وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة سطيف-1
UNIVERSITE SETIF -1

THESE

Présentée à la

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Pour l'Obtention du Diplôme de

Doctorat en Sciences

Par

Mr. ABDERREZEK MAHFOUD

Thème

Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement

Soutenue le : 18-02-2015 devant la commission d'examen composée de :

M. BOULOUFA A.	Prof., Université de Sétif	Président
M. DJAHLI F.	Prof., Université de Sétif	Rapporteur
M. FATHI M.	Prof., Directeur de Recherche UDES/CDER, Tipaza	Co-rapporteur
M. BELGHACHI A.	Prof., Université de Béchar	Examinateur
Mme HAFDI Z.	MCA, Université de Batna	Examinateur
M. BARTIL A.	MCA, Université de Sétif	Examinateur

Résumé

Les cellules solaires à haut rendement étant souvent basées sur la technologie des semi-conducteurs GaAs et III-V, on vise dans ce travail à améliorer les performances des cellules solaires en utilisant de nouveaux matériaux et de nouveaux concepts. L'objectif principal de ces recherches est de minimiser le coût de fabrication et/ou d'augmenter le rendement de ces photopiles. L'utilisation des cellules multijonction (Tandem), qui repose sur le concept de conversion multispectrale, conduit à une meilleure exploitation du spectre solaire, en élargissant la gamme utile du spectre. Dans un premier temps, nous simulons et optimisons la cellule tandem monolithique GaInP/GaAs, en utilisant le simulateur solaire unidimensionnel SCAPS-1D.

Afin de minimiser les pertes par thermalisation et améliorer les performances des cellules solaires, nous remplaçons la couche de verre, qui représente le matériau encapsulant dans une cellule solaire, par une couche en PMMA dopé avec des colorants optiquement actifs. Ces derniers permettent de convertir les photons de forte énergie situés dans les régions du bleu et de l'ultra-violet (où le rendement quantique *QE* de la cellule solaire est faible), vers la zone infrarouge et visible (où ce rendement *QE* est fort). Ceci permet de minimiser les pertes par thermalisation et d'améliorer les performances de la cellule solaire. Ce concept est appliqué à la cellule tandem GaInP/GaAs et à l'hétérostructure N/P GaAs avec couche fenêtre GaInP.

Mots clés : Cellules Solaires, Conversion Multispectrale, Tandem, GaInP, GaAs, PMMA, SCAPS-1D.

Abstract

Since high efficiency solar cells are often based on gallium arsenide GaAs and III-V semiconductor technology, we aim in this work at enhancing solar cell performances by using new materials and new concepts. The main objective of the present research is to minimize the manufacturing cost and/or increase the efficiency of these solar cells. The use of multi-junction cell (Tandem), which is based on the concept of multispectral conversion, leads to better utilization of the solar spectrum by widening the useful range of this spectrum. In a first step, monolithic tandem cells (GaInP/GaAs) are optimized and simulated using the one-dimensional solar simulator SCAPS-1D.

In order to minimize thermalization losses and enhance the solar cell performances, the glass layer which represents the encapsulating material in a solar cell, is substituted by a PMMA layer doped with optically active colorants. These colorants allow to convert photons of high energy, located in the blue and ultraviolet regions (where the quantum efficiency QE of the solar cell is low), towards infrared and visible region (where the quantum efficiency QE is high). This allows to minimize the thermalization losses and to improve the solar cell performances. This concept is applied to the tandem solar cell GaInP/GaAs and to the hetero-structure N/P GaAs with a GaInP window layer.

Key words: Solar cells, multispectral conversion, Tandem, GaInP, GaAs, PMMA, SCAPS-1D.

ملخص

بما أن الخلايا الضوئية ذات كفاءة التحويل العالية تعتمد غالبا على تكنولوجية أشباه النواقل من نوع زرنيخ الغاليوم (GaAs) و المواد III-V، نهدف في هذا العمل لتحسين أداء الخلايا الضوئية باستخدام مواد ومفاهيم جديدة. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تقليل تكلفة التصنيع و/ أو زيادة كفاءة التحويل لهذه الخلايا الضوئية. ان استخدام الخلايا ثنائية الوصلة، والتي تستند إلى مفهوم التحويل المتعدد الأطياف، يؤدي إلى استغلال أفضل للطيف الشمسي، من خلال توسيع نطاق الطيف المستعمل. في البداية قمنا بمحاكاة وتحسين الخلايا الضوئية ثنائية الوصلة GaInP /GaAs ، وذلك باستخدام محاك الخلايا الضوئية أحادي البعد SCAPS-1D.

لتقليل الخسائر الحرارية وتحسين أداء الخلايا الضوئية، قمنا باستبدال طبقة الزجاج، و التي تمثل مادة التغليف في الخلايا الضوئية، بطبقة من PMMA مطعمة بأصباغ نشطة ضوئيا. هذه الاخيرة تسمح بتحويل الفوتونات ذات الطاقة العالية والتي تقع في المنطقة الزرقاء وفوق البنفسجية (حيث كفاءة الكم للخلايا الضوئية منخفضة) الى منطقة الأشعة تحت الحمراء والمرئية (حيث كفاءة الكم للخلايا الضوئية مرتفعة). هذا ما يسمح من تقليل الخسائر الحرارية وتحسين أداء الخلايا الضوئية. هذا المفهوم تم تطبيقه على الخلايا الضوئية ثنائية الوصلة GaInP/GaAs و التركيب غير المتجانس N/P GaAs مع طبقة نافذة GaInP.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الضوئية، التحويل متعدد الأطياف، الخلايا ثنائية الوصلة، GaInP, GaAs, PMMA, SCAPS-1D.

Remerciements

Nos remerciements vont, en premier lieu, à Allah le tout puissant qui nous a permis d'achever ce travail par sa miséricorde.

Ma gratitude et ma reconnaissance vont à mon professeur M. Farid Djahli, Professeur à l'université de Sétif 1, pour avoir proposé et dirigé ce travail de recherche. Son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils, tout au long de cette thèse, m'ont permis d'acquérir une grande confiance et de mener à terme ce travail de recherche.

Je voudrais également remercier M. Mohamed Fathi, mon co-encadreur, Directeur de Recherche et chef d'équipe dans l'unité de développement des équipements solaires de Bou-Ismail-Tipaza, pour son aide et sa disponibilité à répondre à mes questions.

J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à M. Abdeslam BOULOUFA, Professeur à l'université de Sétif 1, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence de mon jury de thèse.

Je remercie aussi monsieur A. BELGHACHI, Professeur à l'université de Béchar, monsieur A. BARTIL, MCA à l'université de Sétif 1 et Mme Z. HAFDI, MCA à l'université de Batna d'avoir accepté de participer au jury de thèse pour examiner mon travail.

Je n'oublierai pas d'exprimer mes vifs remerciements à tout le personnel de notre département d'électronique de Sétif et à tous mes collègues chercheurs de l'unité de développement des équipements solaires de Bou-Ismail, Tipaza (UDES), pour leur soutien moral.

Je suis très reconnaissant envers ma famille, en particulier ma femme, ma mère et mon père pour leurs encouragements, la confiance et le soutien moral dont ils ont fait preuve tout au long de ces années de thèse.

Merci à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- *Mes très chers parents. Que Dieu me les garde et que vie nous donne temps pour les remercier.*
- *Ma femme et mon fils Amir,*
- *Mes beaux-parents,*
- *Mes frères et mes sœurs,*
- *Toute ma famille et ma belle-famille,*
- *A mes collègues de travail,*
- *A mes camarades de classe et*
- *A à tous mes fidèles amis,*

M. ABDERREZEK

Liste des symboles

h	constante de Planck	eV.s
ν	fréquence du photon	s^{-1}
c	vitesse de la lumière dans le vide	m/s
F(λ)	densité du flux de photons	photons.$cm^{-2}s^{-1}$
K_B	constante de Boltzmann	J/K
T	température ambiante	°K
q	charge élémentaire	C
D_n et D_p	coefficients de diffusion des électrons et des trous	cm^2/s
L_n et L_p	longueur de diffusion du porteur minoritaire dans le matériau n et p	µm
W	largeur de la zone charge d'espace	µm
λ	longueur d'onde	µm
X_j	profondeur de jonction	µm
$X_{B\text{-}GalnP}$	épaisseur de la base de la cellule supérieure	µm
N_D, N_A	concentration en impureté donneurs, accepteurs	cm^{-3}
n_i	concentration intrinsèque	cm^{-3}
J_L	densité du courant généré par la lumière	mA/cm^2
J_{CC}	densité du courant de court-circuit	mA/cm^2
J_{Inj}	densité du courant d'injection	mA/cm^2
J_{rg}	densité de courant dans la zone de charge d'espace	mA/cm^2
J_P	densité du courant de crête de la jonction	mA/cm^2
J_{Tun}	densité du courant tunnel	mA/cm^2
J_{Obs}	densité du courant d'obscurité	mA/cm^2
τ_n et τ_P	durées de vie des électrons et des trous	µs
F	facteur de tension	V
V_{CO}	tension en circuit ouvert	V
V_d	tension de diffusion	V
FF	facteur de forme	%
ŋ	rendement de conversion	%
QE	rendement quantique	%
$R(\lambda)$	coefficient de réflexion	%
LQE	Rendement quantique de fluorescence	%
Δa	désaccord de maille	%
P_{TIR}	probabilité de réflexion interne	%
R_s	résistance série	Ω
R_{sh}	résistance parallèle	Ω

R_{th}	résistivité thermique	cm k /w
U_{rad}	taux de recombinaison radiative	cm^{-3}/s
U_{SHR}	taux de recombinaison indirect	cm^{-3}/s
U_{Auger}	taux de recombinaison Auger	cm^{-3}/s
C_{p0}, C_{n0}	coefficients de capture d'Auger du trou et de l'electron	cm^{-3}/s
G_n , G_p	taux de génération optique des paires électrons trous	cm^{-3}/s
B	coefficient de la recombinaison radiative	$cm^{3/}s$
n_0	indice de réfraction de l'Air	
A	le facteur d'idéalité	
ϵ_r	permittivité relative	
K	coefficient d'extinction	
c (C_{A-B})	paramètre de "Bowing"	
$Ø_m$	travail de sortie du métal	eV
χ	affinité électronique	eV
E_i	niveau de Fermi intrinsèque	eV
ΔE_c, ΔE_V	discontinuité des bandes de conduction, de valence	eV
E_G	l'énergie de la bande interdite	eV
μ_n, μ_p	mobilité des électrons, trous	cm^2/Vs
α	coefficient d'absorption	cm^{-1}
S_n, S_p	vitesse de recombinaison en surface des électrons, trous	cm/s
a	constante de maille	A°
N_c, N_v	densité effective d'états	$1/cm^3$
N_t	densité d'états	$1/cm^3$
E	champ électrique	V / cm
P_{max}	puissance maximum	mW/cm^2
$\varepsilon\lambda$	coefficient d'extinction molaire	mol^{-1} cm^{-1}

Nomenclature

Z.C.E : Zone de charge d'espace.

AM0 : Spectre solaire hors atmosphère.

AM1.5G : Spectre solaire terrestre (global).

ASTM : American Society for Testing and Materials.

AM : Air Mass.

LED : Diode électroluminescente.

MSC : Mechanically stacked.

ARC : Anti-Reflective Coatings.

BSF : Back Surface Field.

LDS : Luminescent Down-Shifting.

UV : Ultraviolet.

PMMA : Polyméthacrylate de méthyle.

FEM : Méthode des éléments finis.

PC1D : Personal Computer One Dimension.

SCAPS-1D : Solar Cell Capacitance Simulator One Dimension.

Top-cell : Cellule supérieure

Bottom-cell : Cellule inférieure.

SOMMAIRE

Introduction générale 01

Chapitre I : La cellule solaire

I. 1 Introduction 03

I. 2 L'énergie solaire 03

I. 3 L'effet photovoltaïque 04

I. 4 Fonctionnement d'une cellule solaire 06

I. 5 Facteur influant sur le rendement de conversion d'une cellule solaire 07

I. 6 Semi-conducteurs à gaps direct et indirect 09

I. 7 Spectre solaire 10

I. 7. 1 Standardisation du spectre solaire 12

I. 8 Caractéristique I-V d'une cellule solaire 14

I. 8. 1 Caractéristique I-V sous obscurité 15

I. 8. 2 Caractéristique sous ensoleillement 15

I. 8. 2. 1 Caractéristique (J-V) dans le cas idéal 15

I. 8. 2. 1. 1 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire dans le cas idéal 16

a) La densité du courant de court-circuit (J_{SC}) 17

b) Rendement quantique de la cellule QE 18

c) Tension en circuit ouvert (V_{OC}) 19

d) Facteur de forme FF (facteur de pertes) 20

e) Rendement de conversion ŋ 20

I. 8. 2. 2 Caractéristique (J-V) dans le cas réel 21

I. 9 Les différents types de pertes dans une cellule solaire 21

I. 9. 1 Les pertes extrinsèques 21

I. 9. 2 Les pertes intrinsèques 22

I. 10 Résistances parasites 23

I. 10. 1 Résistance série 23

I. 10. 2 Résistance shunt R_{sh} 23

I. 11 La Recombinaison 24

I. 11. 1 La recombinaison radiative ou " Bande à Bande " 24

I. 11. 2 La recombinaison indirecte ou assistée (par piège) 25

I. 11. 3 La recombinaison superficielle 25

I. 11. 4 La recombinaison Auger 26
Conclusion 27

Chapitre II : Cellules solaires à multijonctions
II. 1 Introduction 28
II. 2 Pourquoi la cellule à Multijonctions 29
II. 3 Cellule solaire à Multijonctions 31
II. 3. 1 Système Multispectral 31
II. 3. 2 Système à empilement mécanique (Mechanically Stacked MSC) 32
II. 3. 3 Cellule monolithique (Tandem, Cascade ou Multicolore MC, Two-teminal Series-connected) 33
II. 4 Les défis de fabrication d'une cellule solaire tandem 35
a- Choix des matériaux et des substrats, valeur optimale du gap pour les cellules tandems en applications terrestres 35
b- Constante de réseau 36
c- Coefficient de dilatation thermique 37
d- Critère imposé sur la jonction tunnel 39
II. 5 Limite théorique dans la conception des cellules solaires à multijonctions 41
II. 6 Constituants de base d'une cellule solaire photovoltaïque à haute performance 42
II. 6.1 Passivation des faces avant et arrière de la cellule 43
II. 6.2 Couche antireflet 43
II. 6.3 Texturation de la surface 45
II. 6.4 Contacts des faces avant et arrière 46
II. 6.5 La couche fenêtre 48
II. 6.6 L'émetteur et la base 48
II. 6.7 Cellule à champ arrière "B.S.F" 48
Conclusion 49

Chapitre III : Propriétés des matériaux utilisés
III. 1 Introduction 50
III. 2 Calcul des propriétés des alliages semi-conducteurs III-V 50
III. 3 Cellule solaire tandem GaInP/GaAs 51
III. 3. 1 Structure cristalline des matériaux utilisés 53

III. 3. 2 Le matériau GaAs 54
a- Variation de la mobilité en fonction de la concentration 56
b- Durée de vie des porteurs minoritaires 56
III. 3. 3 Le matériau GaInP 57
a- Variation de la mobilité en fonction de la concentration du dopage dans le matériau GaInP (0.5) 59
b- Durée de vie des porteurs minoritaires 59
III. 3. 4 Propriétés optiques 61
a- Indice de réfraction et coefficient de réflexion 61
b- Coefficient d'absorption de GaInP 65
c- Coefficient d'absorption de GaAs 65
III. 3. 5 Résistivité thermique des matériaux GaInP et AlGaAs 66
III. 4 Matériaux utilisés dans l'encapsulation des modules 67
III. 4. 1 Principe de la photoluminescence ou Luminescent Down-Shifting (LDS) 68
III. 4. 2 L'effet photoluminescent 69
III. 4. 3 Caractéristiques de la Fluorescence 71
a- Rendement quantique de fluorescence 71
b- Coefficient d'extinction ou absorbance spécifique (ε) 71
c- Durée de vie de fluorescence (τ) 72
III. 4. 4 Matériaux encapsulant les colorants luminescents 72
Conclusion 75

Chapitre IV : Modèle mathématique de la cellule
IV. 1 Introduction 76
IV. 2 Équations de base du semi-conducteur 77
IV. 2. 1 Equation de Poisson 77
IV. 2. 2 Equation de continuité 77
IV. 3 Homo-jonction 78
IV. 3. 1 Courant d'éclairement 78
IV. 3. 2 Courant dans la région quasi-neutre N 80
IV. 3. 3 Courant dans la région quasi-Neutre P 81
IV. 3. 4 Courant dans la zone de charge d'espace 83
IV. 3. 5 Photocourant total 83

IV. 4 Hétérojonction 83
IV. 4. 1 Photocourant 85
IV. 5 Hétérojonction à effet fenêtre 86
IV. 5. 1 Contribution de la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) au photocourant 88
IV. 5. 2 Contribution de la totalité de la couche avant (fenêtre-émetteur) 88
IV. 5. 3 Contribution de la région de charge d'espace 89
IV. 5. 4 Contribution de la région de base 89
IV. 5. 5 Courant d'éclairement total 89
IV. 6 Courant d'obscurité 89
IV. 6. 1 Courant d'injection 90
IV. 6. 2 Courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace 91
IV. 6. 3 Courant tunnel 92
IV. 6. 4 Courant total d'obscurité 93
IV. 7 Simulateur numérique solaire 93
IV. 7 .1 Discrétisation 94
IV. 7. 1. 1 La méthode des éléments finis (FEM) 94
IV. 7 .1. 2 La méthode des différences finies 95
IV. 7. 2 Amélioration de la convergence du simulateur solaire en contrôlant la méthode numérique 95
IV. 7. 3 PC1D 97
IV. 7. 3. 1 Fichier utilisé durant l'exécution du PC1D 97
IV. 7. 3. 2 Fichier *.prm 97
IV. 7. 3. 3 Fichier *.mat 97
IV. 7. 3. 4 Fichier paramètres optiques 97
IV. 7. 3. 5 Le fonctionnement du PC1D 98
IV. 7. 4 SCPAS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator One Dimension) 99
IV. 7. 4. 1 Le fonctionnement du SCAPS-1D 99
IV. 7. 5 Comparaison 103
Conclusion 103

Chapitre V : Résultats et interprétations
V. 1 Introduction 104
V. 2 Tandem GaInP/GaAs 104
V. 2. 1 Simulation des cellules solaires tandems avec SCAPS-1D 104

V. 2. 2 Matériaux et méthodes 105
V. 2. 3 Résultats et discussions 106
V. 2. 3. 1 Validation du modèle 106
V. 2. 3. 2 Modélisation du tandem 107
V. 3 Effet des paramètres technologiques sur la cellule optimisée 113
V. 3. 1 Effet du dopage de la base de la cellule supérieure 113
V. 3. 1. 1 Cellule supérieure 113
V. 3. 1. 2 Cellule Tandem 115
V. 3. 2 Effet du dopage de la base de la cellule inférieure (bottom cell) 116
V. 3. 2. 1 Cellule inférieure 116
V. 3. 2. 2 Cellule Tandem 117
V. 3. 3 Effet de la couche BSF sur le rendement de la cellule tandem 119
V. 4 Etude de l'effet de la température sur la cellule solaire 121
V. 4. 1 Effet de la température sur les propriétés des matériaux 122
V. 4. 2 Effet de la température sur la cellule solaire GaAs à couche fenêtre GaInP 124
V. 4. 3 Effet de la température sur la cellule solaire tandem optimisée 130
V. 5 Etude de l'effet de la luminescence down-shifting sur les cellules solaires 132
V. 5. 1 Introduction 132
V. 5. 2 Etude l'effet de la luminescence down-shifting sur la cellule solaire GaAs avec différentes couches fenêtres 132
V. 5. 2. 1 Cascade lumineuse 134
V. 5. 2. 2 Méthode de simulation 135
V. 5. 2. 3 Résultats et discussions 136
V. 5. 3 Effet du Luminescent Down-shifting sur la cellule solaire tandem 141
V. 5. 3 Structure solaire GaInP 142
V. 5. 3. 1 Résultats et discussions 143
V. 5. 4 Tandem GaInP/GaAs avec couche LDS 147
V. 5. 4. 1 Résultats et discussions 148
Conclusion 153
Conclusion générale 154
Bibliographie 157

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'importance de l'énergie dans notre société est devenue évidente au cours des dernières années. Parmi les différentes énergies alternatives, l'énergie solaire a la propriété très souhaitable d'être essentiellement illimitée et de n'être ni polluante ni physiquement dangereuse [1].

Avec les diverses applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les domaines terrestre et spatial, l'amélioration de l'efficacité de conversion des cellules solaires devient indispensable. Cela n'est faisable qu'à travers l'amélioration des matériaux semi-conducteurs existant et le développement de nouveaux matériaux.

Bien que l'étude des matériaux semi-conducteurs ait commencé au début du XIXe siècle [2], le silicium reste le matériau le plus utilisé dans la fabrication des cellules solaires. Cela est au vu des considérations économiques (faible coût) et technologiques (meilleur comportement avec la température de croissance et de fonctionnement). Les cellules au silicium constituent 95% des panneaux photovoltaïques installés dans le monde [3].

La limitation du rendement, rencontrée dans les cellules solaires au silicium, vient principalement des sources de pertes par thermalisation ou par transmission. Afin de minimiser ces types de pertes, et pour avoir une large plage d'absorption du spectre solaire, de nouvelles solutions sont proposées.

Pour les pertes par transmission, la capacité d'absorption du spectre solaire est améliorée par l'utilisation du concept de la conversion multispectrale. Un empilement de cellules solaires, dans un ordre décroissant du gap (cellules solaires multijonction), est réalisé, où chaque cellule exploite la partie du spectre solaire adaptée à son gap.

Pour les pertes par thermalisation, l'utilisation des matériaux à conversion de photons permet de convertir les photons de forte énergie situés dans la région de l'ultraviolet vers la région visible ce qui améliore le rendement de la cellule.

Ce travail est axé sur la simulation de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs. Le but est de trouver les paramètres technologiques de la cellule solaire optimale qui respectent les conditions d'égalité du courant entre la cellule supérieure et la cellule inférieure. Il s'agit aussi d'étudier l'influence des paramètres technologiques (dopage des couches, Base et BSF) et l'effet de la température sur la structure optimisée, en utilisant un simulateur solaire unidimensionnel limité en nombre de couches. Ensuite il faudra simuler quelques hétérostructures solaires à couches minces NP et NIP à base du matériau GaAs avec couche fenêtre GaInP. On terminera par une proposition d'amélioration des cellules solaires tandem et à hétérostructures.

Cette thèse est divisée en cinq chapitres. Le premier chapitre comporte quelques définitions sur le fonctionnement de la cellule solaire, la forme et les normes du spectre solaire utilisé, la modélisation des cellules ainsi que les caractéristiques électriques définissant le comportement de la cellule sous éclairement et dans l'obscurité.

Le deuxième chapitre est consacré aux cellules solaires à multijonctions constituées de matériaux III-V, leurs avantages et leurs limites ainsi que les différents critères et conditions imposés dans leur conception.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les propriétés électriques, optiques et thermiques des matériaux constituant le modèle de la cellule durant la simulation. Ainsi nous présentons des notions importantes sur la photoluminescence et le rôle de celle-ci dans l'amélioration des cellules solaires.

Dans le quatrième chapitre nous présentons et discutons les différentes équations analytiques nécessaires à la description du modèle mathématique de la cellule solaire. Une partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation numérique qui est devenue un outil indispensable dans l'analyse et la conception des composants à semi-conducteurs.

Le cinquième chapitre est consacré à l'optimisation et l'amélioration des cellules solaires tandem monolithique GaInP/GaAs et à hétérostructures GaInP/GaAs. Nous étudierons aussi, dans ce chapitre, l'effet de la température et des paramètres technologiques sur les performances des cellules proposées dans notre étude.

Chapitre I :

La cellule solaire

Chapitre I

La cellule solaire

I. 1 Introduction

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée. Ce chapitre présente quelques bases et notions indispensables dans la conversion photovoltaïque. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'effet photovoltaïque et au mécanisme de fonctionnement de la cellule solaire. Ensuite, la deuxième partie est consacrée au spectre solaire, sa forme et sa nature ainsi qu'aux différentes normes utilisées lors de la simulation de la cellule solaire. En troisième partie on discute de la caractéristique I(V) de la cellule solaire en obscurité et sous ensoleillement. Enfin, on discute des différents types des pertes qui peuvent exister dans une cellule solaire (optiques, ohmiques et par recombinaison).

I. 2 L'énergie solaire

L'énergie solaire apporte une solution alternative aux énergies conventionnelles. C'est une énergie à faible coût, propre et respectueuse de l'environnement.

Une cellule solaire est un dispositif photovoltaïque destiné à convertir la lumière du soleil en énergie électrique, pour la fournir dans une charge adaptée de manière efficace [1]. La paire électron-trou photo-généré dans la couche de l'absorbeur est séparée par le gradient du champ électrique avant qu'elle ne se recombine. Il est important que les semi-conducteurs choisis dans l'application solaire possèdent de bonnes propriétés électriques telles qu'une mobilité élevée et une longueur de diffusion importante. La figure 1 présente le mouvement des porteurs libres dans une cellule solaire à base d'une jonction PN.

