Madrid, 2018.
 - [2] O. Vetterl, A. Lambertz, A. Dasgupta, F. Finger, B. Rech, O. Kluth, & H. Wagner, "Thickness dependence of microcrystalline silicon solar cell properties", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 66(1-4), 345-351, 2001.
 - [3] M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur, "HANDBOOK SERIES ON SEMICONDUCTOR PARAMETERS", VOLUME 2: Ternary and Quaternary A₃B₁ Semiconductors, World Scientific, Singapore, New Jersey London, Hong Kong, 1999.
 - [4] S. Adachi, "GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As: Material parameters for use in research and device applications", *Journal of Applied Physics*, 58(3), R1-R29, 1985.
 - [5] S. Michael, & A. Bates, "The design and optimization of advanced multijunction solar cells using the Silvaco ATLAS software package", *Solar energy materials and solar cells*, 87(1-4), 785-794, 2005.
 - [6] M. Schubert, V. Gottschalch, C. M. Herzinger, H. Yao, P. G. Snyder, J. A. Woollam, "Optical constants of Ga_xIn_{1-x}P lattice matched to GaAs", *Journal of Applied Physics*, 77(7), 3416, 1995.
 - [7] Y. A. Goldberg, "Gallium indium phosphide (Ga_xIn_{1-x}P) ", *Handbook Series on Semiconductor Parameters: Volume 2: Ternary and Quaternary III-V Compounds*, 37-61, 1996.
 - [8] Y. A. Goldberg, "Aluminium gallium arsenide (Al_xGa_{1-x}As)", *Handbook Series on Semiconductor Parameters: Volume 2: Ternary and Quaternary III-V Compounds*, 43(F43m), 1-36, 1996.
 - [9] K. J. Singh, S. K. Sarkar, "Highly efficient ARC less GaInP/GaAs DJ solar cell numerical modeling using optimized InAlGaP BSF layers", *Optical and Quantum Electronics*, 43(1), 2012.
 - [10] Atlas User's Manual, DEVICE SIMULATION SOFTWARE, Silvaco, Inc, Santa Clara, CA 95054, Août 2016.
 - [11] D. E. Aspnes, A. A. Studna, "Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV", *Physical review B*, 27(2), 985, 1983.
 - [12] M. Schubert, V. Gottschalch, C. M. Herzinger, H. Yao, P. G. Snyder, J. A. Woollam, "Optical constants of Ga_xIn_{1-x}P lattice matched to GaAs", *Journal of Applied Physics*, 77(7), 3416, 1995.
 - [13] O. J. Glembocki, K. Takarabe, "Aluminum gallium arsenide (Al_xGa_{1-x}As)". *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press, 513, 1997.
 - [14] P. Würfel and U. Würfel, "Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts", Livre, John Wiley & Sons, 2016.
 - [15] A. Adaine, "Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaP", Thèse de Doctorat de L'Université de Lorraine, 2018.
-