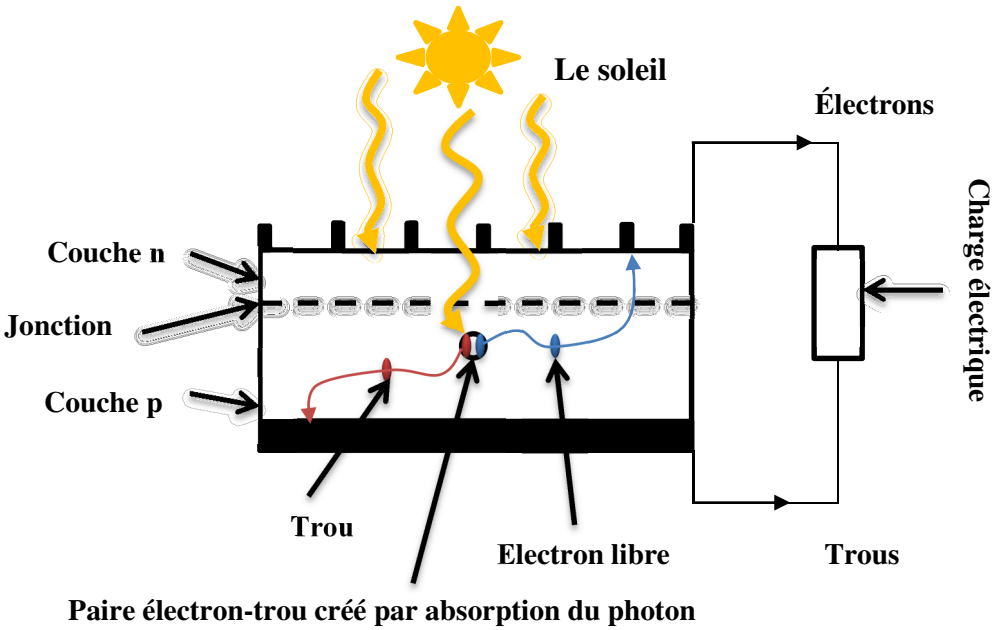


Figure 1 : Génération et mouvement des porteurs libres dans une cellule solaire à jonction PN [2].

I. 3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est le phénomène qui associe les mécanismes d'absorption des radiations solaires et l'action d'un champ électrique qui produit une barrière de potentiel dans une jonction. Le rôle de ce champ est de séparer les porteurs générés avant qu'ils ne se recombinent. Ce phénomène a été mis en évidence, pour la première fois, par le physicien Français Alexandre Edmond Becquerel qui découvrit en 1839, que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand ils sont exposés à la lumière [3]. Albert Einstein expliqua le phénomène photovoltaïque en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique. En 1954, D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson fabriquèrent la première cellule solaire à Silicium, de rendement 6%, dans les laboratoires Bell [4]. Depuis cette date, une recherche intensive a été dirigée vers les différentes méthodes et les matériaux utilisés, dans le but d'augmenter le rendement de la cellule.

Les progrès rencontrés au cours des 35-40 dernières années dans la réalisation des différentes générations de cellules solaires sont représentés dans la figure 2.

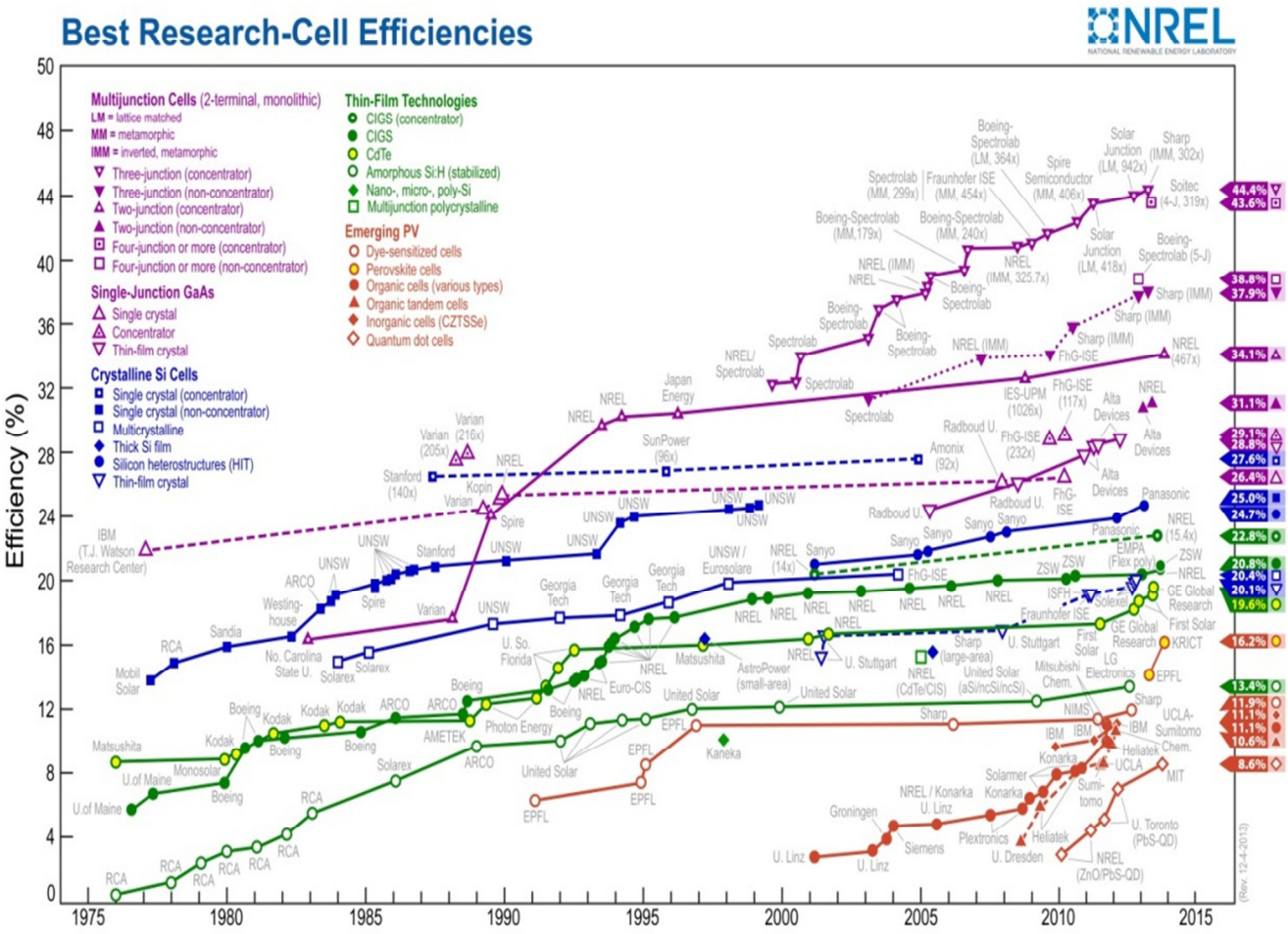


Figure 2 : Meilleurs rendements réalisés par les différentes technologies des cellules solaires au cours des 35-40 dernières années [5].

Une explication adéquate de l'effet photovoltaïque exige l'application de la théorie quantique de la lumière, laquelle considère que la lumière est constituée d'une énergie discrète constituée de photons. L'énergie de chaque photon est reliée à la fréquence v et la constante de Planck h comme suit :

$$E_{ph} = hv \quad (1)$$

Où

h est la constante de Planck [4,136×10^{-15} eV.s],

ν : la fréquence du photon [s^{-1}],

c : la vitesse de la lumière dans le vide [299 792 458 $m.s^{-1}$],

λ : la longueur d'onde du photon [m].

La conversion photovoltaïque est essentiellement basée sur trois étapes essentielles [6] :

1 : La génération d'une paire électron-trou dans le semi-conducteur en raison d'une absorption optique du photon (l'énergie du photon doit être supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau utilisé).

2 : La séparation de la paire électron-trou dans le semi-conducteur sans recombinaison.

3 : La collecte des charges libérées par les électrodes de la cellule solaire.

I. 4 Fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule solaire est un composant électronique capable de fournir de l'énergie, si elle est éclairée convenablement. Si l'énergie des photons qui atteignent la cellule solaire (*hv*) est supérieure à l'énergie de la bande interdite du matériau, une paire électron-trou est générée. Le champ électrique créé entre les deux bornes de la jonction PN permet à la paire électron-trou de se séparer.

Le principe de fonctionnement de la cellule solaire est illustré dans la figure 3. Les photons incidents créent des porteurs libres dans chacune des régions (1), (2) et (3) dont le comportement diffère suivant le lieu de leur création. Les photo-porteurs minoritaires diffusent dans les zones électriquement neutres P et N. Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo- porteurs contribuent donc au courant de diffusion, en créant un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace (Z.C.E), les paires électron-trou, créées par les photons, sont dissociées par le champ électrique; l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération [7].

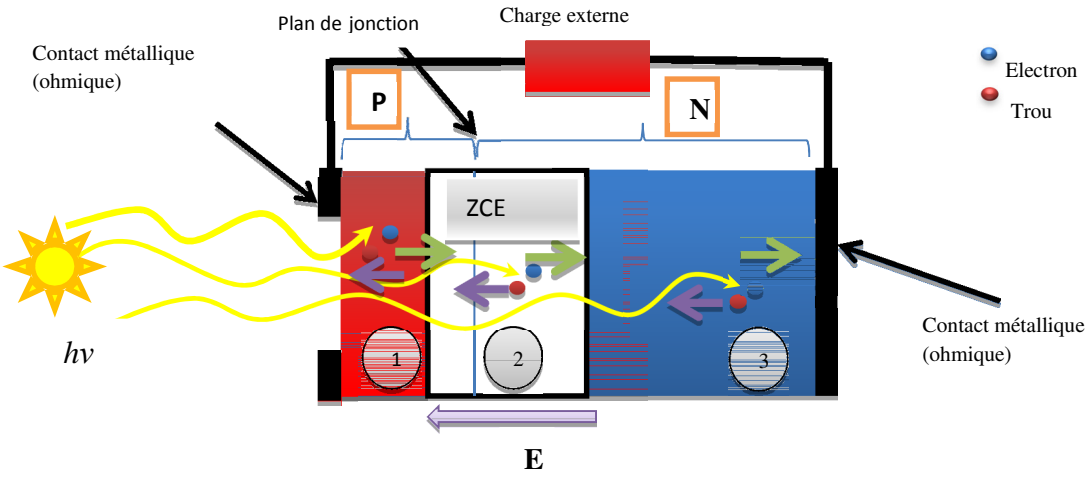


Figure 3 : Principe de fonctionnement de la cellule solaire.

I. 5 Facteur influant sur le rendement de conversion d'une cellule solaire

Différents paramètres peuvent influer sur le fonctionnement de la cellule solaire. Sous un éclairement fixe et en absence de tous mécanismes de pertes, l'énergie du gap du semi-conducteur E_G devient un paramètre primordial influant sur les performances d'une cellule solaire. Elle joue un rôle très important dans le développement et la conception des cellules solaires, notamment :

1) Elle détermine la plage d'absorption de la cellule solaire et la quantité des photons absorbés (équation (2)),
2) Elle limite le rendement théorique maximal de la cellule, l'équation (3) montre bien le lien entre la tension en circuit ouvert de la cellule et l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé.

$$\lambda(\mu m) = \frac{hc}{E_G(eV)} = \frac{1.24}{E_G(eV)} \qquad (2)$$

Où λ est la longueur d'onde en micromètres, *h* est la constante de Planck et c est la vitesse de lumière dans le vide.

$$F = \frac{qV_{OC}}{E_G} \qquad (3)$$

Où F représente le facteur de tension.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour exploiter la partie du spectre solaire la plus intense et améliorer le rendement de la cellule, en se basant sur une combinaison entre l'énergie de gap du

semi-conducteur et le spectre du rayonnement. Parmi ces solutions, on peut en citer deux : la première consiste à choisir un matériau de faible gap afin d'absorber tous les photons solaires y compris les photons infrarouges dont l'énergie est inférieure à l eV [8] ou 1.1eV [6]; ce qui augmente le photocourant et diminue la tension et le facteur de forme. Cette méthode implique une limitation dans le rendement et dans le choix du matériau utilisé (Fig. 4). La deuxième proposition est basée sur la conversion multispectrale par l'empilement de plusieurs matériaux dont les énergies de gap décroissent de haut en bas, chaque tranche du matériau convertit la partie du spectre solaire correspondante ; ce qui donne la possibilité d'utiliser une large gamme de semi-conducteur et d'atteindre des hauts rendements de conversion [1].

La figure 5 présente le rendement de conversion théorique de la cellule solaire en fonction de l'énergie du gap du semi-conducteur sous les deux spectres solaires AM0 et AM1.5G (on ignore tous types de pertes). On peut observer que les matériaux avec bande interdite allant de 1,0 à 2,0 eV conviennent pour la fabrication les cellules solaires.

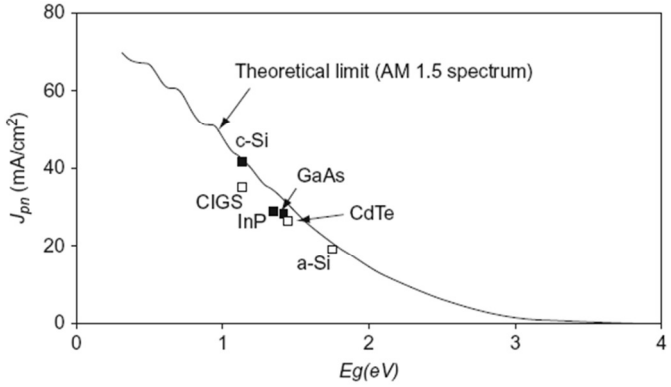


Figure 4 : Limite théorique de la densité du courant photo-généré, en comparaison avec les valeurs mesurées en fonction de la bande interdite sous le spectre solaire AM1.5G [9].

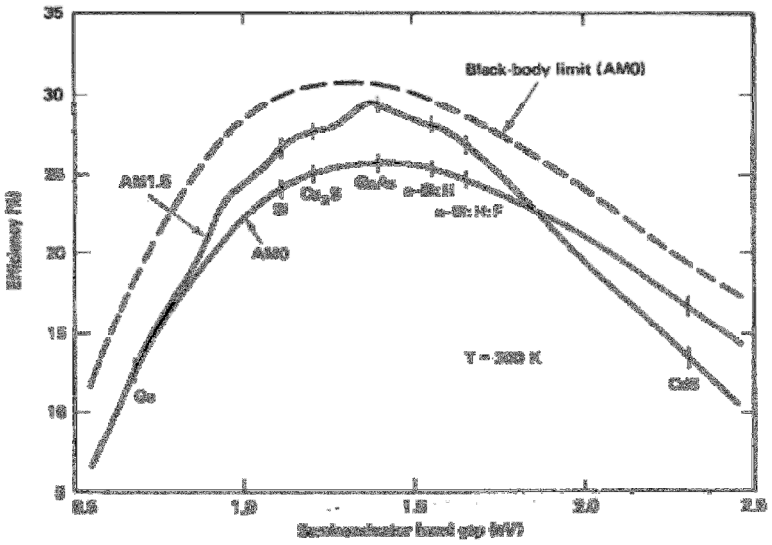


Figure 5 : Variation du rendement en fonction du gap du semi-conducteur (cellule idéale) sous les spectres solaires standards AM0 et AM1.5G [10].

I. 6 Semi-conducteurs à gaps direct et indirect

Le courant produit par la cellule solaire est généré à travers les transitions optiques entre les bandes d'énergie du semi-conducteur. Ce dernier peut être caractérisé selon son gap, à savoir, semi-conducteur à gap direct ou à gap indirect. Dans les semi-conducteurs à **gap direct**, les électrons et les trous possèdent le même vecteur d'onde k, le maximum d'énergie de la bande de valence et aligné avec le minimum d'énergie de la bande de conduction. Par contre, dans un semi-conducteur à **gap indirect**, le maximum d'énergie de la bande de valence et le minimum d'énergie de la bande de conduction sont décalés, leurs vecteurs d'onde sont donc différents. La figure 6 explique ce concept.

L'absorption optique dans les semi-conducteurs à gap indirect est considérablement plus faible que dans les semi-conducteurs à gap direct. Néanmoins, la durée de vie des porteurs majoritaires y est plus élevée. Typiquement, dans les semi-conducteurs à gap direct, la durée de vie des électrons et des trous ne dépasse pas 10^{-8} s, alors que dans un semi-conducteur à gap indirect la durée de vie des porteurs libres peut être 1000 fois plus grande [11].

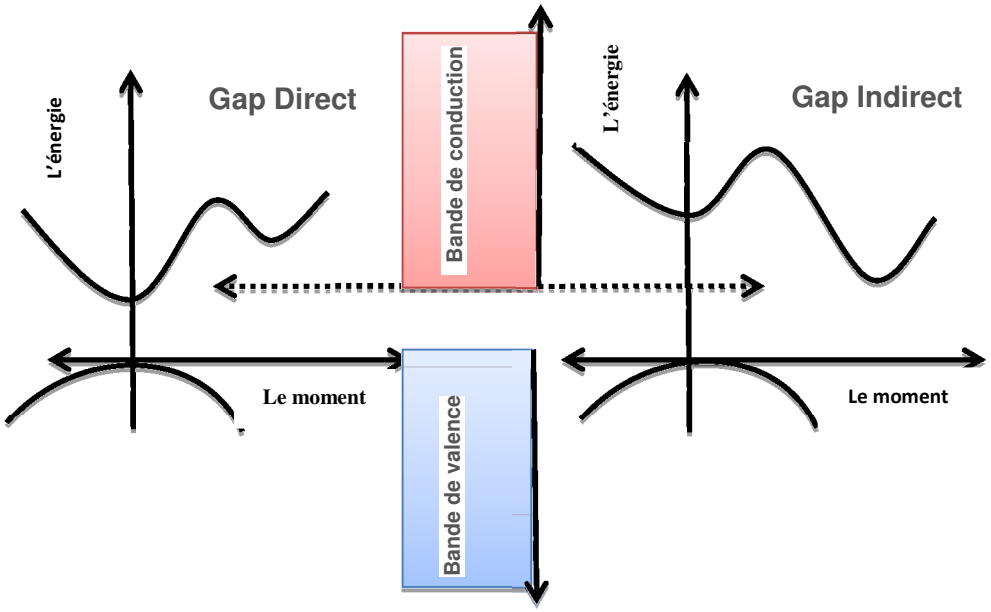


Figure 6 : Différence entre le gap direct et le gap indirect dans un semi-conducteur [12].

I. 7 Spectre solaire

Le soleil émet constamment de l'énergie depuis plus de cinq milliard d'années. Le rayonnement solaire qui atteint la terre peut être utilisé pour produire de la chaleur, de l'eau chaude et de l'électricité pour les maisons.

Pour exploiter l'énergie du soleil de manière efficace, il est nécessaire de comprendre sa forme et sa nature. Le soleil est une sphère de matière gazeuse intensément chaude avec un diamètre de 1.39×10^{9}m [9].

Approximativement, la masse du soleil est constituée de 74% d'hydrogène et 25% d'hélium. La température à sa surface avoisine 5500 °K [13]. L'énergie radiative du soleil provient d'une réaction de fusion nucléaire dans le soleil. A chaque seconde, environ 6×10^{11} kg d'hydrogène sont convertis en hélium avec un défaut de masse de $4x10^{3}$kg. La masse perdue est convertie, selon la relation d'Einstein ($E=mc^{2}$), en énergie d'une valeur de $4x10^{20}$J. Cette énergie est émise, à l'origine, comme une radiation électromagnétique dans la région allant de l'ultraviolet à l'infrarouge [0.2µm, 3µm] [14].

Toutes les radiations électromagnétiques se composent d'un élément essentiel qui s'appelle le photon.

La Terre reçoit environ 7,45 x 10^{17} kWh d'énergie solaire par année sous forme de lumière. La consommation annuelle d'électricité dans le monde est d'environ de 1.2 x 10^{14} kWh. Cela signifie que, si nous avons un moyen économique et facile de faire l'usage de la lumière du soleil pour produire de l'énergie électrique, nos besoins peuvent être satisfaits.

Les performances de la cellule photovoltaïque sous ensoleillement est fortement dépendant de la nature du spectre solaire. L'intensité totale du spectre solaire hors atmosphère est obtenue par l'intégration du spectre solaire par rapport à la longueur d'onde correspondante, ce qui donne la constante solaire AM0 1353 Watt/m^2.

La densité du flux de photons F (photons.$cm^{-2}s^{-1}$) sous le spectre terrestre solaire AM1.5G peut être approximée par les formules linéaires suivantes [15] :

$$F(\lambda) = \begin{cases} C(19.7\lambda - 4.7) \times 10^{15} & \text{pour } 0.24 \leq \lambda(\mu m) \leq 0.47 \\ \\ C(-2.5\lambda + 5.7) \times 10^{15} & \text{pour } 0.48 \leq \lambda(\mu m) \leq 1.08 \end{cases} \quad (4)$$

Où $\lambda(\mu m)$ représente la longueur d'onde du photon, C la concentration du soleil (C =1 sous les conditions « One Sun »).

D'une autre part, la densité du flux de photon du spectre AM0 peut être approximée, à partir de l'équation précédente, par les formules linéaires suivantes [16] :

$$F(\lambda) = \begin{cases} C(20\lambda - 5) \times 10^{15} & \text{pour } 0.26 \leq \lambda(\mu m) < 0.4 \\ C(25.1\lambda - 7) \times 10^{15} & \text{pour } 0.4 \leq \lambda(\mu m) < 0.5 \\ C(-0.808\lambda + 5.555) \times 10^{15} & \text{pour } 0.5 \leq \lambda(\mu m) < 0.68 \\ C(-3.535\lambda + 7.373) \times 10^{15} & \text{pour } 0.68 \leq \lambda(\mu m) \leq 0.9 \end{cases} \quad (5)$$

I. 7. 1 Standardisation du spectre solaire

Afin de standardiser le spectre solaire, la société American **ASTM** (**A**merican **S**ociety for **T**esting and **M**aterials) a développé le spectre solaire AM0 en 2000 [17]. Ce spectre est connu comme étant le spectre standard hors atmosphère utilisé par toute la communauté du photovoltaïque.

La normalisation du spectre solaire est nécessaire dans le domaine de développement de la cellule solaire car son fonctionnement varie avec la variation du spectre. Ce dernier peut varier en fonction de plusieurs paramètres : les conditions météo, la saison, l'heure et le lieu. Avoir un spectre standard permet de faire la comparaison des cellules solaires et de juger leurs comportements dans les mêmes conditions. Dans les laboratoires de caractérisation de la cellule solaire et des modules on utilise des simulateurs solaires, ces derniers ont une distribution spectrale proche du spectre normalisé.

L'atmosphère atténue significativement l'intensité de la lumière du soleil, avant d'atteindre la surface de la terre. Cette atténuation est causée, principalement, par le fait que [18] :

- Les molécules d'oxygène et d'azote absorbent les photons de courte longueur d'onde (inférieure à 190nm).
- L'ozone O_3 absorbe fortement les photons dans la gamme de l'ultraviolet entre [200-300nm].
- La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, et dans une moindre mesure, l'oxygène, causent, de façon sélective, une absorption dans le proche infrarouge.
- Il y a une dispersion des rayonnements par les molécules d'air et les aérosols (particules microscopiques sèches, en suspension dans l'air).

Le reste du rayonnement arrive directement sur la surface de la terre, c'est le rayonnement direct.

La distance parcourue par le rayonnement lumineux, depuis son entrée dans l'atmosphère jusqu'au sol, est désignée par le terme "masse d'air" ou AIR MASS AM [18], qui quantifie la puissance absorbée par l'atmosphère, en fonction de l'angle θ du soleil et par rapport à l'horizon. Le nombre attribué à l'air mass est défini par la sécante de l'angle entre le soleil et le zénith.

$$\text{AIR MASS} = 1/\sin(\theta) \tag{6}$$

On note que cette masse d'air, au niveau de la terre, est toujours supérieure à 1 [19].

$$\text{AIR MASS} = \sqrt{1 + (\frac{S}{H})^2} \tag{7}$$

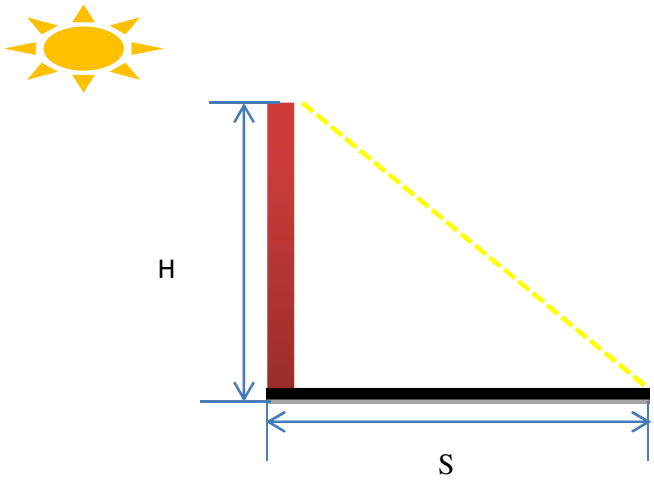


Figure 7 : Calcul de l'air-mass par rapport à la hauteur de l'objet.

Où S est la longueur de l'ombre créée par un objet de hauteur H (figure.7).

Suivant les conditions de réception de la lumière, la masse d'air est définie comme suit :

- Le spectre solaire **AM0** correspond au rayonnement à l'extérieur de atmosphère, ce spectre est utilisé pour les applications spatiales (satellites et véhicules spatiaux). L'intensité totale de ce spectre est de **1367W/m^2, standard** ASTM **E490**.
- Le spectre solaire **AM1** correspond au trajet optique minimal, où le soleil est perpendiculaire à la surface de la terre **(soleil au zénith).**
- Le spectre solaire **AM1.5G** correspond aux applications terrestres, conventionnellement normalisé à **1000W/m^2**, standard ASTM G173, comprend le spectre direct et le spectre diffus [9].

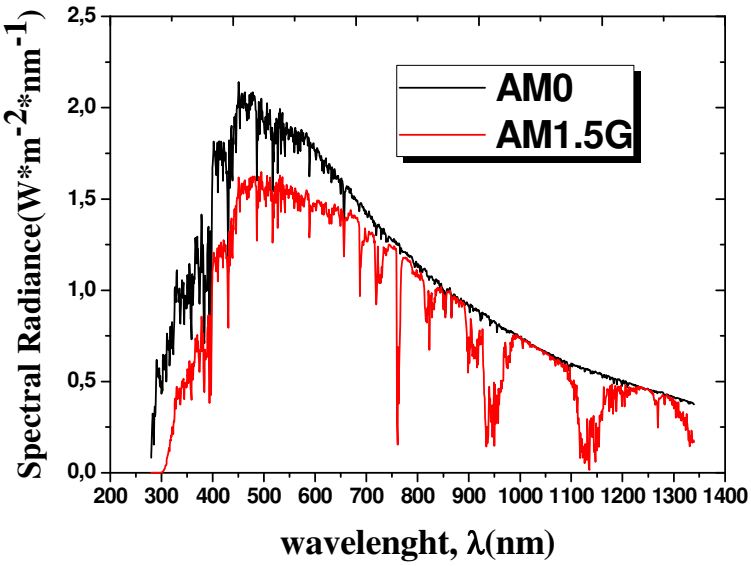


Figure 8 : Spectre solaire terrestre AM1.5G et spatial AM0 [20].

I. 8 Caractéristique I-V d'une cellule solaire

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension I(V). Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire, comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme. Aussi on peut utiliser cette caractéristique pour contrôler et commander les paramètres physiques de la cellule tels que le dopage et l'épaisseur des couches. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe I-V vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie.

I. 8. 1 Caractéristique I-V sous obscurité

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

$$J = J_0[\exp\left(\frac{qV}{AK_BT}\right) - 1] \quad (8)$$

Ou par le courant : $I = I_0[\exp\left(\frac{qV}{AK_BT}\right) - 1]$

Où $\boldsymbol{K_B}$ est la constante de Boltzmann ($1.38*10^{-23}$J/K), **T** la température absolue en degrés kelvin, **q** la charge élémentaire ($1.602*10^{-19}$C), **A** le facteur d'idéalité de la diode et $\mathbf{J_0}$ le résultat de la recombinaison des porteurs minoritaires dans les deux régions quasiment neutres n et p, leur valeur est définie par l'équation (9).

$$J_0 = q(\frac{D_p ni^2}{L_P N_D} + \frac{D_n ni^2}{L_n N_A}) \quad (9)$$

Où $\boldsymbol{D_n}$ et $\boldsymbol{D_p}$ sont respectivement les coefficients de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau p et n, ***ni*** la concentration intrinsèque, $\boldsymbol{L_p}$ et $\boldsymbol{L_n}$ la longueur de diffusion du porteur minoritaire dans le matériau p et n et $\mathbf{N_D}$ et $\mathbf{N_A}$ la concentration des deux régions P et N.

I. 8. 2 Caractéristique sous ensoleillement

L'étude de la cellule solaire sous ensoleillement peut se faire selon deux cas : Le cas idéal (pas de pertes) et le cas réel où l'on tient compte de l'effet des résistances parasites.

I. 8. 2. 1 Caractéristique (J-V) dans le cas idéal

Lorsque la cellule solaire sous ensoleillement est traversée par un spectre solaire riche en photons de différentes énergies, un photocourant est créé à ses bornes. Sa valeur est relative au flux lumineux. La caractéristique (J-V) de la cellule éclairée dans le cas idéal est représentée par l'équation (10). Ce modèle s'appelle ***modèle à simple exponentielle*** (on n'utilise qu'une seule diode dans la représentation). Le premier terme à gauche représente le courant de la cellule sous obscurité (J_{dark} : dark current) et le deuxième terme J_L représente le courant généré par la lumière.

$$J = J_{01}\left[\exp\left(\frac{qV}{AK_BT}\right) - 1\right] - J_L \quad (10)$$

Le terme J_{01} représente la recombinaison dans les deux régions quasiment neutres N et P. Si on tient compte de la recombinaison dans la zone de charge d'espace, la représentation du schéma équivalent de la cellule contiendra deux diodes, ce modèle s'appelle ***modèle à double exponentielle.*** Le courant sous obscurité est donné par la formule suivante :

$$J_{dark} = J_{01}\left[\exp\left(\frac{qV}{K_BT}\right) - 1\right] + J_{02}\left[\exp\left(\frac{qV}{2K_BT}\right) - 1\right] \quad (11)$$

Où :

$$J_{02} = \frac{qni}{\tau_n + \tau_P} W \quad (12)$$

W étant la largeur de la zone charge d'espace et $\tau_n \; et \; \tau_P$ les durées de vie des électrons et des trous. La figure 9 représente le schéma équivalent de la cellule solaire à simple et double exponentielle.

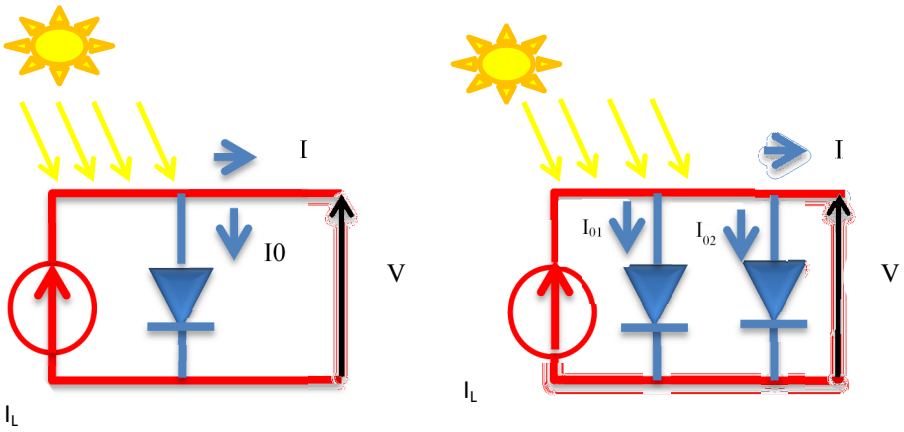


Figure 9 : Schéma électrique équivalent de la cellule solaire. a) modèle à simple exponentielle, b) modèle à double exponentielle.

I. 8. 2. 1. 1 Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire dans le cas idéal

Le comportement de la cellule solaire est examiné à travers les quatre paramètres électriques (J_{CC}, V_{CO}, FF, ŋ) où : J_{SC} représente la densité du courant de court-circuit, V_{CO} la tension en circuit ouvert, FF le facteur de forme et ŋ le rendement de conversion de la cellule solaire. La figure 10

présente la caractéristique J(V) d'une cellule solaire en obscurité et sous ensoleillement avec tous les paramètres électriques.

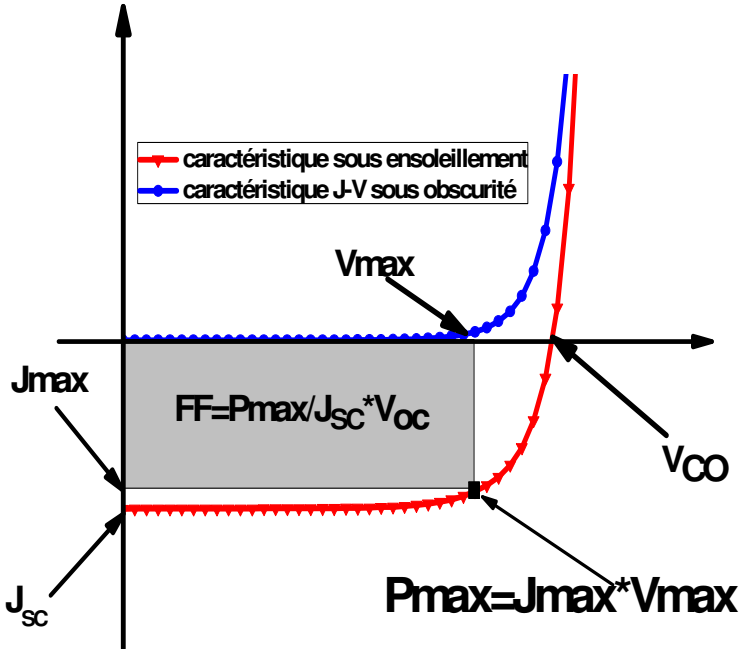


Figure10 : Caractéristique J(V) de la cellule solaire sous ensoleillement et sous obscurité.

a) La densité du courant de court-circuit (J_{CC})

C'est la densité de courant à une tension, aux bornes de la cellule solaire, nulle (V=0). Sa valeur peut être déterminée à partir du spectre solaire et du rendement quantique(QE) de la cellule solaire par l'équation (13) [1].

Dans les conditions idéales (R_s = 0, et R_{sh} = ∞) la densité du courant de court-circuit varie proportionnellement avec l'éclairement ($J_{CC} = J_L$=KØ) (où K est une constante et Ø le flux lumineux) [19, 21].

$$Jcc = q \int F(\lambda)\{1 - R(\lambda)\}IQE(\lambda)d\,\lambda \qquad (13)$$

Où $F(\lambda)$ est la densité du flux incident sur une unité de surface par unité de temps (nombre de photons avec l' énergie dans la gamme de [E , E + dE]), $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion à partir de la surface supérieure et *IQE* est le rendement quantique interne de la cellule solaire (seuls les photons qui ne sont pas refléchis sont considérés dans la valeur de *IQE*). Une bonne valeur du photocourant

s'obtient avec une cellule solaire qui a une forte absorption dans le visible et le proche de l'infra-rouge et qui a aussi un rendement quantique QE proche de 1(100%) [22].

b) Rendement quantique de la cellule QE

Le rendement quantique donne la probabilité qu'un photon incident d'énergie E fournira un électron à un circuit externe. Il est considéré comme un paramètre quantitatif et qualitatif dans la description de la cellule solaire. Il permet de mesurer le nombre des électrons en sortie de la cellule solaire par rapport au nombre de photons incidents. Il permet aussi la quantification des pertes dans la cellule solaire (réflexion à la surface, pertes des photons de faible et forte énergie) (Fig. 11). Ce qui nous aide à interpréter nos résultats et introduire des améliorations sur la cellule [23].

$$\mathrm{QE} = \frac{\Delta J/q}{\emptyset} = \#\frac{\text{paires (electron}-\text{trou) collectées}}{\text{\# photons incident}} \qquad (14)$$

Le rendement quantique dépend de plusieurs propriétés du matériau; coefficient d'absorption, profondeur de jonction Xj, l'épaisseur de la zone de charge de déplétion, la durée de vie des porteurs et leur mobilité, la recombinaison en surface etc. [22].

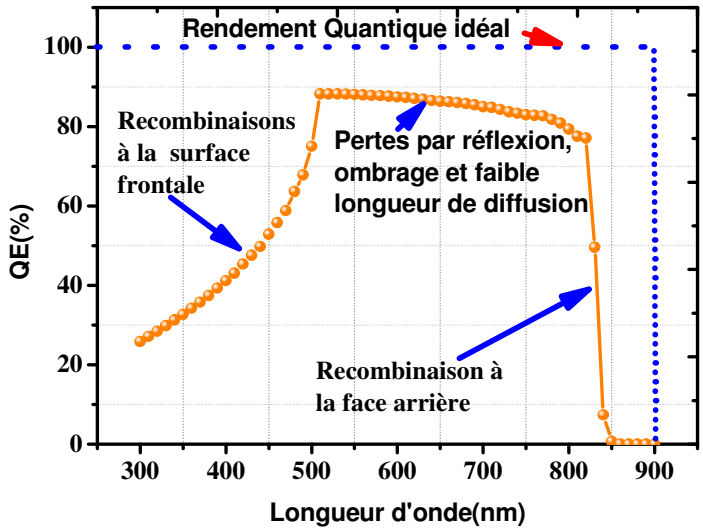


Figure 11 : Rendement quantique externe de la cellule solaire et les différents types de pertes [24].

On note ici que la réponse spectrale est conceptuellement similaire au rendement quantique, elle s'exprime par le rapport entre le courant produit par la cellule solaire et la densité des photons incidents sur sa surface. Elle est strictement dépendante de la profondeur de la jonction et de l'état de la surface de la cellule (mince ou texturisée) [25].

$$SR(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} QE(\lambda) = 0.808 * \lambda * QE(\lambda) \quad (15)$$

La réponse spectrale interne est définie comme le nombre de paires électron-trou, collectées en court-circuit, par rapport au nombre de photons pénétrant dans le matériau. Cependant, la réponse spectrale externe n'est autre que la réponse interne, mais elle tient compte de la réflexion au niveau de la surface avant, c'est-à-dire, du rapport entre le nombre de paires électron-trou collectées par la jonction, et du nombre de photons incidents par unité de temps et de surface :

$$SR(\lambda)_{ext} = (1 - R - T)\, SR(\lambda)_{\text{int}} \quad (16)$$

c) Tension en circuit ouvert (V_{CO})

Elle représente le maximum de tension aux bornes de la cellule solaire, pour un courant nul :

$$V_{CO} = \frac{AK_BT}{q} ln\left[1 + \frac{J_L}{J_0}\right] \quad (17)$$

La valeur du courant d'éclairement J_L est très grande par rapport à J_0 , donc on peut écrire l'équation (17) sous la forme :

$$V_{CO} = \frac{AK_BT}{q} \ln J_L - \frac{AK_BT}{q} \ln J_0 \quad (18)$$

Cette formule montre bien qu'il faut minimiser le courant (J_0) qui représente le phénomène de recombinaison pour augmenter la tension en circuit ouvert. En plus, on remarque qu'il y a une variation inverse entre le courant de saturation et la tension en circuit ouvert avec le gap des matériaux semi-conducteurs; quand ce dernier augmente le V_{CO} augmente et le courant de saturation diminue. Il en est de même pour la température ; quand cette dernière augmente le courant de saturation augmente et le V_{CO} diminue [22].

d) Facteur de forme FF (facteur de pertes)

Le facteur de forme est un critère de qualité de la cellule solaire. Il est représenté par la forme rectangulaire dans la caractéristique (J-V) de la figure 10. Dans une cellule parfaite, la courbe sera un parfait rectangle et le facteur de forme sera égal à 1. Sa valeur est déterminée à partir du rapport du maximum de puissance produite par la cellule solaire et le produit du courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert :

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{CO}*J_{CC}} = \frac{V_{MAX}*J_{MAX}}{V_{CO}*J_{CC}} \quad (19)$$

Où P_{MAX} représente la puissance maximum de la cellule solaire.

Mathématiquement, on peut exprimer le facteur de forme par la tension en circuit ouvert ou par la résistance série et shunt de la cellule solaire. Avec une cellule solaire idéale, ce paramètre dépend uniquement de la tension en circuit ouvert. Il s'exprime par l'équation (20), qui dépend uniquement de la quantité $v_{CO} = V_{CO/K_B T}$ [9] :

$$FF_0 = \frac{v_{CO} - \ln(v_{CO}+0.72)}{v_{CO}+1} \quad (20)$$

Dans le cas réel, le facteur de forme est très sensible aux résistances parasites R_s et R_{sh} de la cellule solaire [19].

$$FF = FF_0\,(1 - r_s) \quad (21)$$

$$r_s = R_S\ I_{CC}\ /V_{CO} \quad (22)$$

Une expression analogue existe également pour la résistance parallèle.

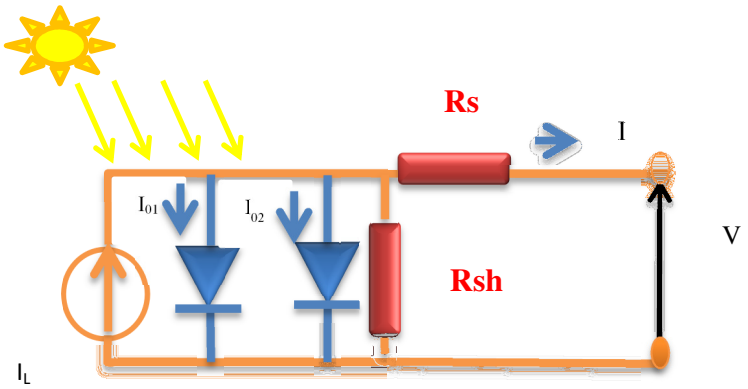
e) Rendement de conversion ŋ

Le rendement de conversion est le paramètre le plus important dans la cellule solaire. Il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique. Il est calculé par le rapport entre la puissance de sortie P_{out} et la puissance d'entrée de la cellule P_{in} (puissance d'éclairement solaire incident). Dans les applications terrestres on utilise le spectre solaire AM1.5G avec une puissance totale incidente égale à 1000W/m^2.

$$ŋ = \frac{Pout}{Pin} = \frac{V_{CO}*J_{CC}*FF}{Pin} \quad (23)$$

I. 8. 2. 2 Caractéristique (J-V) dans le cas réel

La cellule solaire en fonctionnement réel peut être assimilée à un générateur de courant, auquel il faut soustraire le courant de polarisation direct (I_{obs}) de la jonction. Le modèle le plus simple de la cellule solaire est celui qui se compose d'un générateur de courant avec une diode, qui représente le comportement de la cellule en obscurité (jonction PN). Les deux résistances parasites série R_s et parallèle ou shunt R_{sh}, représentent les pertes dans la cellule.



(b)

Figure 13 : Schéma équivalent d'une cellule solaire dans le cas réel.

Le modèle mathématique de ce circuit est représenté par l'équation (24) [26].

$$J = J_L - J_0\left[\exp\left(\frac{q(V+JR_S)}{AK_BT}\right) - 1\right] - \left(\frac{(V+JR_S)}{R_{Sh}}\right) \quad (24)$$

I. 9 Les différents types de pertes dans une cellule solaire

Le rendement d'une cellule solaire est limité par différents types des pertes. Ces pertes peuvent être classées selon les pertes intrinsèque et extrinsèque [27] ou selon les pertes optiques et électriques [25].

I. 9. 1 Les pertes extrinsèques : ce sont les pertes qu'on peut éliminer. Il s'agit notamment des pertes dues à la réflexion, l'ombrage dû aux contacts, la résistance série, la collecte incomplète des porteurs photo générés, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison non radiative.

I. 9. 2 Les pertes intrinsèques : ce type de pertes est dû aux deux raisons suivantes :

1/ L'incapacité de la cellule solaire mono jonction à répondre efficacement à toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire. La cellule solaire devient transparente pour les photons dont leur énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur $E_{ph} < E_g$. D'autre part, si les photons ont une énergie supérieure à la bande interdite $E_{ph} > E_g$, le supplément d'énergie est dissipé sous forme de chaleur.

2/ Le deuxième type est dû à la recombinaison radiative dans la cellule.

Pour le deuxième classement (optique et électrique), la figure 14 présente les différentes sources de de pertes.

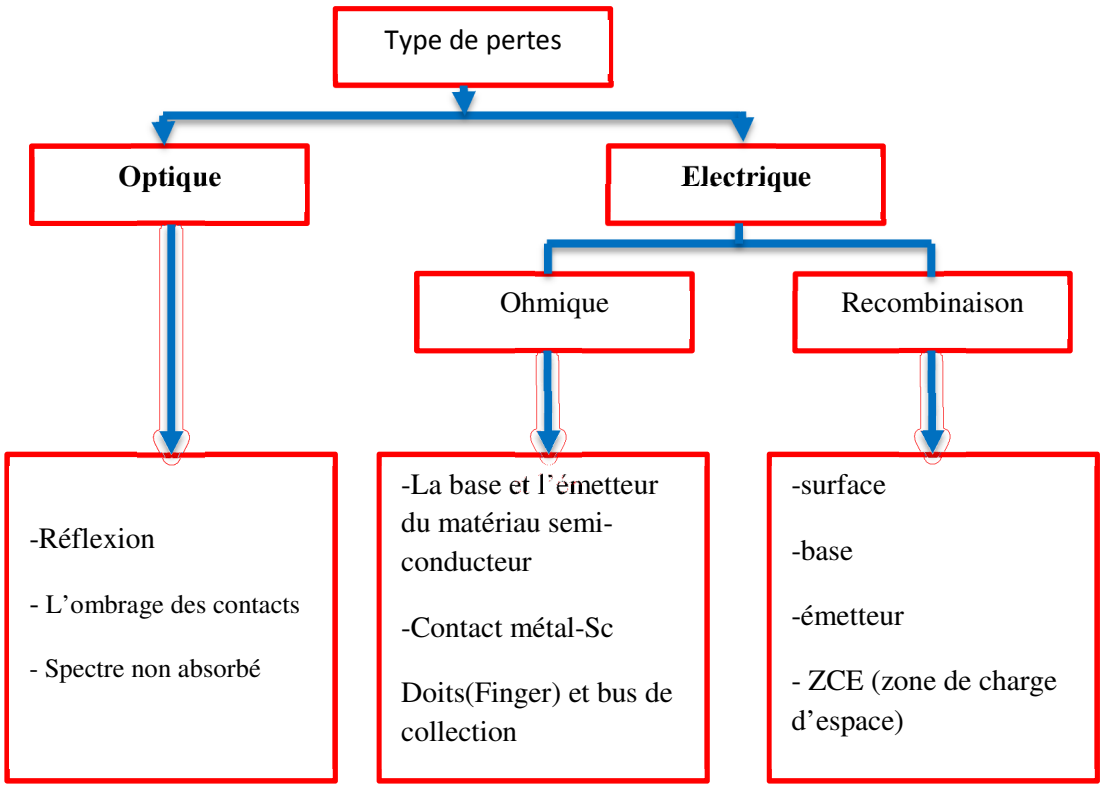


Figure 14 : Différents types de pertes électriques et optiques existant dans une cellule solaire [25].

I. 10 Résistances parasites

Le rendement de la cellule solaire est affecté par la présence des résistances parasites, ces dernières dissipent la puissance produite par la cellule solaire sous forme de pertes électriques, leur effet dépend de la géométrie de la cellule solaire et de la technologie de fabrication.

I. 10. 1 Résistance série

La résistance série R_s est causée par l'impédance des électrodes (métallisation de grille et de la face arrière) et le dopage insuffisant dans les régions quasiment neutre (Emetteur-Base). La faible valeur de la résistance série n'influe pas sur J_{cc} et V_{co} mais elle diminue la valeur du facteur de forme. Pour une cellule de bonne qualité, R_s doit être inférieure à 1 Ω [7]. L'effet de R_s sur la caractéristique J-V est présenté dans la figure 15 où on remarque que la résistance série a pour effet de diminuer le courant de court-circuit sans affecter la tension en circuit ouvert. On note ici que l'émetteur et la grille supérieure de la cellule solaire représentent les facteurs majeurs de perte de la résistance série. Ceci peut être réalisé par l'optimisation de l'épaisseur de l'émetteur et la surface de contact métal-semiconducteur et en réduisant la résistivité des matériaux utilisés.

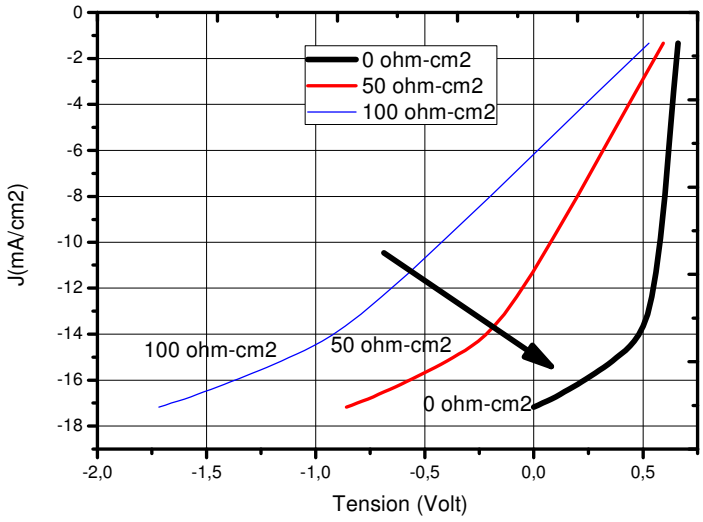


Figure 15 : L'effet de la résistance série sur la caractéristique J-V, simulation SCAPS-1D.

I. 10. 2 Résistance shunt R_{sh}

Les pertes causées par la résistance shunt R_{sh} sont généralement dues à des défauts de fabrication (la diffusion des contacts métalliques à haute température qui perfore l'émetteur). Ceci

correspond à une résistance de fuite dans la jonction qui devient significative quand la jonction PN est placée proche de la surface [28]. En plus, elle limite la distance de séparation entre les lignes de grille dans des structures solaires à couches minces [29]. Une cellule solaire de bonne qualité a une R_{sh} supérieure à $10^4\ \Omega$ [9].

I. 11 La Recombinaison

La recombinaison est définie comme le mécanisme inverse de la génération. Elle engage une perte d'énergie ; les porteurs en excès disparaissent en rétablissant leur équilibre thermodynamique. Un semiconducteur ayant subi une perturbation reconstitue son équilibre thermodynamique à travers plusieurs mécanismes possibles :

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

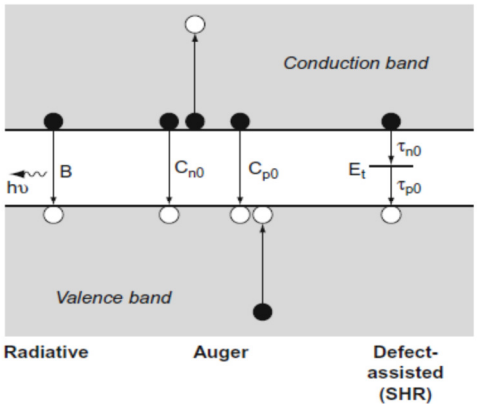


Figure 16 : Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur [9].

I. 11. 1 La recombinaison radiative ou " Bande à Bande "

Ce mécanisme est dominant dans les semi-conducteurs purs, dotés d'une structure à gap direct tel que le GaAs. La recombinaison radiative est décrite comme le mécanisme inverse de l'absorption optique ; un électron de la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence. L'énergie du photon émis correspondra à l'énergie du gap de la bande interdite du matériau, ce phénomène se caractérise par la courte durée de vie des porteurs minoritaires. Le taux de

recombinaison total est proportionnel à la concentration dans le matériau. En absence de phénomène de génération, le taux de recombinaison total est calculé par la formule suivante [9] :

$$U_{rad} = B(np - n_i^2) \quad (25)$$

Où B est une constante qui dépend du semi-conducteur utilisé, n_i la concentration intrinsèque et *n* et *p* les Concentrations des électrons et des trous à l'équilibre.

I. 11. 2 La recombinaison indirecte ou assistée (par piège)

A l'inverse du premier mécanisme, la recombinaison assistée se produit dans les semi-conducteurs à gap indirect comme le Si. Ce mécanisme, appelé aussi "Hall-Shockley-Read", introduit une étape dans la transition entre les bandes de conduction et de valence (la zone de déplétion) sous forme d'un piège situé à un niveau dans la bande interdite. Le défaut provient des impuretés ou de la structure du réseau.