- [16] G. Hamon, "III-V/Si tandem solar cells : an inverted metamorphic approach using low temperature PECVD of c-Si(Ge)", Thèse de doctorat, Université Paris-saclay, 2018.
- [17] J. Verma, P. Dey, A. Prajapati, T. D. Das, "Multi BSF Layer GaInP/GaAs High Efficiency Solar Cell", In. Proc, ISOC 2017, 11th International Conference on Intelligent Systems and Control, National Institute of Technology, Arunachal Pradesh, India, 2017.
- [18] H. R. Arzbin, A. Ghadimi, "Improving the performance of a multi-junction solar cell by optimizing BSF, base and emitter layers", *Materials Science and Engineering : B*, 243, 108-114, 2019.
- [19] T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita, M. Ohmori, "Structural optimization for single junction GaInP solar cells", *Solar energy materials and solar cells*, 35, 25, 1994.
- [20] M. J. Yang, M. Yamaguchi, T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita, M. Ohmori, "Photoluminescence analysis of GaInP top cells for high-efficiency multi-junction solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 45(4), 331, 1997.
- [20] J. W. Leem, Y. T. Lee, J. S. Yu, "Optimum design of GaInP/GaAs dual-junction solar cells with different tunnel diodes", *Optical and quantum electronics*, 41(8), 605, 2009.
- [22] S. Lu, L. Ji, W. He, P. Dai, H. Yang, M. Arimochi, M. Ikeda, "High-efficiency GaAs and GaInP solar cells grown by all solid-state molecular-beam-epitaxy", *Nanoscale research letters*, 6(1), 1, 2011.
- [23] J. F. Geisz, M. A. Steiner, I. Garcia, S. R. Kurtz, D. J. Friedman, "Enhanced external radiative efficiency for 20.8% efficient single-junction GaInP solar cells", *Applied Physics Letters*, 103(4), 041118, 2013.
- [24] P. P. Nayak, J. P. Dutta, G. P. Mishra, "Efficient GaInP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 325, 2015.
- [25] A. Benlekhdim, A. Cheknane, L. Sfaxi, H. S. Hilal, "Efficiency improvement of single-junction GaInP solar cells by advanced photovoltaic device modeling", *Optik*, 163, 8, 2018.
- [26] K. W. Chee, Y. Hu, "Design and optimization of ARC less GaInP/GaAs single-/multi-junction solar cells with tunnel junction and back surface field layers", *Superlattices and Microstructures*, 119, 25, 2018.
- [27] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao, "Solar cell efficiency tables (version 56)", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(7), 629, 2020.
- [28] M. Benaicha, L. Dehimi, F. Pezzimenti, F. Bouzid, "Simulation analysis of a high efficiency GaInP/Si multijunction solar cell", *Journal of Semiconductors*, 41(3), 032701, 2020.
- [29] L. djedoui, A. Aissat, A. Djemouai, & J. P. Vilcot, "Improving the efficiency of a GaInP solar cell using an AlGaAs buffer layer by optimizing the thicknesses of the PN junction", *Dig. J. Nanomater. Bios.*, 17(4), 1191-1202, 2022.

CONCLUSION GENERALE

Les cellules solaires en couche mince à base de composés **III-V** sont des dispositifs optoélectroniques bien adaptés pour les applications en jonctions multiples. Dans ce contexte, de nombreux travaux de recherche sont menés pour le développement de cellules solaires multi-jonctions **III-V/Si** permettant d'atteindre une efficacité de conversion très élevée de l'ordre de **30%** ou plus. Pour cette raison, le seuil d'efficacité de la sous-cellule supérieure à base d'un matériau composé **III-V** doit être supérieur à **20%**. Cependant, l'optimisation de la cellule à double jonctions **GaInP/GaAs** doit nécessairement passer par l'amélioration des paramètres de sous-cellules **GaInP** et **GaAs**. Ceci impose l'identification des mécanismes régissant ses performances électriques puis les paramètres physico-géométriques et optique dont dépendra l'optimisation des paramètres (épaisseur, concentration de dopage, largeur de bande, etc.).

Par ailleurs, l'objectif des travaux de recherche réalisés dans cette thèse consiste à améliorer l'efficacité des sous-CS's à base de semi-conducteurs **III-V**, avec prise en compte des paramètres optimaux permettant de réduire le coût des cellules. Tout d'abord, nous avons passé en revue le développement des premières CS's au fil du temps. Pour se situer par rapport à des travaux déjà réalisés dans la littérature, nous avons présenté un état de l'art sur le développement de la sous-cellule à base de **GaInP**. Ceci nous a servi à la proposition d'une nouvelle approche d'optimisation des paramètres de la CS. En effet, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'optimisation et à la caractérisation de la structure d'une sous-CSSJ **GaInP**. En premier temps, nous avons établi une étude sur l'effet d'épaisseurs, des deux couches (base et émetteur) qui forment la jonction **PN**, en se basant sur des structures relevant de la littérature. Cela, nous a permis de proposer une nouvelle approche paramétrique qui consiste en la variation de deux paramètres à la fois au lieu d'un seul paramètre comme dans l'approche classique.

Les travaux de recherche réalisés dans cette thèse, portant sur l'étude et l'optimisation de structures de la sous-CS à base de **GaInP**, ont été appuyés par des simulations. S'agissant de l'optimisation, notre choix est porté sur la méthode d'optimisation paramétrique, approche la plus couramment utilisée pour optimiser les performances de telles structures. Cependant, les modèles de recombinaisons radiatives de SRH et d'Auger ont été employés dans les différentes simulations réalisées afin de décrire les pertes par recombinaisons directes et indirectes. De plus, pour caractériser le comportement optique des structures étudiées, nous avons utilisé le modèle d'Adachi pour décrire l'indice de réfraction (n) et le coefficient d'extinction (k) des matériaux

GaInP et **AlGaAs** en tant que constituant de base des structures étudiées. Outre l'étude d'optimisation des structures dont nous avons effectué, nous avons introduit une nouvelle couche de passivation arrière à la structure permettant la réduction des pertes de recombinaison surfacique. Enfin, nous avons étudié l'impact des paramètres de la couche fenêtre de la sous-cellule sur l'efficacité de conversion **PV**.