Le taux de recombinaison indirect pour une concentration de défaut N_t située dans un niveau d'énergie E_t dans la bande interdite est représenté par la formule de Hall-Shockley –Read [9] :

$$U_{SHR} = \frac{\sigma_p \sigma_n V_{th} N_t (np - n_i^2)}{\sigma_n(n+n_1)+\sigma_p(p+p_1)} \quad (26)$$

Où : $n_1 = n_i \exp(\frac{E_t - E_i}{kT})$ et $p_1 = p_i \exp(\frac{E_t - E_i}{kT})$ (27)

N_t : Concentration des défauts

σ_p , σ_n : Sections efficaces de capture par le trou et l'électron,

V_{th} : La vitesse thermique,

E_i : Le niveau de Fermi intrinsèque

U_{SHR} est donné en : porteurs libres. cm^{-3}. s^{-1}.

I. 11. 3 La recombinaison superficielle

La surface d'un semi-conducteur présente de nombreux défauts, suite aux traitements qu'elle subit lors du polissage et de l'attaque chimique. L'oxyde natif qui, dans un milieu ambiant, croît en quelques minutes sur plusieurs dizaines d'angströms (A°) perturbe profondément la structure

cristalline au voisinage de la surface. Quand on éclaire uniformément le matériau, la recombinaison superficielle provoque une concentration en porteurs excédentaires moins importante en surface que dans le volume. Afin de pallier ce déséquilibre, les porteurs générés diffusent vers la surface, donnant naissance à un courant de diffusion [2]:

$J_{surface} = qS_p(p_n - p_{n0})$ Pour le matériau de type N (28)

$J_{surface} = qS_n(n_p - n_{p0})$ Pour le matériau de type P (29)

Où S est la vitesse de recombinaison en surface ($cm.s^{-1}$).

On note ici que la recombinaison superficielle est un paramètre très important lors de l'étude de la cellule solaire. Elle affecte le courant de saturation et le rendement quantique de la cellule. Sa vitesse dépend de la caractéristique du matériau semi-conducteur utilisé. Elle est élevée pour les semi-conducteurs à gap direct (elle varie entre 10^4 et 10^7 $cm.s^{-1}$). Pour minimiser cette vitesse on effectue une passivation de la surface. Pour les cellules en silicium, on ajoute une couche d'oxyde, tandis que pour les cellules en GaAs, on ajoute des couches fenêtre à base de AlGaAs. Cette couche permet de minimiser la vitesse de recombinaison superficielle [30]. Cuevas et al proposent une formule analytique qui représente la vitesse de recombinaison superficielle en fonction de la concentration du dopage du matériau [31].

S= 70 cm/s pour $N < 7 \times 10^{17}\ cm^{-3}$ (30)

$S = 70[\frac{N}{7\times10^{17}}]\ pour\ N > 7 \times 10^{17}\ cm^{-3}$ (31)

I. 11. 4 La recombinaison Auger

C'est le mécanisme qui intervient lors d'une forte concentration de porteurs libres, comme dans les semi-conducteurs à gap indirect [32]. L'énergie libérée par la recombinaison transfère un électron à un niveau supérieur de la bande de conduction, ou un trou, à un niveau plus profond de la bande de valence. Le taux de recombinaison total est calculé par la formule suivante [9] :

$U_{Auger} = (C_{p0} + C_{n0})(np - n_i^2)$ (32)

où C_{p0} et C_{n0} sont les coefficients de capture d'Auger du trou et de l'electron.

Le tableau 1 donne les valeurs de ces coefficient pour Si, GaAs et InP [9].

Tableau 1. Le coefficient de la recombinaison radiative B et les coefficients de capture des trous et des électrons Auger.

matériau	$B.cm^3s^{-1}$	$C_{n0}.cm^6s^{-1}$	$C_{p0}.cm^6s^{-1}$
Si	1.8×10^{-15}	$2.8X10^{-31}$	$0.99X10^{-31}$
GaAs	7.2×10^{-10}	10^{-30}	-
InP	6.25×10^{-10}	9×10^{-31}	-

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le spectre solaire, la cellule solaire et ses caractéristiques sous obscurité et sous ensoleillement dans les cas idéal et réel. Ensuite, nous avons présenté les différents types de pertes pouvant exister dans une cellule solaire. Dans le chapitre suivant, nous nous attacherons à étudier la technologie des cellules solaires Tandem et les diverses configurations existantes.

Chapitre II :

Cellules solaires à Multijonctions

Chapitre II

Cellules solaires à multijonctions

II. 1 Introduction

Les semi-conducteurs de la colonne III-V sont les matériaux qui s'adaptent le mieux aux applications électroniques comme les dispositifs à haute fréquence, les diodes lasers et les diodes électroluminescentes (LEDs). Ils sont aussi classés comme les meilleurs matériaux pour la fabrication des cellules solaires à haut rendement et cela pour : leur grande fiabilité (croissance d'excellente qualité), leur large plage de conversion du spectre solaire [33], leur bon rapport rendement-poids, leur excellente résistance aux radiations solaires et leur faible coefficient tension/ température ($\Delta V/\Delta T$) [9].

Au début des années 80, l'arsenic de gallium (GaAs) a permis d'améliorer les performances de la technologie de production des satellites en comparaison avec la technologie du silicium [34]. Suite aux recherches intensives menées au début des années 90, la croissance des cellules à base d'Arsenic de Gallium (GaAs) et de Phosphide (GaInP) sur un substrat en Germanium (Ge) a permis d'atteindre un rendement de plus de 20%. L'utilisation du Germanium comme substrat pour le GaAs est basée sur plusieurs critères : bonne conduction thermique, faible coût et meilleure résistance mécanique.

Après le développement des cellules solaires à Multijonctions et leur aptitude au fonctionnement dans les applications spatiales, de nouvelles applications terrestres utilisant ces matériaux sont apparues. Ces cellules sont généralement incluses dans des systèmes à haute concentration du soleil ce qui permet de minimiser la surface du générateur solaire ainsi que le coût de production d'énergie. Le Tableau 2 présente le progrès réalisé dans la technologie de la cellule solaire tandem à base des matériaux III-V.

Tableau 2 : Progrès de la technologie de la cellule solaire Tandem III-V [35].

Date	Cellule	Le constructeur
1955	Principe de la cellule solaire Multijonction	Jackson
1960	Proposition de la cellule solaire Multijonction	Wolf
1982	Optimisation de la cellule à haut rendement	MIT
1982	15.1% AlGaAs/GaAs Tandem 15.7% AlGaAs/GaAs Tandem	RTI Varian
1987	20.0% AlGaAs/GaAs Tandem (jonction Tunnel double hétéro-structure)	NTT
1989	27.6% AlGaAs/GaAs Tandem (metal interconnector)	Varian
1990	34.2% GaAs/GaAs Tandem (mechanically stackedX100 concentrator). 27.3%InGaP/GaAs celluleTandem	Boeing NREL
1994	29.5% InGaP/GaAs celluleTandem	NREL
1996	30.3% InGaP/GaAs celluleTandem	J-Energy
1997	33.3 InGaP/GaAs/InGaAs cellule mechanically stacked	J-Energy Sumitomo
1997	La cellule Tandem InGaP/GaAs utilisée par Primer satellite	Hughes Spectrolab

II. 2 Pourquoi la cellule à Multijonctions

La lumière du soleil est composée d'un spectre d'ondes continues très riches en photons dont l'énergie varie entre 0 et 4eV [36]. Dans les cellules solaires mono jonction, les photons incidents ayant une énergie ($h\nu$) inférieure au gap (E_g) du semi-conducteur ne sont pas absorbés et ceux dont l'énergie est supérieure en restituent une partie en pure perte sous forme de chaleur. Une étude faite par Masden et Backus sur une cellule solaire mono jonction GaAs [37] prouve que les sources de pertes majeures viennent soit d'un excès ou d'une faiblesse d'énergie des photons (pertes par thermalisation ou par transmission) (Fig. 17). Afin de minimiser ces types des pertes et pour avoir une large plage d'absorption du spectre solaire, il suffit de choisir un matériau à très faible gap [1eV - 1.5eV] [8]. Ceci augmente le photocourant et diminue la tension et le facteur de forme (Fig. 18), d'où une diminution de la puissance (un matériau à fort gap absorbe moins de lumière, ce qui donne un faible courant de court-circuit et une forte tension en circuit ouvert) [22]. La solution proposée en 1955 par E.D Jackson [38], puis brevetée en Amérique par Wolfen en 1960 [39], donna naissance au concept des cellules à multijonctions. Les premières démonstrations expérimentales furent réalisées en 1978 [40]. Le concept de cette approche est basé sur l'empilement de plusieurs cellules solaires dans l'ordre décroissant de leur bande

interdite, chaque cellule convertissant la partie du spectre qui correspond à son propre gap. Cette méthode permet d'éviter les pertes par thermalisation venant des photons de forte énergie (dégradation de la tension en circuit ouvert), ou par transmission venant des photons de faible énergie (dégradation du courant de court-circuit). La technologie des cellules solaires tandems est donc adressée à ces deux problèmes de pertes, et donne ainsi des cellules de hautes performances et d'une grande stabilité [41].

Le concept de cette méthode n'a pas été appliqué à cette époque compte tenu de la difficulté rencontrée dans la technique de la croissance des semi-conducteurs. Avec la nécessité d'utiliser les cellules tandem dans les applications terrestre (système à concentration) et les récentes techniques reconnues dans la croissance des couches de semi-conducteur par épitaxie comme MBE (Molecular Beam Epitaxy) ou MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy), le progrès dans la conception des cellules à multijonctions connait aujourd'hui un grand essor.

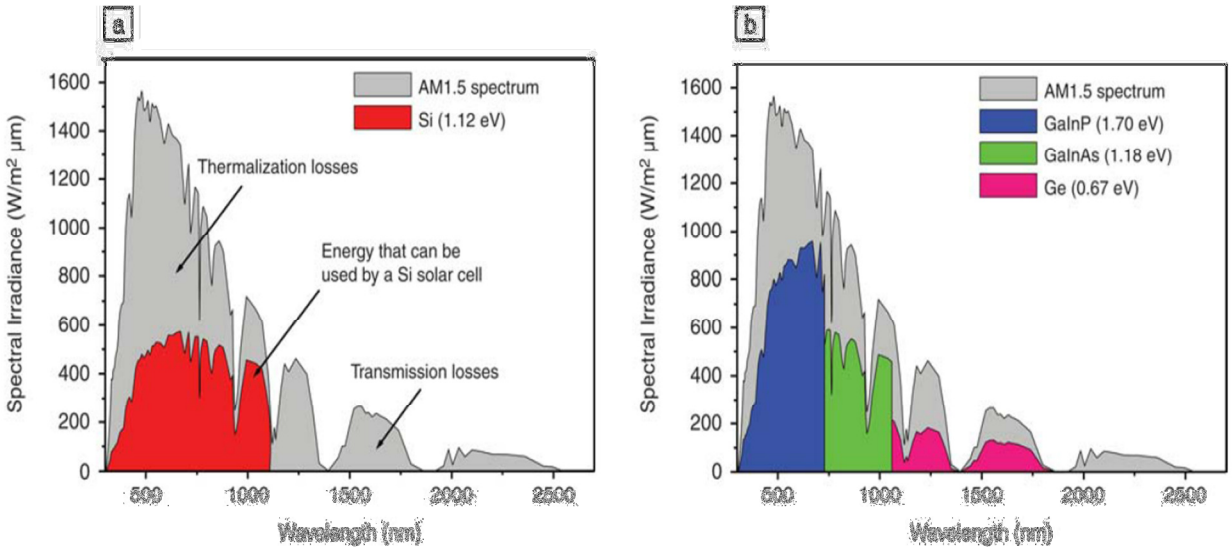
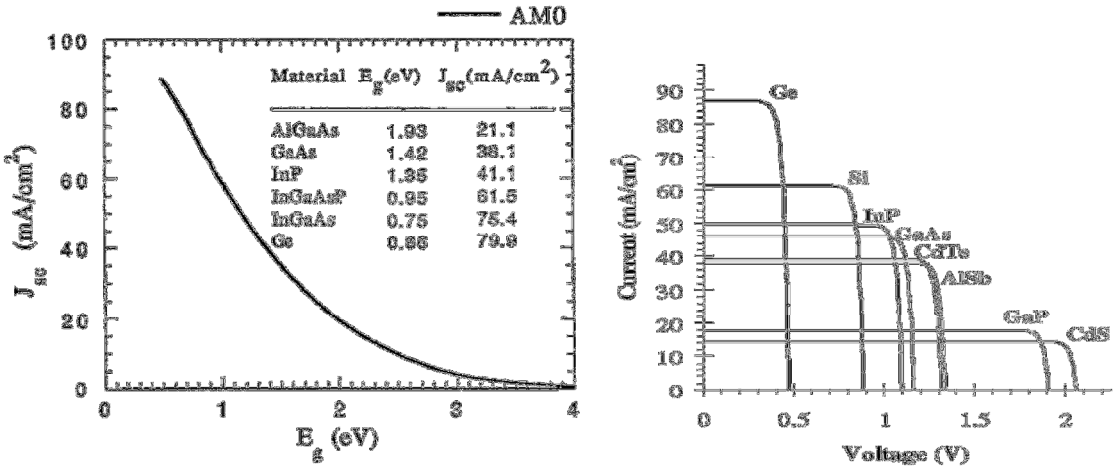


Figure 17 : Spectre solaire AM1.5 avec les différentes pertes par thermalisation ou par transmission localisées dans une cellule solaire. a) mono jonction Si, b) Multijonctions GaInP/GaInAs/Ge [33].



(a) (b)

Figure 18 : Influence du gap du matériau sur le courant et la tension délivrés par une cellule solaire mono jonction. a) Courant de court-circuit, b) Caractéristique I(V).

II. 3 Cellule solaire à Multijonctions

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

II. 3. 1 Système Multispectrale

Cette approche est considérée comme l'approche la plus simple dans sa conception, elle est basée sur la décomposition du spectre solaire par des prismes ou miroirs dichroïques, envoyant chacun une partie du spectre solaire sur la cellule correspondant à la bande interdite (Fig. 19). Le miroir permet ainsi une meilleure adaptation du spectre solaire au système de cellules utilisées, la connections des cellules étant indépendante. Le contrôle de la fréquence de la lumière se fait à l'aide de filtres sélectifs. L'alignement, l'efficacité du miroir, le câblage individuel de chaque cellule rend cette approche indésirable, notamment lorsque la puissance électrique délivrée augmente [42].

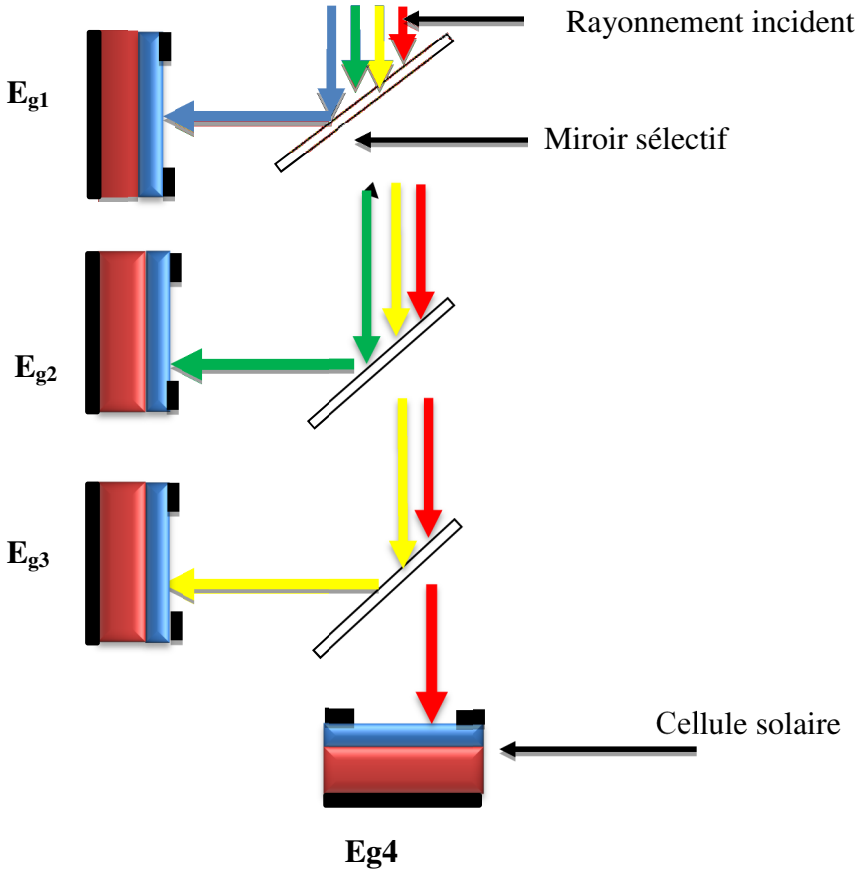


Figure 19 : Association de plusieurs cellules solaires pour une conversion multispectrale (Dichroicmirror or Filter Reflector).

II. 3. 2 Système à empilement mécanique (mechanically stacked MSC)

Les cellules sont placées sur le même trajet optique mais sont indépendantes les unes des autres. Pour séparer les cellules, on utilise une matière adhésive qui assure une bonne isolation électrique ainsi qu'un bon couplage optique et thermique entre les couches [9]. Chaque cellule devient électriquement isolée des autres (Fig. 20).

Ce type de cellule n'exige aucune condition sur les matériaux semi-conducteurs la constituant (paramètre de maille). Mais la connexion et l'isolation électrique entre les couches ajoutent une étape supplémentaire à sa technique de fabrication (interconnexions électriques, le couplage optique et

l'emboitage de la cellule) et augmente les pertes d'ombre, ce qui diminue son rendement d'où l'utilité de la cellule monolithique.

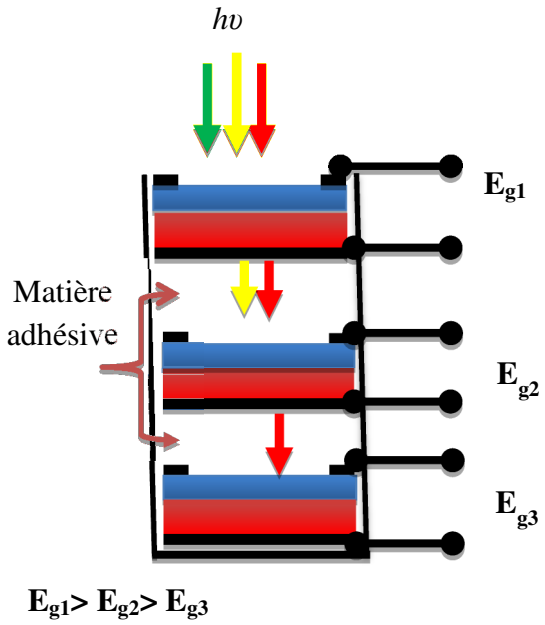


Figure 20 : Empilement mécanique des cellules solaires, schéma de principe.

II. 3. 3 Cellule monolithique (Tandem, Cascade ou Multicolore MC, Two-teminal Series-connected)

Le concept de la cellule solaire monolithique est basé sur l'empilement de plusieurs cellules en série et sur le même trajet optique avec un ordre décroissant des différents gaps (Fig. 21-a), chaque cellule jouant le rôle d'un filtre pour la cellule suivante. Ce système peut être représenté par des diodes en série où l'émetteur de la première diode est connecté à la base de la seconde (Fig. 21-b). On utilise dans ce type de configuration la même polarité des cellules. Les limitations rencontrées avec cette approche sont : les paramètres de maille très proches entre les couches de la cellule (croissance par épitaxie), la croissance de toutes les couches sur un seul substrat et la réalisation d'une jonction tunnel de haute qualité (pour assurer une bonne connexion électrique entre les couches). La cellule tandem doit être parcourue par le même courant (Current- matching) car les performances de toute la cellule tandem sont limitées par la cellule qui débite le moins de courant. En plus de la condition imposée sur l'égalité du courant, le choix du gap de chaque cellule doit être précis pour avoir un maximum de rendement [43].

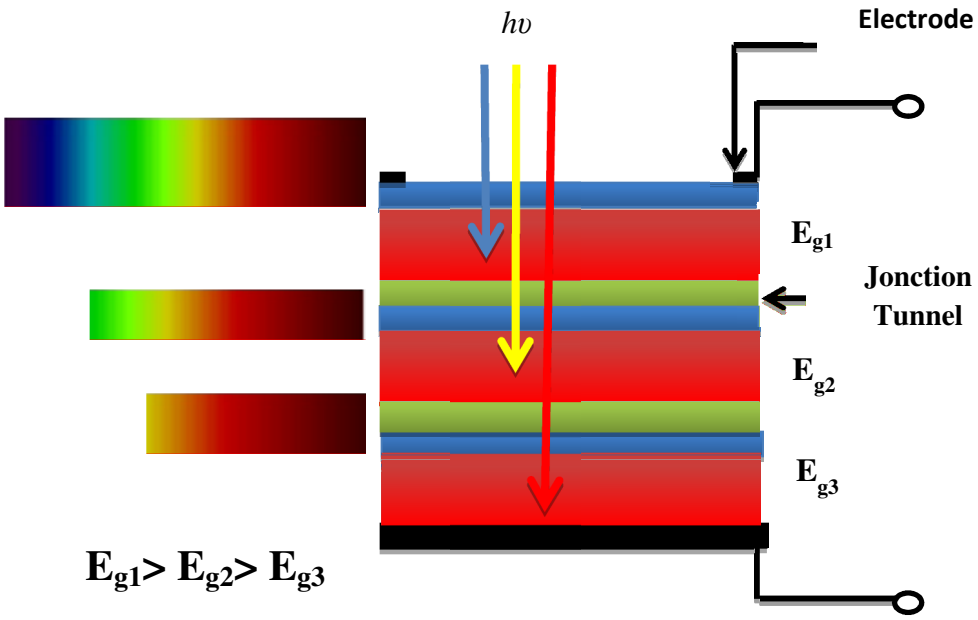


Figure 21 : a) Schéma synoptique d'une cellule solaire monolithique.

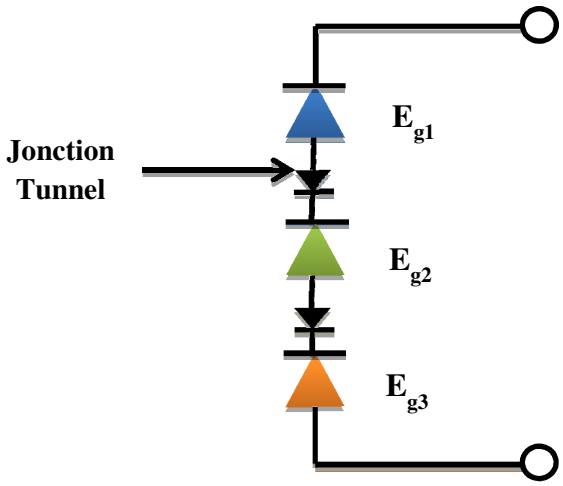


Figure 21 : b) Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire tandem avec interconnexion des diodes Tunnel.

II. 4 Les défis de fabrication d'une cellule solaire tandem

La conception des cellules solaires monolithiques doit obéir à plusieurs conditions : le choix des matériaux et des substrats ainsi que la compatibilité entre les propriétés physiques et électriques du matériau et du substrat qui sont des conditions majeures.

a- Choix des matériaux et des substrats, valeur optimale du gap pour les cellules tandems en applications terrestres :

Le gap du semi-conducteur joue un rôle très important dans le développement des cellules solaires. Pour les cellules solaires mono jonction, la valeur optimale la plus adaptée au spectre solaire AM1.5G est égale à 1.4eV (1.6 eV AM0) [19, 44]. Le matériau qui présente la valeur la plus proche de cet optimum est le GaAs (1.42eV) [45, 46]. Pour les cellules tandems monolithiques composées de deux jonctions, la littérature donne une valeur entre 1.75 eV et 1.8 eV pour la cellule supérieure et 1.1 eV pour la cellule inférieure (Fig. 22) [47, 45]. Un rendement théorique de 36% est obtenu avec une cellule tandem de gap 1.7 eV et 1.1 eV sous le spectre solaire terrestre AM1.5 (32.4% AM0) [48-49]. Un rendement de 41.1% est obtenu sous le spectre AM0 en utilisant des matériaux avec des gaps 1.95eV, 1.45eV, et 1eV. Aujourd'hui, les meilleurs semi-conducteurs qui assurent des bons rendements pour la cellule tandem sont les alliages des matériaux III, V et le Germanium. Un rendement de 30.3% sous le spectre AM1.5 a été obtenu avec une cellule monolithique à deux jonctions [50].

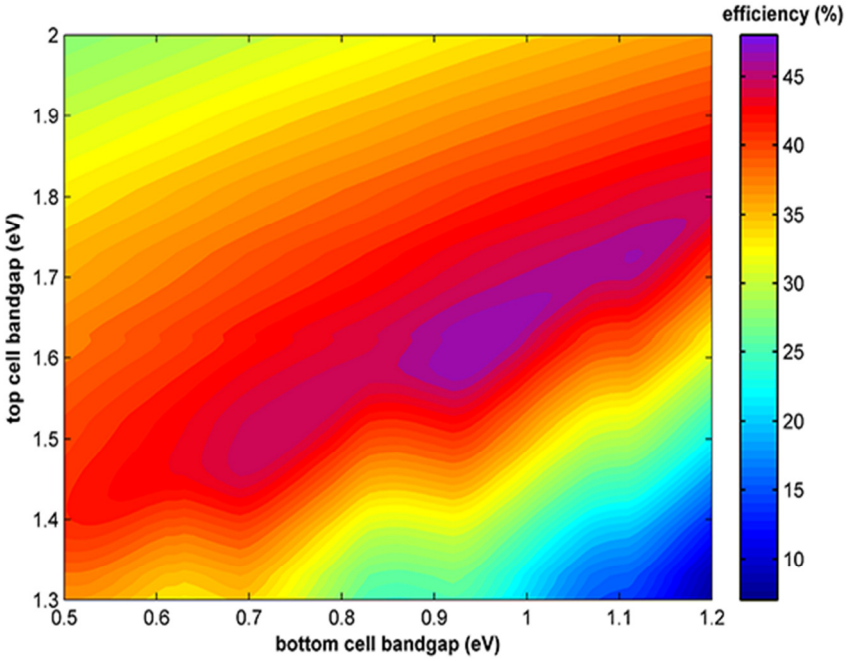


Figure 22 : Contour du rendement d'efficacité de la cellule solaire tandem monolithique par rapport au gap de la cellule supérieure et inférieure. Le rendement maximum de 47% est obtenu avec un tandem 1.63eV et 0.96eV (cellule supérieure-inférieure) sous le spectre solaire AM1.5G.

b- Constante de réseau

Dans les semi-conducteurs à structure cristallographique zinc-blende, l'espace entre deux molécules du matériau représente le paramètre de maille ou constante de réseau du matériau (a) (Lattice constant) [51].

Avec les alliages ternaires, comme par exemple dans le $In_{(1-x)}Ga_{(x)}P$, ce paramètre est calculé à partir du paramètre de maille des matériaux binaires. On utilise la loi Vegard [11] pour déterminer le paramètre de maille dans un alliage ternaire (équation 88).

$$a_{\mathrm{In(1-x)Ga(x)P}} = xa_{GaP} + (1-x)a_{InP} \quad (33)$$

Le désaccord de maille Δa (Lattice mismatched or metamorphic) entre la couche substrat et le matériau est donné par :

$$\Delta a = \frac{a(epit) - a(sub)}{a(epit)} \quad (34)$$

La dislocation dans les paramètres de maille entre le matériau et le substrat est reconnue comme la source principale de dégradation dans la cellule solaire durant son fonctionnement. Un décalage dans les constantes de réseau crée des dislocations dans le réseau cristallin. Les grandes densités de ces dislocations peuvent générer la diffusion des impuretés indésirables et la création des centres de recombinaison pour les porteurs minoritaires. Pour assurer une bonne croissance épitaxiale, un désaccord de maille de 0,1% doit être respecté. Cette revendication limite les possibilités de choix des matériaux désignés pour les applications en cellules solaires tandem. Pour cette raison une stratégie de sélection des matériaux a été proposée par Hutchby et Al [9]. Cette méthode permet de faire la bonne sélection des matériaux en respectant les exigences (le désaccord de maille) (Fig. 23). Elle présente les meilleures combinaisons possibles parmi les semi-conducteurs.

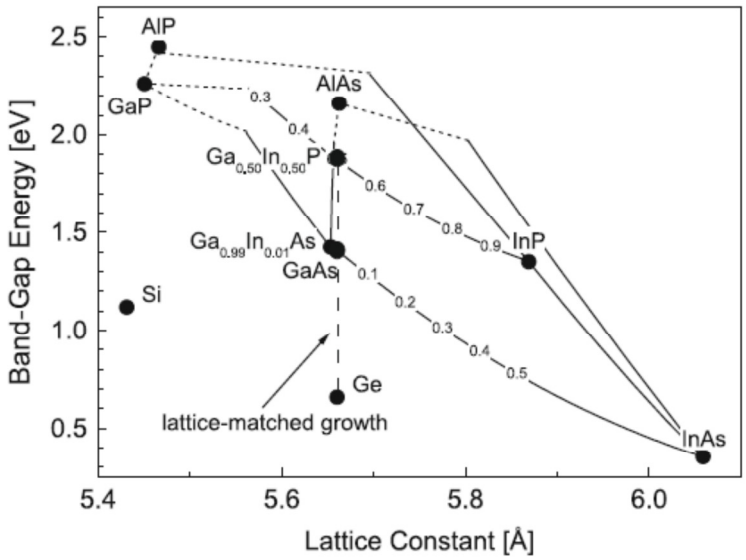


Figure 23 : L'énergie du gap du semi-conducteur en fonction de la constante de réseau permettant l'épitaxie des couches [52].

c- Coefficient de dilatation thermique

La dilatation thermique est un phénomène généré par une variation de température. Les atomes qui constituent la matière s'écartent ou se rapproche en fonction de la température. Ce paramètre mesure l'augmentation relative du volume d'un système lorsque l'on fait varier la température (Fig. 24).

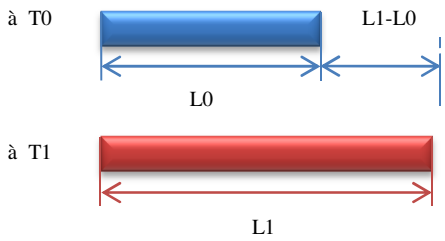


Figure 24 : Phénomène de dilatation thermique.

La valeur de la dilation thermique ΔL est donnée par la relation suivante :

$$L1 - L0 = \alpha \times L0 \times (T1 - T0) \quad (35)$$

$$\Delta L = \alpha \times L0 \times \Delta T$$

$$\alpha = \Delta L/(L0 \times \Delta T)$$

Avec : ΔL (mm) = Dilatation due à une variation de température

α (1/K ou 1/°C) = Coefficient de dilatation thermique linéaire

L (mm) = Longueur caractéristique

ΔT (K ou °C) = La différence de température [température initiale - température finale].

Le Tableau 3 donne les différentes valeurs du coefficient de dilatation thermique de quelques semi-conducteurs binaires III-V. Pour l'investigation avec des propriétés des matériaux ternaires on utilise la loi de Végard décrite par l'équation suivante :

$$P(A_xB_{1-x}C) = xP(AC) - (1 - x)P(BC) \quad (36)$$

Où : A, B et C représentent les trois alliages du semi-conducteur ternaire et P est le paramètre à calculer.

La figure 25 donne la variation linéaire du coefficient de dilatation thermique du matériau $Ga_xIn_{1-x}P$, en fonction de la variation de la concentration du galium dans l'alliage. Pour les cellules solaires tandem les coefficients de dilatation thermique des couches doivent être proche.

Tableau 3 : Paramètre de maille et coefficient de dilatation thermique des matériaux binaire III-V à 300K [53].

Matériau	a (A°)	$\alpha(x10^{-6} K^{-1})$
AlP	5.4511	4.50
GaP	5.4512	5.91
InP	5.8686	4.75
GaAs	5.6533	6.86

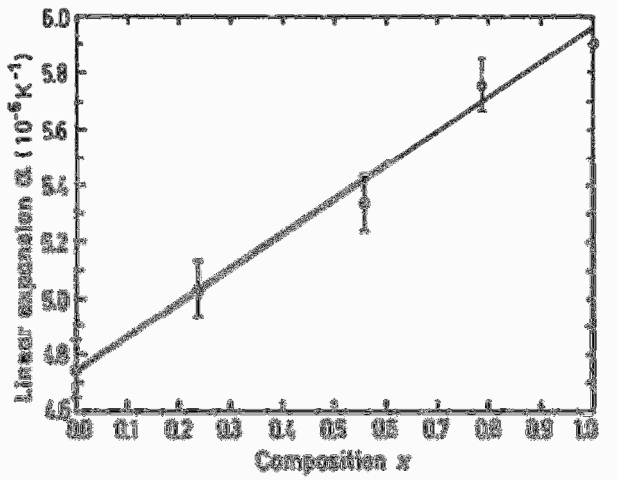


Figure 25 : Variation du coefficient de dilatation linéaire en fonction des paramètres x dans l'alliage $Ga_xIn_{1-x}P$, à 300 °K [54].

d- Critère imposé sur la jonction Tunnel

L'interconnexion entre les jonctions de la cellule monolithique est assurée par une jonction tunnel qui permet la réalisation d'un nombre important de couches d'épitaxie. La possibilité de création de la jonction tunnel est apparue en 1958, quand le scientifique Japonais *Leo Esaki* [55] découvrit la possibilité d'augmenter la concentration des impuretés dans les jonctions de $1 :10^7$ à $1000:10^7$ atomes dans le semi-conducteur. Cette augmentation dans la concentration des impuretés permet d'avoir une résistance négative dans la caractéristique de la diode, au niveau des bandes d'énergies. La zone de déplétion se rétrécit et le niveau de Fermi va se trouver alors dans les bandes

elles-mêmes, à cause du dopage élevé du matériau. Cela permet aux électrons de percer un tunnel à travers la barrière, sans changement dans leur énergie (Fig. 26).

Pour assurer un très bon couplage optique et électrique entre les cellules de la structure tandem (supérieure, inférieure) [56, 57], la jonction tunnel doit satisfaire aux conditions suivantes :

1. Les matériaux des jonctions tunnels doivent respecter la condition du désaccord de maille.
2. La cellule inférieure doit supporter la température élevée lors de la croissance de la cellule supérieure (Top cell).
3. La Jonction doit assurer un contact ohmique entre la cellule supérieure et la cellule inférieure, avec une faible résistance.
4. Elle doit être transparente aux photons d'énergie inférieure au gap du matériau traversé.

Pour obtenir ces conditions il faut avoir :

- Une jonction tunnel fortement dopée $p^{+/}n^{+}$ et d'épaisseur inférieure à 10 ηm, pour minimiser l'absorption,
- Une gap élevé, supérieur ou égal au gap de la cellule supérieure.

Mais ceci n'est pas facile à réaliser car le courant tunnel décroît exponentiellement avec l'augmentation du gap à dopage élevé. En plus, quand la cellule fonctionne à une température élevée, il y a diffusion du dopant dans la jonction ce qui dégrade le courant de crête (peak-current) de la jonction tunnel [58]. Une mauvaise qualité de la jonction tunnel implique une faible valeur du facteur de forme.

La valeur critique du courant qui circule dans la jonction tunnel s'appelle courant de crête de la jonction J_P, ce dernier doit être supérieur au courant du tandem [36]. J_P est donné par l'équation :

$$J_P \alpha \frac{-E_g^{3/2}}{\sqrt{N^*}} \quad (37)$$

Où Eg est l'énergie de gap du matériau utilisé, N* est la concentration effective du dopage donnée par :

$$N^* = \frac{N_A \times N_D}{N_A + N_D} \quad (38)$$

Le Tableau 4 donne une comparaison entre différentes jonctions tunnel réalisées avec différentes technologies.

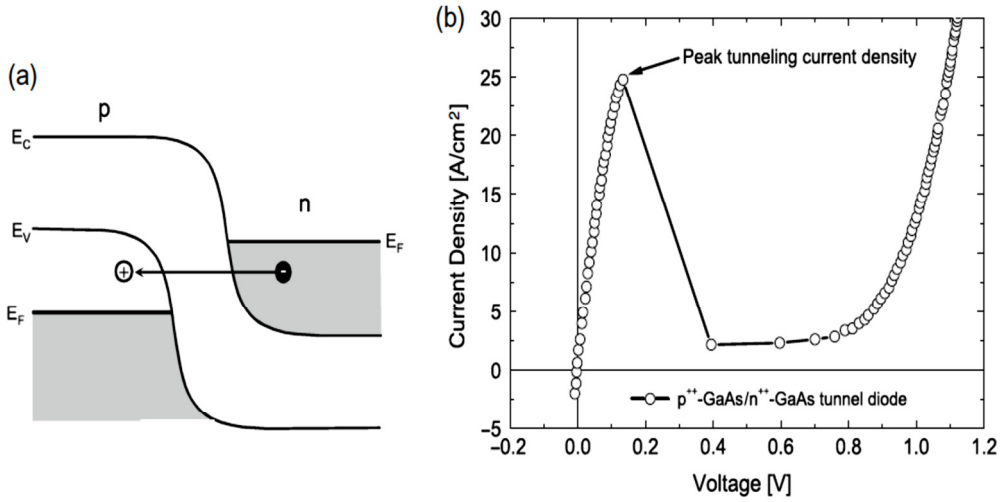


Figure 26 : Caractéristique de la jonction tunnel, a) schéma du diagramme de bande, b) caractéristique I-V expérimentale de la diode tunnel P^{++}GaAs-GaAs N^{++} avec une densité du courant de crête de 25A/cm^2 [9].

Tableau 4 : Jonction tunnel réalisée avec différentes technologies.

Matériau	La densité du courant de crête J (A/cm^2)	La résistivité R (10^{-3}, Ω-cm^2)	Méthode de croissance	Réf
P+/N+ GaAs	45	2	MOVPE	[59]
P+/N+ GaAs	34	3	MBE	[60]
P+/N+ GaAs	23	1.72	LPE(Epitaxie en Phase Liquide)	[58]
P+/N+ GaAs	14.9	4.7	Thermal diff	[61]

II. 5 Limite théorique dans la conception des cellules solaires à multijonctions

Théoriquement, on peut utiliser un nombre illimité de cellules dans la conception des cellules solaires à multijonctions. Mais dans la réalité, le processus de conception et de fabrication de ce composant se complique exponentiellement avec le nombre des cellules à ajouter. Cependant, des réalisations pratiques arrivent jusqu'à trois ou quatre cellules (Fig. 27).

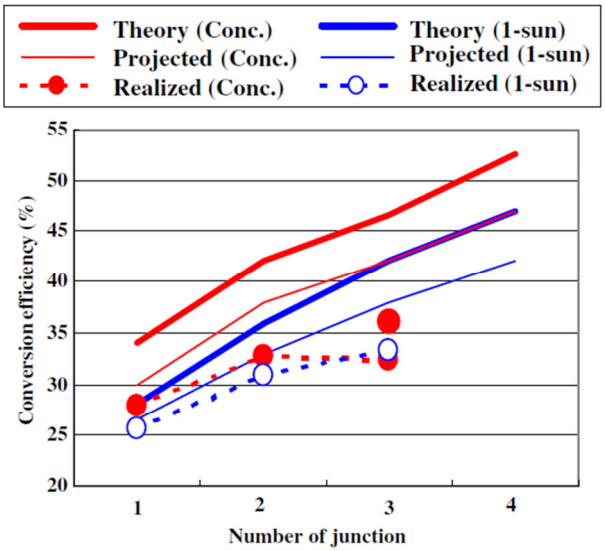


Figure 27 : Rendements de conversion théorique et réaliste escomptés, pour des cellules solaires à jonction unique et à multijonctions, en comparaison avec des valeurs expérimentales de rendement réalisées sous AM1.5 (en bleu) et sous optimum de concentration (en rouge) [62].

Tableau 5 : Résultats de simulation de Bremner et al, sur des cellules solaires à multijonctions de 1 à 8 sous-cellules, sous un spectre solaire AM1.5 et sous un optimum de concentration [63].

E_{g1}	E_{g2}	E_{g3}	E_{g4}	E_{g5}	E_{g6}	E_{g7}	E_{g8}	Rendement [%]
1.34								33.68
0.94	1.60							45.71
0.94	1.37	1.90						51.58
0.71	1.11	1.49	2.00					55.31
0.70	1.01	1.33	1.67	2.14				57.61
0.69	0.96	1.20	1.47	1.79	2.24			59.41
0.69	0.93	1.14	1.37	1.6	1.9	2.33		60.78
0.51	0.75	0.98	1.18	1.4	1.63	1.92	2.35	61.42

II. 6 Constituants de base d'une cellule solaire photovoltaïque à haute performance

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. On présente, dans la figure 28, la structure d'une cellule photovoltaïque la plus couramment utilisée avec des contacts sur les deux faces.

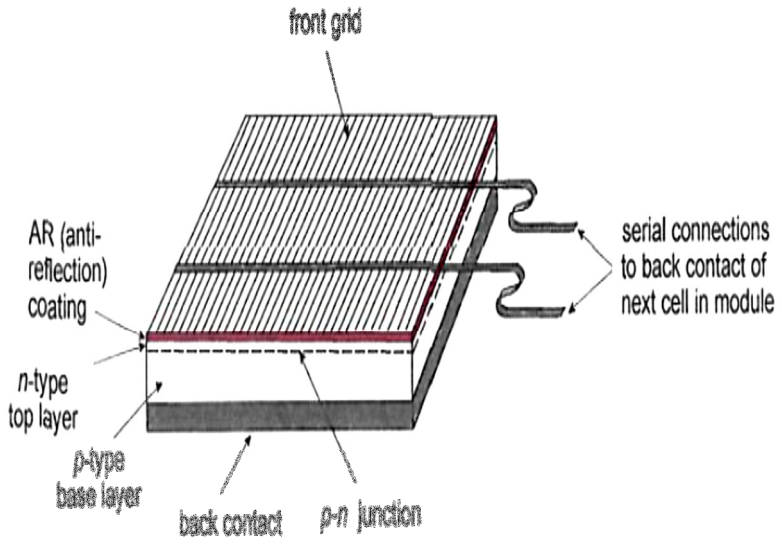


Figure 28 : Constitution de base d'une cellule solaire en silicium [9].

II. 6.1 Passivation des faces avant et arrière de la cellule

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts, entraînant des pertes non négligeables, liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique de la surface, en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque, dont les plus importantes sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitride de silicium SiN_3. Une cellule solaire de haute qualité nécessite une meilleure passivation de la surface semi-conductrice avec une forte qualité des matériaux d'électroniques.

II. 6.2 Couche antireflet

La surface de la cellule solaire est le siège d'une forte quantité de pertes par réflexion ; 34% des pertes sont localisées dans la surface d'une cellule en Si dans les grandes longueurs d'onde (1.1µm) et plus de 54% aux courtes longueurs d'onde (0.4µm) [22]. L'une des méthodes utilisées dans la conception des cellules solaires pour minimiser ce type de pertes est l'utilisation de couches antireflet (CAR, Anti-Reflective Coatings) ou bien la texturisation de la surface.

La CAR est un revêtement diélectrique mince avec une très faible valeur d'indice de réfraction. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux

lumineux. Pour une incidence normale de la lumière sur une surface plane et lisse, l'épaisseur de la couche antireflet est choisie de sorte que la longueur d'onde dans le matériau diélectrique soit égale au quart de la longueur de l'onde incidente (Fig. 29).

La réflexion de la lumière incidente, de longueur d'onde λ, sur la surface d'un semi-conducteur couvert d'une seule couche antireflet d'épaisseur (d) est donnée par [22] :

$$R = (\ r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2\cos(2\theta)\ /(1 + \ r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2\cos(2\theta) \quad (39)$$

Où r_1 et r_2 sont la réflectance sur les surfaces (air-CAR) et (CAR-semi-conducteur).

$$r_1 = (n_0 - n_1)/(n_0 + n_1)\ ,\ r_2 = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2) \quad (40)$$

L'angle θ est donné par : $$\theta = 2\pi n_1 d/\lambda \quad (41)$$

n_0 , n_1 ,n_2 sont respectivement les indices de réfraction de l'Air, de la couche antireflet et du SC.

On peut obtenir une réflectivité minimum des faisceaux réfléchis, aux interfaces air/CAR et CAR/semi-conducteur, si :

$$d = \lambda \ \ /\mathrm{n}_1\ 4 \text{ et } \mathrm{n1} = \sqrt{\mathrm{n0} * \mathrm{n2}} \quad (42)$$

$$R_{min} = [\frac{(n_1^2 - n_0 n_2)}{(n_1^2 + n_0 n_2)}]^2 \quad (43)$$

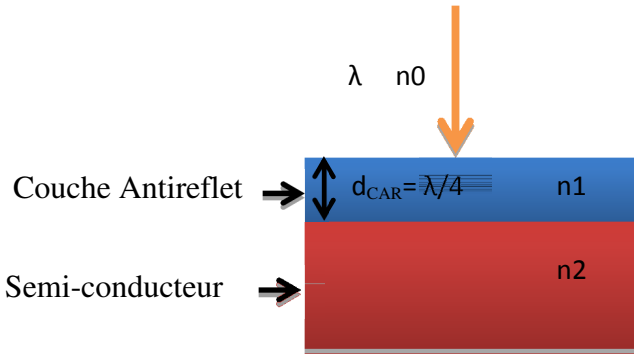


Figure 29 : Epaisseur optimale de la couche antireflet.

Les matériaux utilisés comme couche antireflet doivent avoir les propriétés optiques suivantes :

- une bonne adhérence de contact.
- Etre transparents dans la gamme de sensibilité des cellules solaires [0,2 -1,2 µm].
- Réduire au maximum la réflexion.

Les matériaux typiques utilisés dans l'empilement d'une couche antireflet sont présentés dans le tableau 6. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux matériaux diélectriques différents).

Tableau 6 : L'indice de réfraction, à 590 nm (2,1 eV), des matériaux couramment utilisés pour le revêtement antireflet [64].

Matériau	**n**
MgF_2	**1.38**
SiO_2	**1.46**
Al_2O_3	**1.76**
Si_3N_4	**2.05**
Ta_2O_5	**2.2**
ZnS	**2.36**
SiO_x	**1.8-1.9**
TiO_2	**2.62**

II. 6.3 Texturation de la surface

On peut faire la texturisation de la surface, soit en combinaison avec un revêtement de la couche anti-reflet soit avec elle-même (Fig. 30). Elle est utilisée pour réduire au minimum la réflexion de la surface de la cellule. Un substrat monocristallin peut être texturisé par attaque chimique le long des faces des plans cristallins. Si cette texturisation est suivie du dépôt d'une couche A-R, le coefficient de réflectivité de la surface peut être réduit à 3 ou 4% pour toutes les longueurs d'onde considérées.

Il est évident de dire, dans ce cas, que la texturisation ne peut être appliquée qu'à des substrats monocristallins [9].

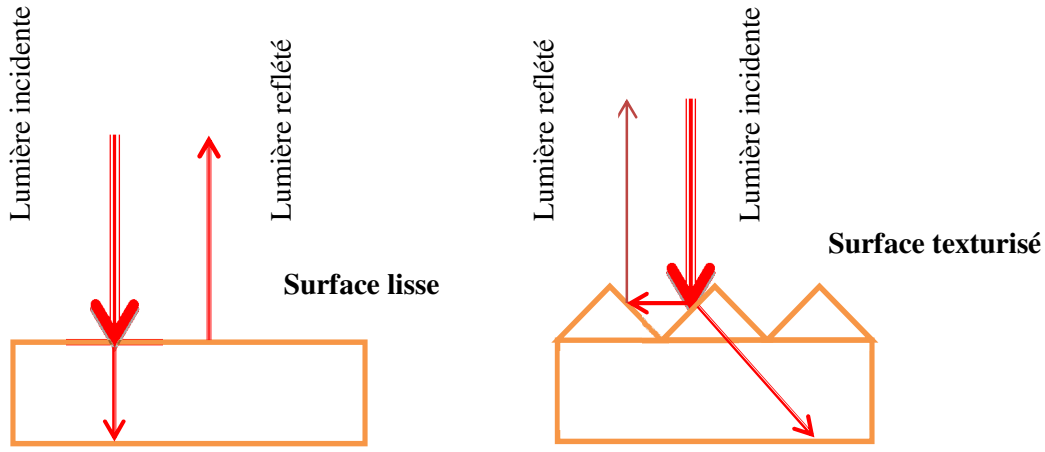


Figure 30 : Comparaison des deux géométries : a) surface lisse et b) surface texturisée.

II. 6.4 Contacts des faces avant et arrière

Les contacts métalliques, au niveau de la face avant et arrière, jouent un rôle très important dans l'amélioration des performances de la cellule solaire. Ils servent à collecter le courant des porteurs photo générés. La résistance de contact est un paramètre très important dans la conception de la cellule solaire. Les contacts doivent être ohmiques, c'est à dire que la caractéristique I (V) du contact doit être linéaire (Fig. 31) ; le courant passe sans aucune chute de tension. La collecte des porteurs de charge à la surface de la cellule par le contact métallique augmente l'ombrage et la réflexion dans la cellule. Pour minimiser ce type de pertes, on doit minimiser la surface couverte par le contact (la largeur du doigt). Cette méthode augmente la résistance série de la cellule à travers l'augmentation de la résistance du doigt métallique. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Pour les cellules photovoltaïques industrielles en silicium polycristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Mais pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, on utilise plutôt la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide.

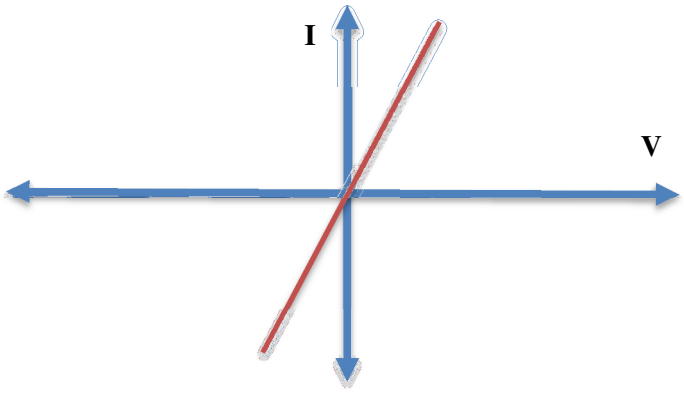


Figure 31 : Caractéristique I-V idéale d'un contact ohmique.

Le contact métal semi-conducteur établi à l'interface de la cellule crée une barrière de potentiel appelée barrière de Schottky. La valeur de cette barrière varie suivant le type de dopage du semi-conducteur (P ou N). Dans le cas d'un semi-conducteur dopé N, son expression est donnée par l'équation suivante [65]:

$$Ø_B = Ø_m - \chi \quad (44)$$

D'autre part, si le semi-conducteur est de type P la barrière est égale à :

$$Ø_B = E_g - Ø_m - \chi \quad (45)$$

Où $Ø_m$ est le travail de sortie du métal et χ est l'affinité électronique du semi-conducteur.

Le tableau 7 donne le travail de sortie de quelques métaux utilisés dans la conception de la cellule solaire.

Tableau 7 : Travail de sortie des principaux métaux utilisés dans la conception des cellules solaires [7].

Métal	**Li**	**Na**	**K**	**Rb**	**Cs**	**Fr**	**Cr**	**Fe**	**Ni**	**Al**	**Cu**	**Ag**	**Au**	**Pt**
$Ø_m$(eV)	2.3	2.3	2.2	2.2	1.8	1.8	4.6	4.4	4.5	4.3	4.4	4.3	4.8	5.3

II. 6.5 La couche fenêtre

Pour minimiser la recombinaison sur la face avant de la cellule solaire, une fine couche à base de semi-conducteur III-V, fortement dopé, est réalisée au niveau de sa surface. Le matériau utilisé doit répondre aux exigences suivantes [36] :

- Il doit disposer d'un paramètre de maille proche du paramètre de maille de l'émetteur.
- Son gap doit être supérieur au gap de l'émetteur.
- Il doit avoir une large bande de valence, décalée par rapport à l'émetteur, pour créer une forte barrière de potentiel pour les trous minoritaires.
- Sa concentration doit être $\geq 10^{18}\,cm^{-3}$.
- Le matériau doit être de qualité élevée pour minimiser la recombinaison à l'interface.