Il est à noter que les simulations numériques ont été réalisées dans l'environnement **Atlas**, outil jugé utile pour étudier l'influence des différents paramètres sur les dispositifs. Ces simulations ont été effectuées pour déterminer les paramètres optimaux de la structure de la sous-cellule solaire à simple jonction en **Ga_{0.49}In_{0.51}P**. Les performances **PV**, telles que la densité de courant J_{cc} , la tension V_{co} , le rendement η et l'efficacité quantique externe **EQE** ont été calculés. Les caractéristiques courant-tension $J(V)$ et puissance-tension $P(V)$ ont également été extraites et tracées à l'aide de **TonyPlot** de l'outil **Atlas-silvaco**. Les résultats de simulation de la CS montrent une nette amélioration de l'efficacité. En effet, l'efficacité calculé avec les paramètres initiaux vaut **20,51%**. Quant aux valeurs de l'efficacité issue de l'optimisation sans et avec couche tampon, elles valent respectivement **21.55%** et **22.42%**. De plus nous constatons une réduction de l'épaisseur totale de sous-cellule qui se répercute positivement sur le coût. Cela confirme bel et bien l'efficacité de notre nouvelle approche proposée ce qui en fait une approche intéressante. Une étude comparative avec d'autre cellules solaires publiées présente un rendement de conversion (η) remarquablement élevé de **22,42%**, dépassant le rendement moyen des cellules publiées qui atteignent **19,14%** à **AM1.5**. Cette amélioration significative est attribuée à l'optimisation des paramètres de conception tels que l'épaisseur et la concentration de dopage de l'émetteur et de la base, ainsi qu'à l'utilisation de matériaux performants tels que **l'AlGaAs**. Les résultats issus de la simulation en ce qui concerne notre nouvelle approche sont très satisfaisants. Ils sont évalués et ont fait l'objet d'une publication dans une revue internationale de renommée établie.

En résumé, dans notre travail de thèse, nous avons réussi à améliorer l'efficacité des sous-cellules à base de semiconducteurs **GaInP** en optimisant les paramètres de conception et en utilisant des matériaux performants. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des cellules solaires multi-jonctions **III-V** plus efficaces et à des rendements supérieurs à **32%**, avec de dimensions réduites, ce que nous envisageons comme perspectives à ce présent travail.

CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

Le travail présenté dans cette thèse a donné à un certain nombre de publications et de conférences internationales et nationales, lesquelles sont les suivantes :

- ✚ **L. Djedoui**, A. Aissat, A. Djemouai, & J. P. Vilcot, "Improving the efficiency of a GaInP solar cell using an AlGaAs buffer layer by optimizing the thicknesses of the PN junction", *Dig. J. Nanomater. Bios.*, vol. 17, no 4, p. 1191-1202, 2022.
- ✚ **L. Djedoui**, A. Aissat & J. P. Vilcot, "Optimization of the efficiency of InGaP/GaAs Double-Junction solar cell", *SIEDD 2020 1st International Symposium Environment & Sustainable Development*, February 10 -11, 2020, University of Relizane, Algeria.
- ✚ **L. Djedoui**, A. Aissat & J. P. Vilcot, "Efficiency of GaInP/GaAs double junction solar cell with AlGaInP BSF layer", *XIII^{ème} Journées Maghrébines des Sciences des Matériaux JMSM'2020*, Oran (Algérie), 09–11 Mars 2020.
- ✚ **L. Djedoui**, A. Aissat & J. P. Vilcot, "Characterization of GaInP/GaAs Double Junction solar cell with GaInP and AlInGaP window layers", *WMCPV'20 Algiers*, November 25-26, 2020, CERIST - Ben Aknoun - Algeria.
- ✚ **L. Djedoui**, A. Aissat & J. P. Vilcot, "Performance Analysis, Comparison and Optimization of GaInP Top Cell PV with Window and BSF layers" *1st- International conference on Material Science and Applications*, Feb 2023, Khenchela, Algeria.