Certains matériaux utilisés dans les couches fenêtres posent le problème de contamination avec l'oxygène, comme dans le matériau AlGaAs, ce qui crée des pièges au niveau du matériau. La solution consiste à bien contrôler l'environnement de croissance et d'utiliser certains dopants moins sensibles à l'oxygène comme le Silicium et le Sélénium [66].

II. 6.6 L'émetteur et la base

La majorité des photons sont absorbés au niveau de l'émetteur et de la base. L'émetteur est la première couche après la couche fenêtre qui reçoit la lumière. Elle est mince et fortement dopée par rapport à la base ($10^{+18}cm^{-3}$). Le dopage de la base joue un rôle primordial dans l'amélioration des performances de la cellule solaire. Un faible dopage de la base donne une longue durée de vie et un fort coefficient de diffusion pour les porteurs minoritaires, ce qui améliore leur longueur de diffusion : $L = \sqrt{D\tau}$ (D : coefficient de diffusion, τ : durée de vie du porteur minoritaire). D'autre part, il augmente le courant d'obscurité qui provoque la dégradation des performances de la cellule. Il faut donc bien optimiser le dopage de la base. On note ici que la longueur de diffusion et la durée de vie du porteur minoritaire sont les paramètres clé pour le choix des matériaux [33, 67].

II. 6.7 Cellule à champ arrière " B.S.F"

La couche BSF (Back Surface Field) sert à minimiser la recombinaison en face arrière de la cellule. Elle est obtenue par transition abrupte du dopage sur la face arrière de la cellule solaire dans la zone même du contact ohmique. L'introduction de cette couche permet d'améliorer les

caractéristiques électriques de la pile solaire, en particulier la tension de circuit ouvert, par réduction du courant d'obscurité. La minimisation de la recombinaison en face arrière par la couche BSF permet aussi l'amélioration de la réponse spectrale pour les fortes longueurs d'onde. Ceci apporte alors une augmentation de la densité de courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert [68]. Les porteurs excédentaires ainsi créés, au voisinage de la base, au lieu de s'y recombiner, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction (Fig. 32). Les semi-conducteurs sélectionnés pour la réalisation de cette couche doivent avoir [36]:

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

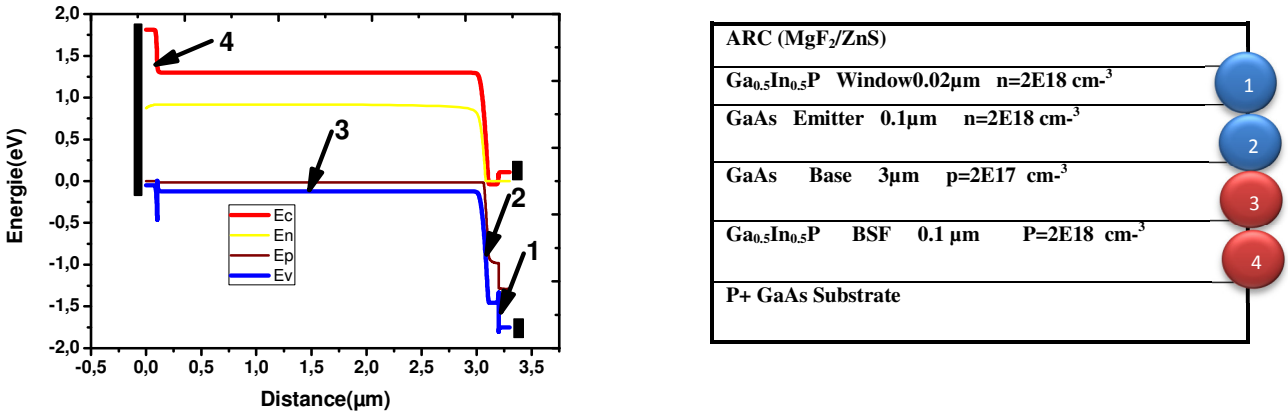


Figure 32 : Diagramme de bandes d'énergie de la cellule solaire n+p GaAs, sous éclairement, avec sa structure (1- couche fenêtre, 2- émetteur, 3- base, 4- BSF).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les cellules solaires à multijonctions en matériaux III-V, avec ces différentes approches, en portant notre choix sur la cellule solaire monolithique tandem. Nous avons étudié les différents défis et conditions rencontrés dans sa conception. Ensuite nous avons étudié les constituants de base d'une cellule solaire photovoltaïque à haute performance. Le chapitre suivant est consacré aux propriétés des matériaux constituant la cellule solaire Tandem.

Chapitre III :

Propriétés des matériaux utilisés

Chapitre III

Propriétés des matériaux utilisés

III. 1 Introduction

La modélisation des dispositifs photovoltaïques n'est pas simple ; elle dépend fortement de plusieurs propriétés optoélectroniques intrinsèques du matériau, telles que la vitesse de recombinaison en surface et en volume, la durée de vie et la mobilité des porteurs minoritaires, la longueur de diffusion, l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption. Le nombre élevé de ces paramètres complique la résolution des équations analytiques. De nombreuses simplifications et hypothèses sont utilisées pour obtenir des solutions analytiques. Du fait que ces simplifications occultent de nombreux phénomènes physiques internes, qui rendent l'étude analytique des cellules solaires approximatives, on opte souvent pour la résolution numérique qui fournit des solutions voisines des caractéristiques expérimentales et tient compte du maximum de données. Dans la modélisation des cellules solaires, différents matériaux sont utilisés. Ces derniers peuvent être composés d'un seul élément comme le Si et le Ge ou de semi-conducteurs binaires comme le GaAs, l'InP et le GaP ou encore d'autres matériaux ternaires et quaternaires. L'intérêt essentiel de ces alliages est d'obtenir de bons matériaux ayant des propriétés optiques et électroniques optimales pour augmenter le rendement de la cellule solaire. Parfois on utilise certains alliages dont les propriétés physiques et électroniques ne peuvent pas être calculées théoriquement. Dans ce cas, des mesures expérimentales sont nécessaires pour connaitre précisément leurs valeurs.

Actuellement on utilise, dans la recherche, certains outils et techniques mathématiques qui donnent des valeurs proches de l'expérimentation, ce qui nous permet de connaitre les propriétés des matériaux ternaires et quaternaires.

III. 2 Calcul des propriétés des alliages semi-conducteurs III-V

L'étude des alliages des semi-conducteurs III-V connait un grand intérêt dans le développement des cellules solaires à multijonctions. L'identification des propriétés de ces alliages devient nécessaire et indispensable pour une meilleure exploitation des caractéristiques de ces matériaux. Cependant, à cause de la complexité de ce type de matériaux, certains de leurs paramètres restent inconnus, ce qui nécessite des approximations mathématiques.

L'interpolation est l'une des méthodes qui donne de bonnes estimations pour ces paramètres. Les résultats obtenus par expérimentation confirment l'efficacité de ces méthodes dans l'identification des valeurs de ces paramètres [69].

Un paramètre T dans un alliage ternaire constitué avec des éléments (A, B et C) est représenté par une interpolation linéaire avec les paramètres binaires (B's) suivant la formule présentée dans l'équation (46) :

$$T_{ABC}(x) = xB_{AC} + (1-x)B_{BC} = a + bx \quad (46)$$

Dans le cas d'un alliage ternaire $A_xB_{1-x}C$; a=B_{BC} et b= B_{AC}-B_{BC}, cette loi est connue sous le nom de la loi de VEGARD [69-7].

Cependant, certains paramètres des matériaux s'écartent largement de la relation linéaire en présentant une dépendance approximativement quadratique de la fraction molaire (x) du matériau. Dans un tel cas, la valeur du paramètre à chercher peut être très efficacement approchée par la relation suivante :

$$T_{ABC}(x) = xB_{AC} + (1-x)B_{BC} + x(1-x)C_{A-B} = a + bx + cx^2 \quad (47)$$

Où : a = B_{BC}, b =B_{AC}-B_{BC} et c = -C_{AB}.

Le paramètre c (C_{A-B}) est appelé paramètre de "Bowing" ou paramètre "Non Linaire". La formule (48) permet le calcul du gap dans le matériau $Ga_xIn_{1-x}P$ [52]. Le tableau 8 donne la valeur de **Bowing** pour certains matériaux III-V.

$$Eg_{GaxIn1-xP} = xEg_{GaP} + (1-x)Eg_{InP} - x(1-x)B_{GaInP} \quad (48)$$

Tableau 8 : Paramètre de Bowing pour quelques matériaux ternaires [70].

Matériaux	AlGaAs	AlGaP	AlInP	GaInAs	GaInP	AlGaN	GaAsN	InAsN
Paramètre de Bowing E_g^{Γ} à 0K	0.127+1.31x	0	-0.48	0.477	0.65	0	120.4-100x	4.22

III. 3 Cellule solaire tandem GaInP/GaAs

Une structure Tandem peut être définie, en général, comme un système monolithique comprenant une succession de cellules solaires reliées entre elles, électriquement et optiquement, par des diodes tunnels. Dans une cellule solaire monolithique, la cellule solaire supérieure contribue avec

un grand pourcentage dans l'efficacité totale de la cellule. Elle doit avoir une forte énergie de gap, avec une épaisseur suffisante pour absorber les photons de forte énergie. Elle doit également être transparente pour les photons de faible énergie. D'autre part, la cellule inférieure convertit les photons à faible énergie en courant électrique et améliore le rendement de la structure [9]. Elle doit avoir un faible gap en comparaison avec la cellule supérieure. Elle doit également vérifier la condition d'égalité de courant avec la cellule supérieure (Current-Matching). Cela implique que les performances de la cellule solaire tandem dépendent des propriétés des deux cellules supérieure et inférieure. Le circuit électrique équivalent de la structure Tandem (à deux cellules), comprenant les résistances parasites, est représenté dans la figure 33.

La cellule solaire GaInP/GaAs est une structure à haut rendement. Elle est apparue en 1994 et produite en 1996 sur un substrat en Germanium. Elle était utilisée dans les applications spatiales. Vu sa bonne tolérance aux radiations solaires, le premier satellite équipé avec cette cellule tandem fut lancé en 1997 [36].

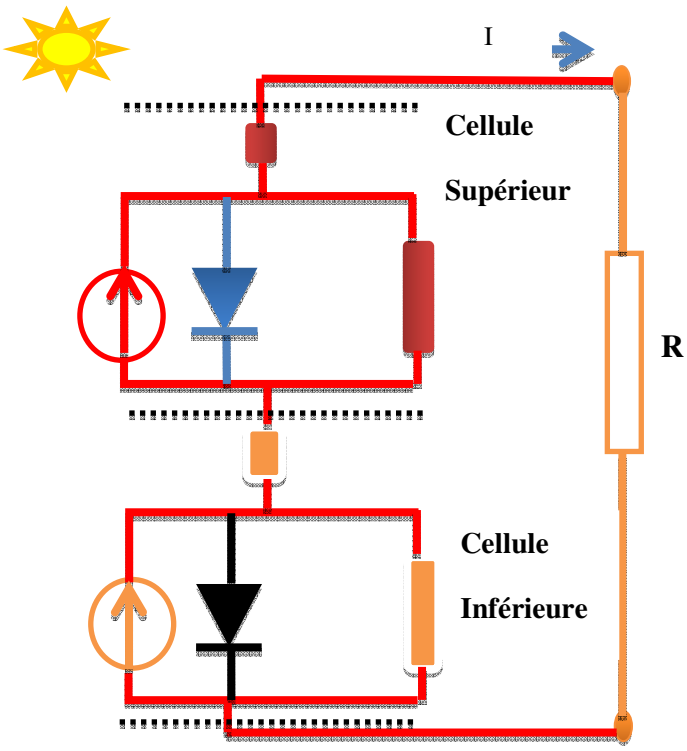


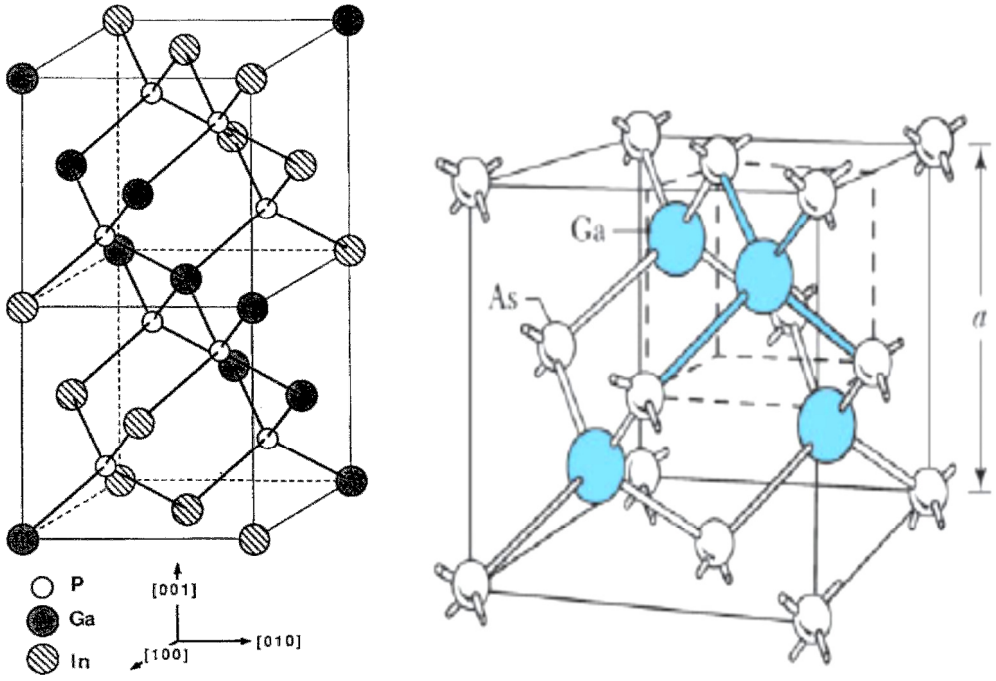
Figure 33 : Circuit équivalent d'une celle solaire monolithique à deux cellules.

III. 3. 1 Structure cristalline des matériaux utilisés

La plupart des semi-conducteurs III-V cristallisent en un réseau **Zinc-blinde**; ce dernier est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées imbriqués, l'un d'éléments de la colonne III et l'autre d'éléments de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale (Fig. 34).

Tableau 9 : Extrait du tableau périodique des éléments [36].

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



(a) (b)

Figure 34 : Structure cristalline des deux matériaux utilisés (a) GaInP [53], (b) GaAs [2].

III. 3. 2 Le matériau GaAs

L'arséniure de gallium est un matériau à gap direct, composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V. Il est utilisé dans un large domaine d'application en électronique (LEDs infrarouge, Laser, Fibre optique et cellules solaires). En comparaison avec le Si, il possède un fort coefficient d'absorption (90% des photons sont absorbés dans une épaisseur de 3µm) [46], une forte mobilité des électrons [47]-[25], une forte résistance à la radiation solaire, ainsi qu'une forte stabilité à température élevée et peut être facilement transformé en semi-conducteur ternaire. D'un autre côté, le Si a quelques avantages par rapport au GaAs. Il est moins cher, il se fabrique sur des grandes plaquettes (jusqu'à 12 pouces) et la durée de vie des porteurs minoritaires est plus longue qu'avec le GaAs [25].

Le GaAs est connu comme le matériau le plus adapté à la conversion photovoltaïque, grâce à sa bande interdite directe, de valeur 1.42eV, qui s'adapte bien avec le spectre solaire. La valeur de sa bande interdite est proche de la valeur idéale d'une cellule solaire mono-jonction (1.4 eV pour le spectre solaire AM1.5G (1.6 eV AM0)) [19].

La première cellule solaire fabriquée à base du semi-conducteur GaAs avait un rendement de 3%. Elle fut développée en Russie en 1960 dans l'institut technologique de physique PTI (Physico Technical Institute). Le rendement de la cellule GaAs a subi une forte évolution avec l'introduction de la couche fenêtre, en utilisant le matériau AlGaAs. Ce dernier permet de minimiser la recombinaison au niveau de la surface de la cellule GaAs et de rendre la cellule solaire très sensible aux photons de forte énergie. Les propriétés électriques et cristallines du matériau GaAs sont représentées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Propriétés électroniques et cristallines des matériaux GaAs et $Al_xGa_{1-x}As$ à 300 K.

Paramètre	Valeur $Al_xGa_{1-x}As$	GaAs	Réf.
Energie de Gap E_g (eV)	$E_g(x) = 1.247x + 1.424$. $0 \leq x \leq 0.45$ $E_g(x) = 0.143x^2 + 0.125x + 1.900$. $0.45 < x \leq 1$ [71] $E_g(x) = 0.144x^2 + 0.124x + 1.981$. $0.45 < x \leq 1$ [54]	1.424	[71], [54]
Densité ($g.cm^{-3}$)	$-1.6x + 5.36$ $-1.56x + 5.32$	5.360 5.32	[71], [54]

Coefficient de dilatation thermique linaire α ($x10^{-6}$ °C^{-1})	$-0.53x + 5.73$	5.73	[54]
Constante d'électrique ε_r	$\varepsilon_r(x) = -3.12x+13.18$ $\varepsilon_r(x) = -2.84x +12.9$	13.18 12.9	[71], [69], [54]
Affinité électronique χ(eV)	$\chi(x) = -1.1x +4.07$, $0\leq x\leq 0.45$ $\chi(x) = -0.14x +3.64$, $0.45<x\leq 1$	4.07	[71], [54]
Constante de maille *a*(A°)	$a(x) = 0.0078x +5.6533$	5.6533	[71], [54]
Coefficient d'Auger A (cm^6/s)	/	Dopé (n) 1.9×10^{-31} Dopé (p) 12×10^{-31}	[54]
Recombinaison radiative A_0 (cm^3/s)	$A_0(Eg) = 10^{-10}$, pour T = 300k	10^{-10}	[54]
Recombinaison en surface	Surface libre : 4×10^5 cm/s pour x=0.08	Surface libre : 4×10^5 cm/s	[54]
Densité effective d'états N_c ($1/cm^3$) Densité effective d'états N_v ($1/cm^3$)	$N_C = 2.5 \times 10^{19}(0.063 + 0.083x)^{3/2}$, $x < 0.41$ $= 2.5 \times 10^{19}(0.85 - 0.14x)^{3/2}$, $x > 0.45$ $N_V = 2.5 \times 10^{19}(0.51 - 0.25x)^{3/2}$	4.7×10^{17} 9.8×10^{18}	[54-18] [54-18]
Masse effective des électrons et des trous $m^*_{e\,(x)}$ et $m^*_{h\,(x)}$	/	$\frac{m^*_e}{m_0} = 0.0670$ $\frac{m^*_h}{m_0} = 0.642$	[18-72] [18-72]
Concentration de porteurs intrinsèques n_i	$n_i = \sqrt{N_C N_V}\exp[-\frac{E_g}{2kT}]$	2.1×10^6	[54], [18]

a- Variation de la mobilité en fonction de la concentration

La variation de la mobilité des trous, dans le matériau GaAs en fonction de la concentration du dopage et de la température, est obtenue à partir des données expérimentales des travaux de Wiley [73] :

$$\mu_p\left(\frac{cm2}{Vs}\right) = [0.0025\left(\frac{T}{300}\right)^{2.3} + 4.10^{-21}N\left(\frac{T}{300}\right)^{1.5}]^{-1} \quad (49)$$

Où T est la température absolue en °K et N la concentration des dopage des trous.
D'une part, la variation de la mobilité des électrons, en fonction de la concentration dans le matériau GaAs, est donnée par Rode [73].

$$\mu_n\left(\frac{cm2}{Vs}\right) = 9400\left(\frac{300}{T}\right)^{0.67}[1 + N/10^{17}]^{-0.5} \quad (50)$$

b- Durée de vie des porteurs minoritaires

La durée de vie des porteurs minoritaires dans GaAs est donnée par l'expression (51) [73] :

$$1/\tau_{n,p} = 1/\tau_{nr} + BN_{A,D} \quad (51)$$

Où B est le coefficient de la recombinaison radiative, sa valeur moyenne et de l'ordre de :1.36×10^{-10} cm^3/s à 300K dans les deux region n et p, τ_{nr} est la durée de vie de la recombinaison non radiative donnée par la formule suivante [73] :

$$\frac{1}{\tau_{nr}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + CN_{A,D}^2 \quad (52)$$

Où C est le coefficient de recombinaison de Auger dont la valeur optimale est de 5×10^{-31} cm^6/s . La valeur expérimentale de τ_{SRH} (Shockley-Read-Hall) est 0.9µs [73].

Tableau 11 : Variation des mobilités des électrons et des trous dans le Matériau GaAs en fonction de la variation de la concentration du dopage, valeurs calculées à partir des équations (49) et (50).

concentration du dopage GaAs	Mobilité des (*électrons*) [$cm^2/V.s$]	Mobilité des (*trous*) [$cm^2/V.s$]
1.0×10^{16}	8.96×10^{3}	393.70
2.0×10^{16}	8.58×10^{3}	387.60
4.0×10^{16}	7.94×10^{3}	375.94
6.0×10^{16}	7.43×10^{3}	364.96
8.0×10^{16}	7.01×10^{3}	354.61
1.0×10^{17}	6.65×10^{3}	344.83
2.0×10^{17}	5.43×10^{3}	303.03
4.0×10^{17}	4.20×10^{3}	243.90
6.0×10^{17}	3.55×10^{3}	204.08
8.0×10^{17}	3.13×10^{3}	175.44
1.0×10^{18}	2.83×10^{3}	153.85
2.0×10^{18}	2.05×10^{3}	95.24
4.0×10^{18}	1.47×10^{3}	54.05
6.0×10^{18}	1.20×10^{3}	37.74
8.0×10^{18}	1.04×10^{3}	28.99
1.0×10^{19}	9.35×10^{2}	23.53
2.0×10^{19}	6.63×10^{2}	12.12
4.0×10^{19}	4.69×10^{2}	6.15
6.0×10^{19}	3.83×10^{2}	4.12
8.0×10^{19}	3.32×10^{2}	3.10

III. 3. 3 Le matériau GaInP

Le $\mathbf{Ga_xIn_{1-x}P}$ est un matériau ternaire, composé à partir des deux semi-conducteurs binaires : **GaP** (x=1, Eg=2.26 eV) et **InP** (x=0, E_g=1.344 eV). Il a un gap direct pour une fraction molaire du Galium inférieure à 0.74 et un gap indirect sinon. Il forme une bonne interface avec le matériau GaAs pour x = 0.516. En lui ajoutant l'Aluminium, on obtient l'alliage AlInGaP qui possède un gap variant entre 1.43 et 2.2 eV et qui maintient toujours une bonne interface avec le GaAs, ce qui donne

plusieurs combinaisons dans la conception des cellules solaires monolithiques. En plus, pour la réalisation des couches fenêtres, le matériau GaInP à des propriétés excellentes par rapport au matériau AlGaAs [73,74]. Il ne présente pas de défauts liés à l'incorporation de l'oxygène lors de sa croissance et il possède une faible vitesse de recombinaison à la surface. Avec la possibilité d'utiliser le Ge comme une couche substrat pour la cellule tandem GaInP/GaAs, l'addition d'une troisième cellule devient possible. Les propriétés du matériau $Ga_xIn_{1-x}P$ sont présentées dans le tableau 12.

Tableau 12 : Propriétés électroniques et cristallines du matériau $Ga_xIn_{1-x}P$ à 300 K.

Paramètre	Ga $_x$In $_{1-x}$ P	$Ga_{0.51}In_{0.49}P$	Réf
Energie de gap E_g (eV)	$E_g(x) = -0.2722x^2 + 1.1925x - 1.3399$ $E_g(x) = 0.48x^2 + 0.69x + 1.34$ $0 < x < 0.63$ gap direct $E_g(x) \cong 2.26$ $0.77 < x < 1$ gap indirect $E_g(x) = xEg^{GaP} + (1-x)Eg^{InP}$	1.849	[75] [54] [9]
Densité (g.cm^{-3})	4.81-67x	4.47	[54]
Coefficient de dilatation thermique α (x10^{-6}°C^{-1})		5.3	Calculé
Constante électrique statique ε_s	ε_s (x) = 12.5 – 1.4x	11.8	[54]
Affinité électronique χ (Ev)	$\chi(x)$ = 4.38 – 0.58x	4.1	[54]
Constante de maille (A°)	5.653 pour x=0.51	5.653	[54]
Coefficient d'Auger A (cm^6/s)	$A(x) = -8.2 \times 10^{-30}x^2 + 8.3 \times 10^{-30}x + 9 \times 10^{-31}$	3×10^{-30}	[75] [54]
Recombinaison radiative A_0 (cm^3/s)	$A_0(Eg) = -2.362 \times 10^{-10}E_g^2 + 7.202 \times 10^{-10}E_g - 4.214 \times 10^{-10}$ $A_0(Eg) = (1 \pm 0.3)10^{-10}$; pour x= 0.5 et T =300k $A_0(Eg) = (4 \pm 1)10^{-10}$; pour x= 0.5 et T =150k		[75] [54]
Recombinaison en surface	Surface libre : $(2 \div 5) \times 10^4$ cm/s GaInP/GaAs : 1.5 cm/s		[54]

Densité effective d'états Nc (cm-^{3}) Densité effective d'états Nv (cm-^{3})	$N_C = 2(\pi qkTm_e^*/h^2)^{3/2}$ $N_V = 2(\pi qkTm_h^*/h^2)^{3/2}$	6.5x 10^{17} 1.45x10^{19}	[54-18]
Masse effective des électrons et des trous $m^*_{e\,(x)}$& $m^*_{h\,(x)}$	$\frac{m_e^*(x)}{m_0} = 0.0254x^2 - 0.114x + 0.08$ $\frac{m^*_{h\,(x)}}{m_0} = 0.19x + 0.6$	$\frac{m_e^*}{m_0}$ = 0.111 $\frac{m_h^*}{m_0}$=0.500	[75-9] [75]
Concentration des porteurs intrinsèques n_i	$n_i = \sqrt{N_C N_V}\exp[-\frac{E_g}{2kT}]$	391	[54-9-18]

a- Variation de la mobilité en fonction de la concentration du dopage dans le matériau GaInP (0.5)

Pour le matériau GaInP, les résultats expérimentaux de Ikeda [36] et Shitara [47] peuvent être approximés par les formules (53) et (54). Ceci permet d'avoir des valeurs de la mobilité des électrons et des trous, en fonction de la concentration du dopage qui varie entre 10^{+16} et 10^{+19} (voir tableau 13 et figure 35).

$$\mu_n\left(\frac{cm2}{Vs}\right) = \frac{4000}{\left[1+\left(\frac{N}{1E15}\right)^{0.2}\right]} \quad (53)$$

$$\mu_p\left(\frac{cm2}{Vs}\right) = 40[46]\ ;\ 34\ [73] \quad (54)$$

b- Durée de vie des porteurs minoritaires

La durée de vie des porteurs minoritaires dans le matériau GaInP est donnée par l'expression suivante :

$$1/\tau_{n,p} = 1/\tau_{nr} + BN_{A,D} \quad (55)$$

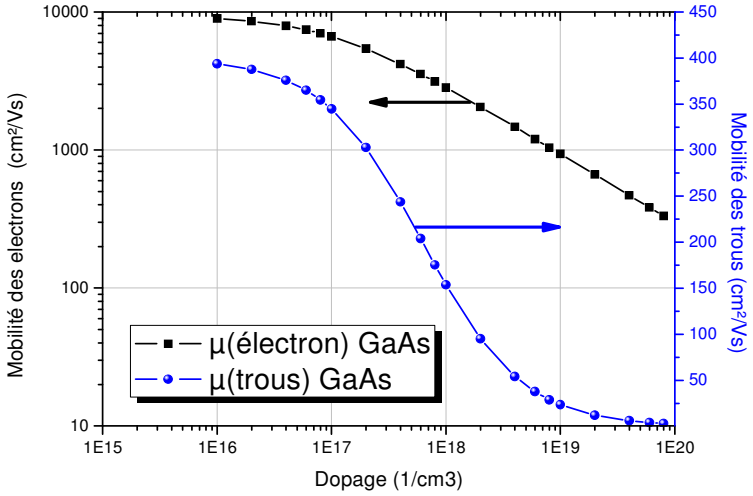
Tableau 13 : Variation de la mobilité du matériau $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ en fonction de la concentration du dopage.

Concentration du dopage $Ga_{0.5}In_{0.5}$	Mobilité des (électrons) [$cm^2/V.s$]	Mobilité des (trous) [$cm^2/V.s$]
1.0×10^{16}	1547.45	40
2.0×10^{16}	1418.16	40
4.0×10^{16}	1293.96	40
6.0×10^{16}	1224.02	40
8.0×10^{16}	1175.69	40
1.0×10^{17}	1138.99	40
2.0×10^{17}	1029.50	40
4.0×10^{17}	927.12	40
6.0×10^{17}	870.62	40
8.0×10^{17}	832.07	40
1.0×10^{18}	803.04	40
2.0×10^{18}	717.74	40
4.0×10^{18}	639.69	40
6.0×10^{18}	597.30	40
8.0×10^{18}	568.65	40
1.0×10^{19}	547.23	40
2.0×10^{19}	484.98	40
4.0×10^{19}	428.93	40
6.0×10^{19}	398.85	40
8.0×10^{19}	378.66	40

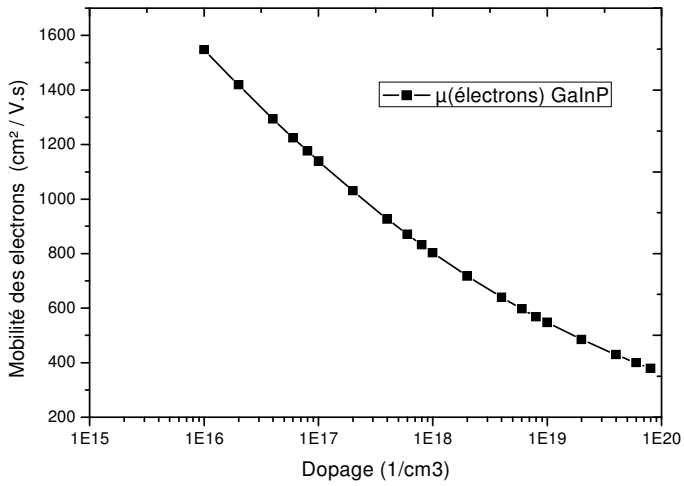
Où : B est le coefficient de la recombinaison radiative (1+/- 0.3) $\times 10^{-10}$ cm^3/s à 300K et τ_{nr} est la durée de vie de la recombinaison non radiative donnée par la formule suivante :

$$\frac{1}{\tau_{nr}} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + CN_{A,D}^2 \qquad (56)$$

Pour le GaInP (0.5), τ_{SRH} est égal à 5µs et *C* est le coefficient de recombinaison de Auger : $3 \times 10^{-30} cm^6/s$.



(a)



(b)

Figure 35 : Variation de la mobilité des électrons et des trous en fonction de la concentration du dopage dans les matériaux : a) GaAs, b) GaInP.

III. 3. 4 Propriétés optiques

a- Indice de réfraction et coefficient de réflexion

L'un des paramètres les plus influents sur le rendement de la cellule solaire et qui permet de réduire les pertes optiques dans la cellule solaire est l'indice de réfraction (n). L'expression de ce dernier est donnée par la formule suivante [69] :

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1} \quad (57)$$

Où ε_1 et ε_2 sont respectivement les composantes réelle et imaginaire de la constante diélectrique complexe ε^* qui s'écrit comme :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 \quad (58)$$

Par ailleurs, le coefficient d'extinction (k) est exprimé par l'équation suivante :

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1} \quad (59)$$

Il permet de calculer par la suite le coefficient d'absorption (α) par la formule suivante :

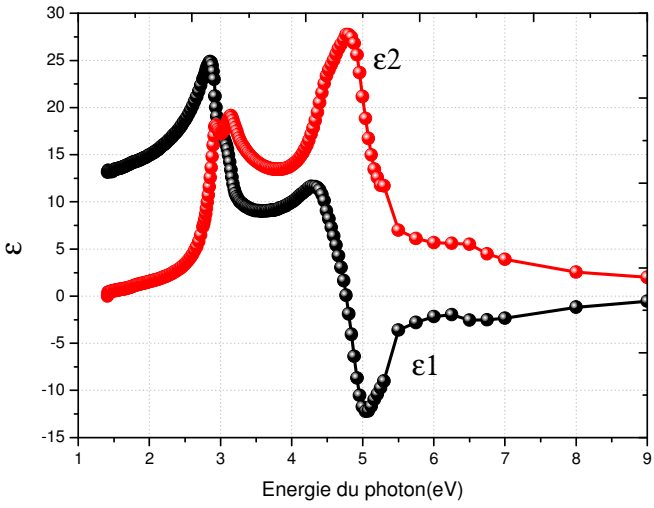
$$\alpha = 4\pi k/\lambda \qquad \text{Où } \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{1.2398}{Eg}\,\mu m \quad (60)$$

h est la constante de Planck, c et *ν* : sont la vitesse et la fréquence de la lumière dans le vide.

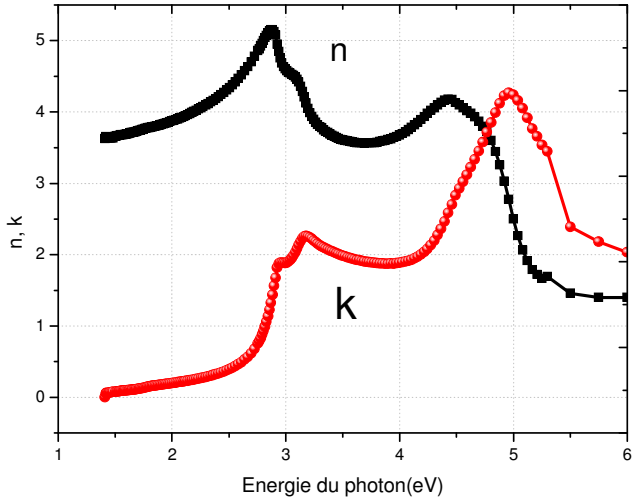
Ces deux paramètres nous permettent de calculer le coefficient de réflexion normal à l'interface matériau/vide qui est donné par :

$$R = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2} \quad (61)$$

Les propriétés optiques des matériaux GaAs et GaInP sont représentées sur les figures 36, 37 et 38.

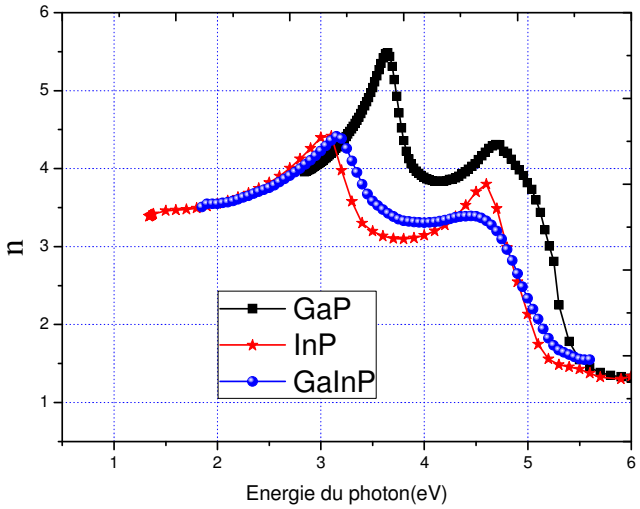


(a)

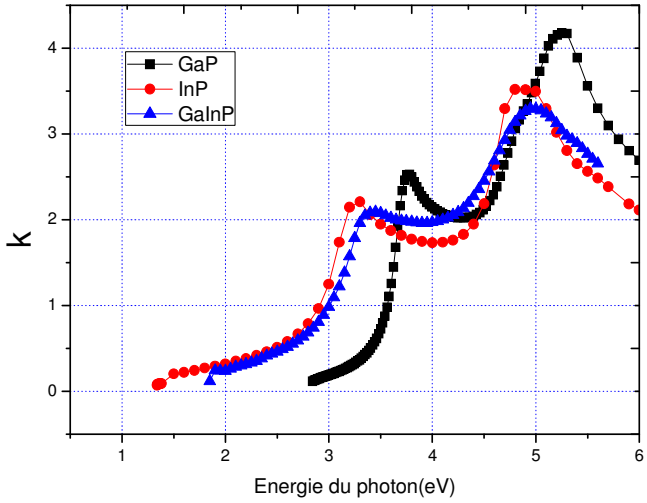


(b)

Figure 36 : (a) Spectre de la constante diélectrique réelle et imaginaire $\varepsilon_1(E)$ et $\varepsilon_2(E)$, (b) Spectre de l'indice de réfraction n(E) et coefficient d'extinction k(E) du matériau GaAs [69].



(a)



(b)

Figure 37 : Indice de réfraction n(E) (a) et coefficient d'extinction k(E) (b), des matériaux GaP, InP et $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ [69].

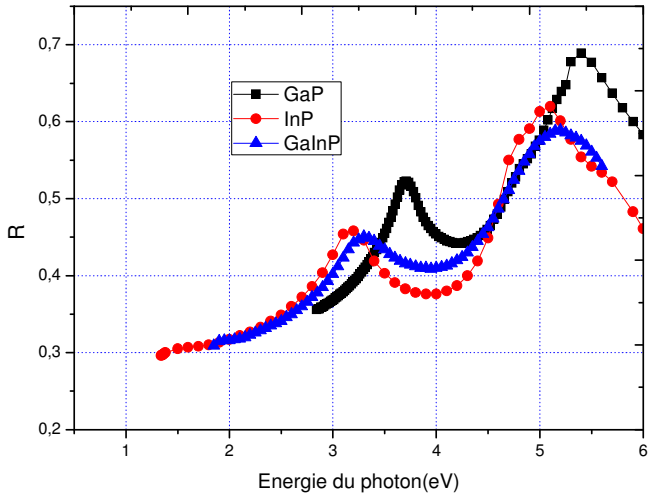


Figure 38 : Coefficient de réflexion des matériaux GaP, InP et $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ [69].

b- Coefficient d'absorption de GaInP

La modélisation des cellules solaires à base du semi-conducteur GaInP nécessite une connaissance précise de ses propriétés optiques. Plusieurs modèles ont été proposés pour le coefficient d'absorption du semi-conducteur GaInP, mais pour la plupart, les propriétés optiques à large bande du spectre adapté au GaInP ne sont pas décrites de manière adéquate. Le tableau 14 et la figure 39 donnent, respectivement, les différents modèles du coefficient d'absorption de GaInP et les variations de ce dernier en fonction de la longueur d'onde.

Tableau 14 : Coefficion d'absorption du matériau GaInP.

Le model	Valeur
Model de Kurtz et al Réf. [76-36]	$\alpha_{GaInP} = 5.5\sqrt{E - E_g} + 1.5\sqrt{E - (E_g - 0.1)}$ µm-1
Model Réf. [77]	$\alpha_{GaInP} = 4.55\sqrt{E - E_g} + 2.05\sqrt{E - (E_g - 0.1)}$ µm-1
Model S. Adachi [69]	Tableaux page 387-388
Model Silvaco	Réf [78]

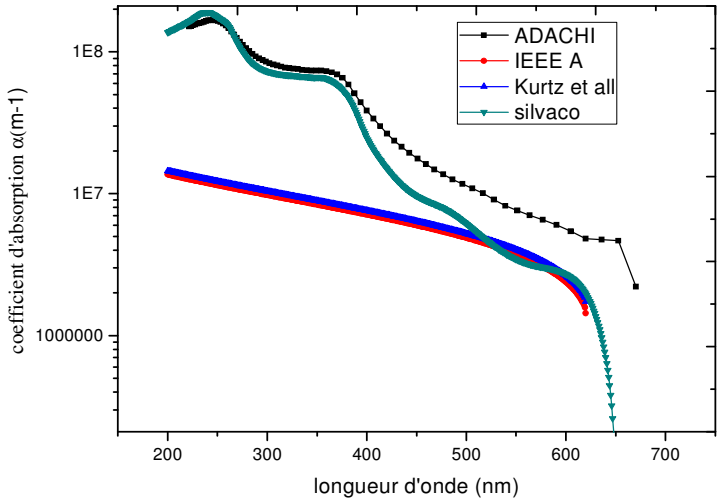


Figure 39 : Coefficient d'absorption du matériau GaInP.

c- Coefficient d'absorption de GaAs

Le coefficient d'absorption du semi-conducteur GaAs peut être approximé par l'expression décrite dans la réf. [15]:

$$\alpha(\lambda) \approx 0 \ \text{pour} \lambda > 0.88\ \mu m \quad (62)$$

$$\alpha(\lambda) \approx 10^{-37.5\lambda + 34} cm^{-1} \text{pour}\ 0.8 \leq \lambda \leq 0.88\ \mu m \quad (63)$$

$$\alpha(\lambda) \approx 10^{-3.3\lambda + 6.64} cm^{-1} \text{pour} \lambda < 0.8\ \mu m \quad (64)$$

ou par le tableau présenté dans la Réf [69]. La figure 40 présente le coefficient d'absorption et de réflexion du matériau GaAs selon S. Adachi Réf [69].

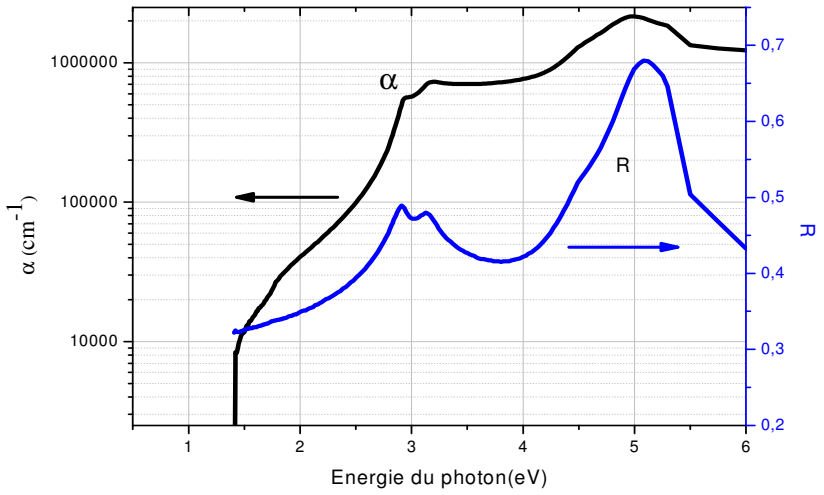


Figure 40 : Coefficient d'absorption et de réfraction du matériau GaAs [69].

III. 3. 5 Résistivité thermique des matériaux GaInP et AlGaAs

La figure 41 présente la résistivité thermique du matériau $Al_xGa_{1-x}As$ en fonction de la fraction molaire (x). Une valeur approximative de cette résistivité peut être obtenue en utilisant la formule (65) [54] :

$$R_{th} = 2.27 + 28x - 30x^2 \text{ (cm.k/w)}. \quad (65)$$

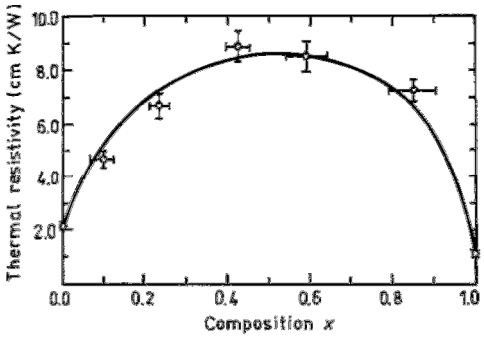


Fig. 1.5.1. Thermal resistivity versus Al fraction x. Solid curve is a theoretical fit to the experimental data, 300 K (after Afromowitz [1973]).
(Reprinted with permission from the American Institute of Physics, © 1973.)

Figure 41 : Résistivité thermique en fonction de la fraction molaire x du matériau $Al_xGa_{1-x}As$.

La variation de la résistivité thermique du matériau $Ga_xIn_{1-x}P$, en fonction de la concentration (x) de Ga, est donnée par la figure 42. On voit que le maximum de la résistivité thermique est obtenu pour x=0.5 ; ce qui fait de ce matériau un candidat potentiel dans les applications spatiales et dans les systèmes à concentrateurs.

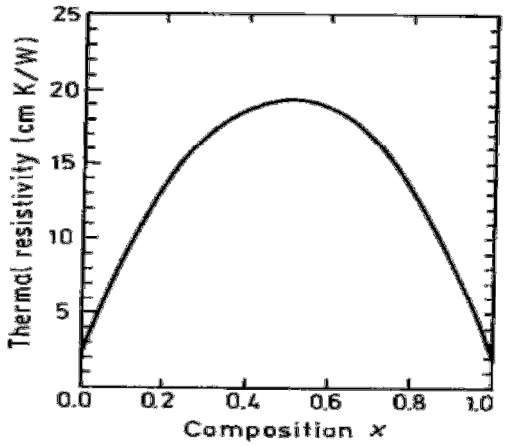


Figure 42 : Variation de la résistivité thermique en fonction de la fraction molaire (x) dans un alliage $Ga_xIn_{1-x}P$ à 300K [54].

III. 4 Matériaux utilisés dans l'encapsulation des modules

L'une des étapes les plus importantes dans la fabrication des modules photovoltaïques réside dans l'encapsulation des cellules solaires. La qualité du matériau encapsulant déterminera la durée de vie de ces modules. Les cellules solaires sont généralement mises en série ou en parallèle dans des modules dont les tailles peuvent être très variables, afin de permettre leur utilisation à des tensions et des courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs. La procédure d'encapsulation des cellules à l'intérieur d'un module a deux rôles principaux [79] :

- la protection des cellules solaire contre l'humidité, la pluie, les poussières, les chocs mécaniques, la corrosion et leur maintien dans une structure rigide,
- le contrôle de la température de la jonction, via un équilibre thermique entre le matériau semi-conducteur et l'air ambiant, à travers le matériau d'encapsulation.

Dans les conditions réelles de fonctionnement, plusieurs facteurs peuvent affecter les performances du module photovoltaïque :

1. le spectre solaire (qui change au cours de la journée, avec les conditions climatiques et géométriques du site),
2. l'intensité du spectre solaire,
3. l'angle d'incidence de la lumière,
4. la température de fonctionnement du module.

La conception spécifique d'une cellule solaire avec le matériau encapsulant est représentée dans la figure 43.

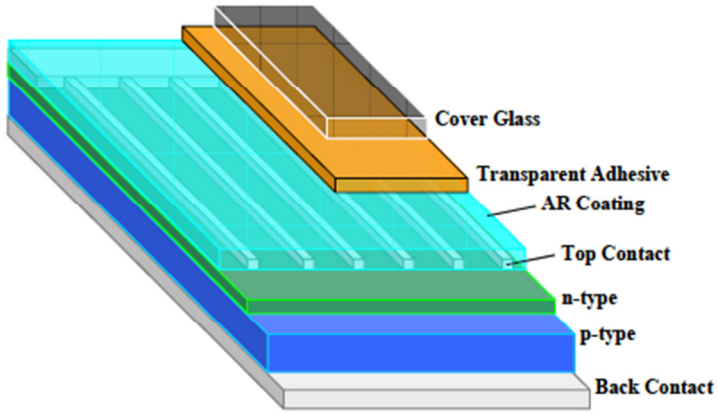


Figure 43 : Conception spécifique d'une cellule solaire avec le matériau encapsulant.

III. 4. 1 Principe de la photoluminescence ou Luminescent Down-Shifting (LDS)

Les performances de la cellule solaire peuvent être améliorées à travers une adaptation entre le spectre solaire et la réponse spectrale de la cellule solaire. L'exploitation de l'effet de la photoluminescence (LDS), en photovoltaïque, a été proposé pour la première fois par Hovel et al, à la fin des années 70 [80, 81]. La photoluminescence est définie comme une nouvelle approche qui ne nécessite pas des procédés de fabrication très compliqués durant la conception du générateur photovoltaïque. De plus, il est possible de l'introduire sur des modules ou des cellules solaires déjà existantes [82]. Le principe de LDS est basé sur le transfert d'une partie du spectre solaire de forte énergie située dans la région de l'ultraviolet (UV) (où le rendement quantique (QE) de la cellule solaire est faible) vers la région visible et infrarouge (ou QE est élevé). Une fine couche du matériau Polyméthacrylate de méthyle (PMMA), dopé avec des colorants organiques optiquement actifs, joue le rôle d'un convertisseur de photons. Ces colorants absorbent les photons dans la région ultraviolette (UV) avant d'atteindre le matériau

encapsulant, puis réémettent ces photons dans la région visible (Fig. 44). Le rendement de la cellule solaire peut être amélioré jusqu'à 10% ou plus dans certains cas (Van Sark et al. 2005) [81].

Pour une meilleure adaptation entre la couche LDS (PMMA dopé) et la réponse spectrale de la cellule solaire, les dopants organiques doivent être sélectionnés pour absorber le maximum de photons de forte énergie (où la cellule solaire a un faible rendement quantique), avant de remettre ces photons dans la région où la cellule a un fort rendement quantique.

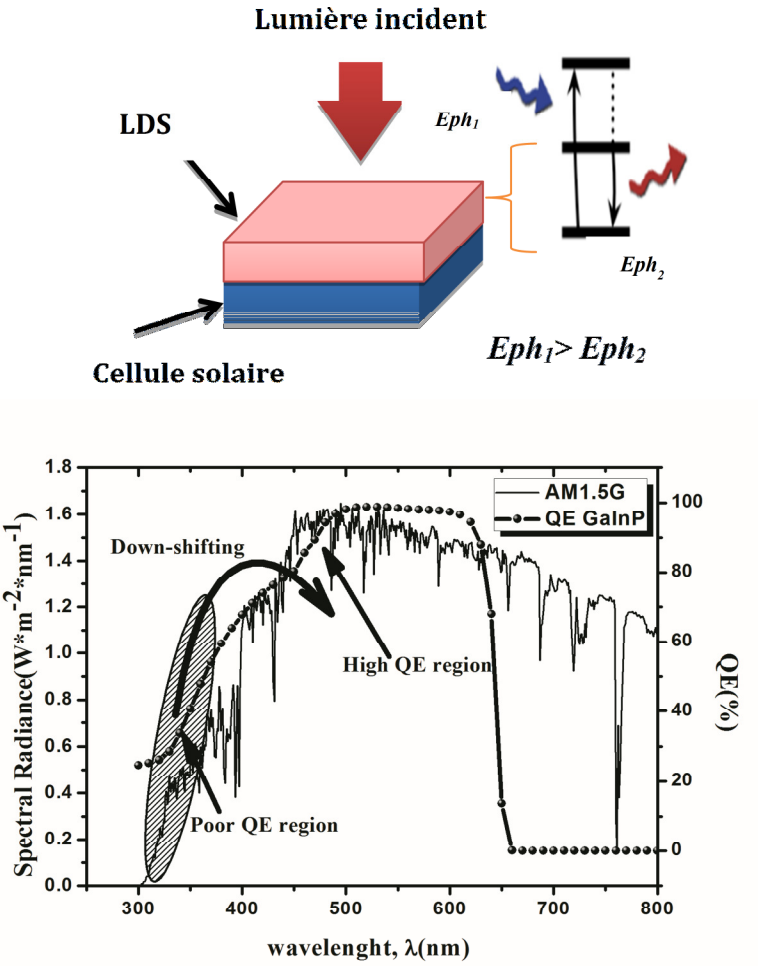


Figure 44 : Spectre solaire AM1.5G et rendement quantique de la cellule solaire GaInP avec le principe du Downshifting.

III. 4. 2 L'effet photoluminescent

La photoluminescence est un processus par lequel une substance absorbe des photons avec une énergie Eph_1 puis réémet ces photons avec une autre énergie Eph_2 où $Eph_1 > Eph_2$.

Un électron, dans un état fondamental d'énergie S0, se déplace après l'absorption d'un photon vers un autre état vibrationnel excité. Après une relaxation non radiative vers le niveau vibrationnel S1, l'électron récupère son état fondamental S0 par une relaxation radiative en émettant un photon. La fluorescence est donc définie par la perte d'énergie à travers un processus radiatif (Fig. 44). La présence du processus de relaxation non radiative entre l'absorption et l'émission implique que le photon émis a une énergie plus faible que l'énergie du photon absorbé, et donc la longueur d'onde du photon émise est plus grande que celle du photon absorbé. Cela permet de transférer les photons du bleu et l'ultraviolet vers le rouge et le visible du spectre solaire. Le déplacement de l'électron entre l'état vibrationnel et l'état fondamental engendre la création de pics dans le spectre d'absorption et d'émission du colorant (Fig. 45). On appelle Δν le déplacement de Stokes qui quantifie la distance entre les maximums d'absorption et d'émission du photon.

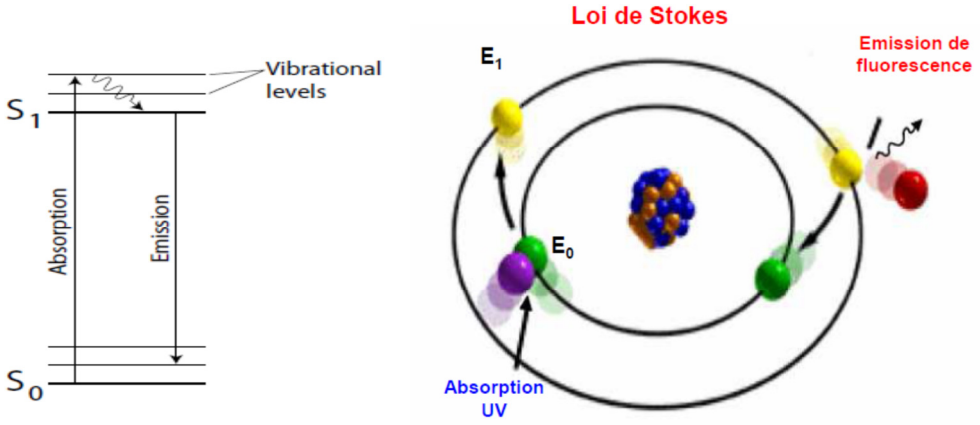
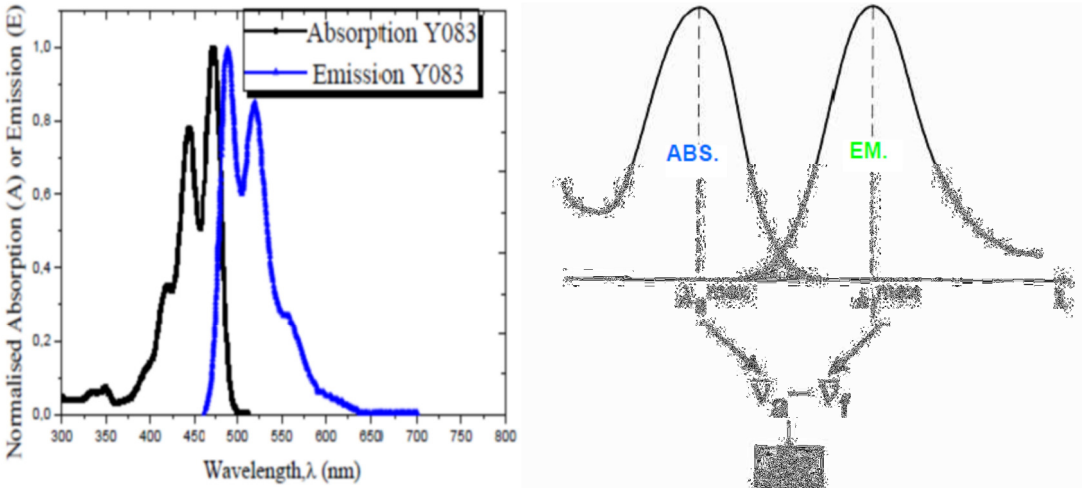


Figure 45 : Diagramme de Jablonski d'un niveau d'énergie du colorant organique (Dye) et le principe de la photoluminescence [83].



(a) (b)

Figure 46 : (a) Spectre d'émission et d'absorption d'un dopant organique.
b) Déplacement de Stokes.

III. 4. 3 Caractéristiques de la Fluorescence

Une molécule fluorescente se caractérise par les paramètres suivants :

- Rendement quantique de fluorescence : LQE
- Coefficient d'extinction ou absorbance spécifique : ε
- Temps de vie de fluorescence : τ

a. Rendement quantique de fluorescence

Le rendement quantique de fluorescence (Luminescence quantum efficiency) (LQE) est défini comme le rapport entre le nombre de photons émis et le nombre de photons absorbés par les molécules (dopants) [81]-[84]. Il varie en fonction de l'environnement des molécules (concentration et température), sa valeur peut aller de 0.05 à 1. Pour avoir de bonnes performances de la couche LDS, la valeur élevée de LQE (95% à 100%) est essentielle [85].

b. Coefficient d'extinction ou absorbance spécifique (ε)

Ce paramètre détermine la probabilité d'absorption d'une molécule. Sa valeur est considérée comme un critère de choix des colorants, plus ε est grand plus la fluorescence est bonne. Sa valeur est comprise entre 5000 et 250 000 $cm^{-1}.M^{-1}$.

c. **Durée de vie de fluorescence (τ)**

La durée de vie à l'état excité est la durée caractéristique pendant laquelle la molécule reste à l'état excité avant de retourner à son état fondamental. Cette grandeur est de l'ordre de la nanoseconde. Plus ce temps sera court, meilleure sera la sensibilité du colorant.

III. 4. 4 Matériaux encapsulant les colorants luminescents

Le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA : Polymethylmethacrylate) est un thermoplastique transparent obtenu par polyaddition (succession d'additions de molécules identiques : le monomère) dont le monomère est le méthacrylate de méthyle (MAM).

Il a été introduit récemment dans le procédé de fabrication des modules photovoltaïques car c'est un excellent encapsulant et c'est un matériau peu cher et facile à doper. Il se caractérise par ses fortes propriétés mécaniques et optiques [86].

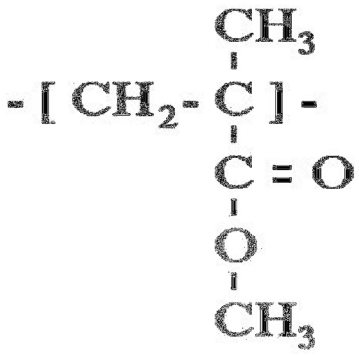
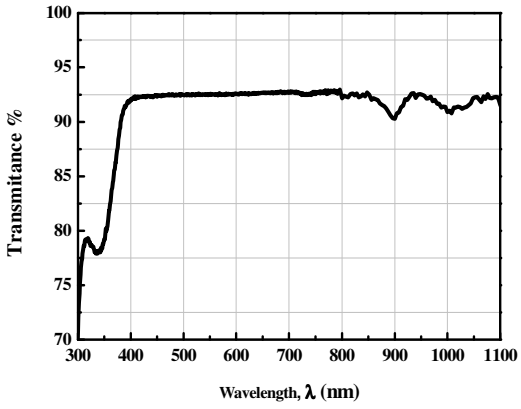
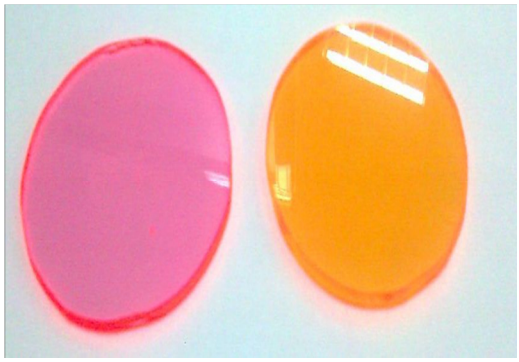


Figure 46 : Polyméthacrylate de méthyle $(C_5H_8O_2)_n$.



(a)



(b)

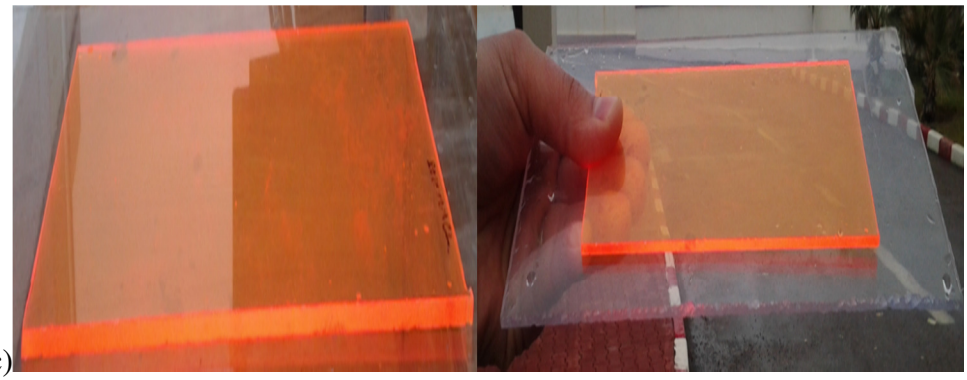
(c) 

Figure 47 : a) Spectre de Transmittance du matériau PMMA (résultat expérimental), b) Deux échantillons du PMMA dopés avec différentes couleurs de dopants, c) échantillon PMMA dopé et non dopé.

En plus de son spectre de transmission élevé dans toute la zone d'absorption de la cellule solaire [400-900ηm] (Fig. 47. a). Il est robuste au traitement à haute température durant le processus de fabrication et photo-stable durant une longue période (de 20 à 25 années) [87]. Il est aussi recyclable et a une excellente stabilité contre les radiations ultra-violettes (UV) [88].

En général, il existe trois familles de matériaux fluorescents utilisés dans le dopage de la couche PMMA : Les molécules organiques (colorants), les protéines auto-fluorescentes et les nano-cristaux semi-conducteurs (quantum dots).

Dans notre travail, nous ne considérons que les molécules organiques. On s'intéresse au fluorescents (BASF Lumogen Violet 570 (V570), Yellow 083 (Y083), Orange 240 (O240) et Red 300 (R300)) [89]. Ces dopants organiques sont des molécules à base de napthalomide et de beryline, fabriqués par BASF (Ludwigshafen, Germany) [82]. Ils ont été étudiés et exploités dans plusieurs papiers de Bryce S. Richards et Keith R. McIntosh [88], [90]. Ils sont non toxiques, faciles à introduire avec le PMMA dans le processus de fabrication, résistants à la température, photo-stable à l'UV et disposent d'une efficacité luminescence quantique proche de l'unité (LQE : Luminescence Quantum Efficiences) [85]. Le tableau 15 résume quelques propriétés de ces dopants.

Tableau 15 : Propriétés optiques et chimiques des dopants organiques utilisés [79], [91].

Caractéristiques	**Violet570**	**Yellow083**	**Orange240**	**Red300**
Abréviation	V570	Y083	O240	R300
Caractéristique chimique	Naphthalimide	Perylene	Perylene	Perylene
Forme physique	Poudre	Poudre	Poudre	Poudre
Densité [g/cm³]	1.28	1.27	1.36	1.40
Gamme d'absorption (nm)	300-410	350-500	440-550	-
Gamme d'émission (nm)	400-520	460-600	520-650	-
Max abs (nm) dans la couche PMMA	374	473	525	578
Max émis (nm)	413	490	539	613
LQE (%)	94	99	100	98

Le spectre d'absorption et d'émission des différents dopants organiques utilisés dans cette étude est représenté dans la figure 48.

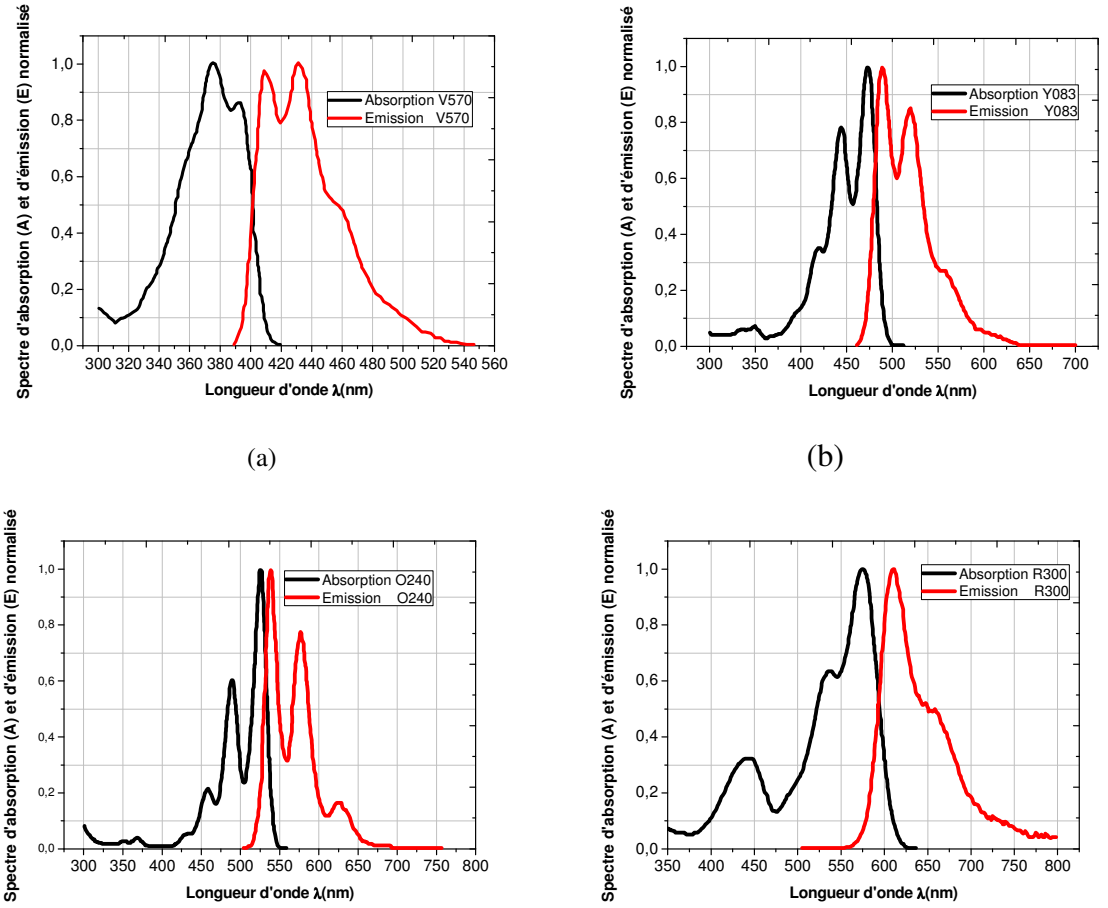


Figure 48 : Spectre d'absorption et d'émission normalisé du dopants : (a) (V570), (b) (Y083), (c) O240 et R300 [90].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les propriétés électriques et optiques des matériaux semi-conducteurs utilisés dans notre simulation. Ensuite, nous avons présenté des notions importantes sur la photoluminescence ou Downshifting (LDS) qui a été utilisée récemment, avec les matériaux encapsulant, dans la fabrication des modules photovoltaïques afin d'améliorer leur rendement à travers une bonne adaptation entre le spectre solaire et la réponse spectrale de la cellule. Les propriétés des matériaux encapsulants utilisés dans le PMMA et les différentes caractéristiques des colorants utilisés dans le dopage sont aussi présentées. Le chapitre suivant sera réservé à l'étude du modèle mathématique de la cellule solaire.

Chapitre IV :

Modèle mathématique de la cellule

Chapitre IV

Modèle mathématique de la cellule

IV. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous analysons les phénomènes qui interviennent dans le transport des charges, au niveau des différentes parties de la cellule solaire.

L'analyse des semi-conducteurs est basée, essentiellement sur l'équation de Poisson, les l'équation de continuité et les conditions aux limites. Ces équations sont les équations de base qui décrivent les différents phénomènes qui s'appliquent à la plupart des structures photovoltaïques, où certaines hypothèses simplificatrices sont formulées dans chaque cas de cette approche analytique. En effet, nous considérerons que les paramètres physiques et les niveaux de dopage demeurent constants dans les zones actives de la cellule et nous ne tiendrons pas compte des phénomènes de fort dopage existant dans la zone avant. Il en est de même pour les effets de concentration du rayonnement solaire.

La modélisation est souvent utilisée pour comprendre la théorie de la physique du matériau. Le modèle analytique est simple et ne nécessite pas la connaissance de tous les paramètres du matériau. Lors de la simulation, plusieurs paramètres physiques sont négligés à cause des hypothèses de simplification. Néanmoins, le modèle numérique rassemble le maximum de paramètres ; l'effet de chaque paramètre pouvant être étudié séparément.

L'utilisation des simulateurs solaires est devenue nécessaire dans la conception et l'analyse des cellules solaires du fait de la complexité des mécanismes physiques qui gouvernent ces dispositifs photovoltaïques [9].

De nombreux modèles, basés sur les paramètres physiques, ont été mis au point pour simuler le fonctionnement de la cellule solaire, par la quantification et les spécifications des propriétés de la cellule solaire, telles que la densité du dopage, la qualité du contact électrique, le taux de recombinaison en volume et en surface ainsi que la caractéristique du revêtement antireflet. La modélisation permet une conception efficace de la cellule solaire.

IV. 2 Équations de base du semi-conducteur

Un programme de modélisation des cellules solaires devrait, au moins, être capable de résoudre les équations de base des semi-conducteurs qui sont les suivantes :

IV. 2. 1 Equation de Poisson

L'équation de Poisson relie les variations du potentiel électrostatique (champ électrique) aux densités locales de charge. Elle s'exprime par [92] :

$$\frac{-\mathrm{d}^2\varphi}{dx^2} = \frac{\mathrm{dE}}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} \tag{66}$$

Où ρ est la charge électrique totale dans le semi-conducteur, ε_0 et ε_r la permittivité dans le vide et relative dans le matériau respectivement, φ le potentiel électrostatique, n et p les concentrations des porteurs libres.

La charge électrique totale ρ est déterminée par l'équation suivante :

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \tag{67}$$

Où N_D^+ et N_A^- sont les densités des donneurs et accepteurs ionisés.

IV. 2. 2 Equation de continuité

Les équations de continuité permettent de déterminer, en tout point et à chaque instant, la concentration des porteurs dans un semi-conducteur, elle s'écrit [7-93] :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} div\overrightarrow{J_n} + G_n - R_n \tag{68}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} div\overrightarrow{J_p} + G_p - R_p \tag{69}$$

G_n et G_p sont les taux de génération optique des paires électrons trous, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons pour les électrons et les trous, $\overrightarrow{J_n}$ et $\overrightarrow{J_p}$ sont les densités des courants des électrons et des trous.

IV. 3 Homo-jonction

L'homo-jonction est la structure solaire la plus couramment utilisée. Elle est constituée principalement de la juxtaposition des deux régions, différemment dopées, d'un même semi-conducteur monocristal [7]. Sous l'effet de gradient abrupt de concentration en impuretés, les électrons (porteur majoritaires de la région N), vont diffuser de la région N vers la région P où ils sont minoritaires. Il en est de même pour les trous qui diffusent de la région P vers la région N. L'équilibre thermodynamique est atteint dans la zone de charge d'espace (ZCE) quand les composantes du courant de conductions liées au champ électrique compensent exactement les composantes du courant de diffusion. Hors de la zone de charge d'espace, le champ électrique est nul et le niveau de Fermi est aligné. Le diagramme des bandes d'énergie de la jonction N/P à l'équilibre thermodynamique est représenté par la figure 49. La variation de l'énergie électrostatique dans la jonction N/P crée une barrière de potentiel. La hauteur de cette barrière, encore appelée tension de diffusion V_d, est calculée par la formule suivante [7-18] :

$$V_d = \frac{KT}{q} ln(N_D N_A / n_i^2) \qquad (70)$$

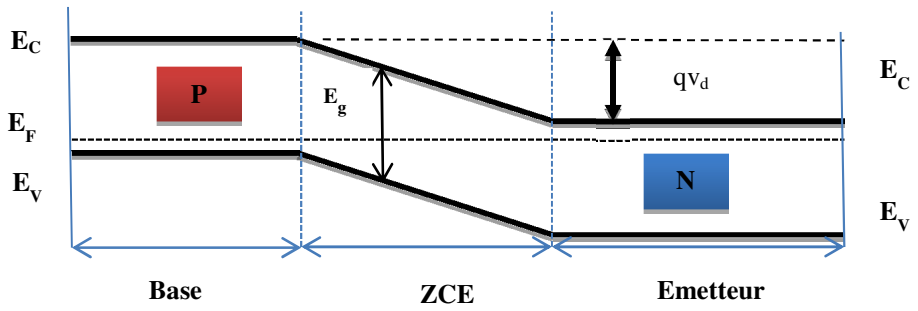


Figure 49 : Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule solaire N/P (à l'équilibre thermodynamique).

IV. 3. 1 Courant d'éclairement

Pour étudier la cellule solaire N/P sous éclairement, on suppose que les radiations solaires incidentes sont parallèles et tombent normalement à la surface de la cellule solaire les régions N et P sont quasi neutres et le rendement quantique est égal à 1.

Lorsqu'un photon d'énergie hv, supérieure à l'énergie de la bande interdite E_g et provenant d'une lumière monochromatique, est envoyé sur la face avant d'un matériau semi-conducteur, une

paire électron-trou est générée. Le taux de génération des paires électrons-trous G(x,λ), à une distance "*x*" de la surface, est proportionnel au nombre de photons absorbés. Il est exprimé par la relation suivante [1-7] :

$$G(x,\lambda)=\alpha(\lambda)F(\lambda)[1-R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (71)$$

Où α(λ) est le coefficient d'absorption du matériau, F(λ) le flux spectral de photons incidents et R(λ) le coefficient de réflexion à la surface du matériau.

Une polarisation directe est appliquée à la jonction N/P. Lors de l'éclairement de la cellule solaire, la hauteur de la barrière de potentiel interne est diminuée d'une valeur V_d-V (où V est la différence de potentiel aux bornes de la jonction à cause de l'éclairement). Le diagramme des bandes énergétiques de la jonction N/P sous éclairement est représenté par la figure 50.

Le photocourant circulant dans la cellule solaire peut être déterminé à partir des équations de continuité des porteurs minoritaires, qui sont les suivantes :

$$(1/q)(dJ_P/dx)-G_P+\Delta p_n/\tau_P=0 \quad (72)$$

Pour les trous dans le matériau de type N.

$$(1/q)(dJ_n/dx)+G_n-\Delta n_P/\tau_n=0 \quad (73)$$

Pour les électrons dans le matériau de type P.

Où τ_p et τ_n sont respectivement les durées de vie des trous et des électrons, ΔP_n et Δn_p les écarts par rapport à la densité d'équilibre des trous et des électrons, q la charge de l'électron et J_n et J_p sont respectivement la densité du courant des électrons et des trous.

Avec : $\Delta p_n = p_n - p_{n0}$ (74)

$$\Delta n_p = n_p - n_{p0} \quad (75)$$

Où p_{n0} et n_{p0} sont les concentrations en porteurs minoritaires à l'équilibre thermodynamique.

Les équations de transport nous permettent d'écrire les densités de courant des trous et des électrons :

$$J_p = q\mu_p p_n E - qD_P(dP_n/dx) \quad (76)$$

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n(dn_p/dx) \quad (77)$$

Où E est le champ électrique, μ_p et μ_n sont respectivement les mobilités des trous et des électrons et D_p et D_n leurs coefficients de diffusion respectifs.

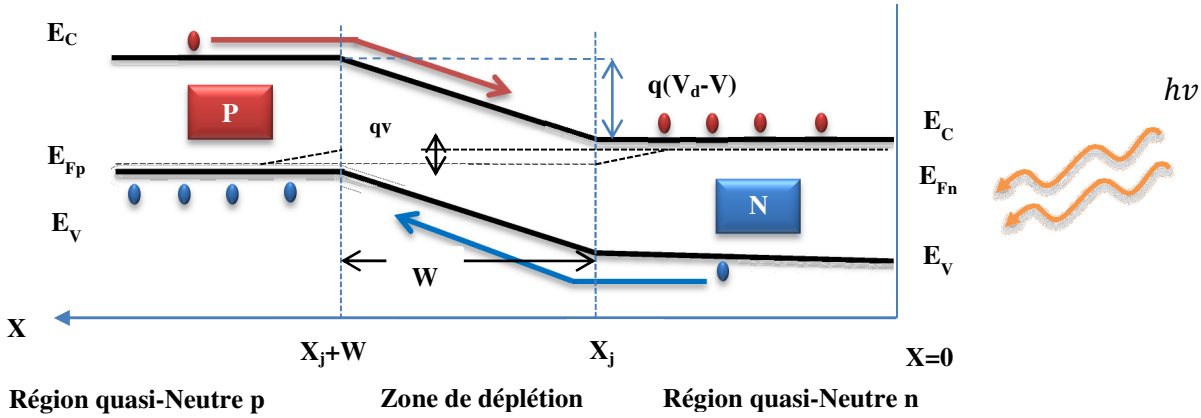


Figure 50 : Diagramme des bandes d'énergie d'une cellule solaire N/P sous éclairement (polarisation directe).

IV. 3. 2 Courant dans la région quasi-neutre N

La cellule solaire, à base de la jonction N/P, peut être représentée par l'un des différents modèles physiques. Le modèle considéré est le dopage uniforme des deux côtés de la jonction.

Lorsque les deux côtés de la jonction sont uniformes dans le dopage, la mobilité et la durée de vie, alors le champ électrique est nul hors de la zone de déplétion pour une cellule N/P, où l'émetteur est de type N et la base de type P. La combinaison des équations (72) et (74) permet d'obtenir l'expression qui traduit les phénomènes dans la région de l'émetteur [7] :

$$D_P \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} + \alpha F(1-R) \exp(-\alpha x) - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = 0 \quad (78)$$

La solution générale de cette équation est de la forme :

$$\Delta p_n = A\cosh(x/L_p) + B\sinh(x/L_p) - \frac{\alpha F(1-R)\tau_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \exp(-\alpha x) \quad (79)$$

Avec $L_P = \sqrt{D_P \tau_P}$ (80)

Lp est la longueur de diffusion des trous.

Pour un semi-conducteur monocristal, il y a deux conditions aux limites :

1. A la surface, une recombinaison se produit à une vitesse S_p :

$$D_p \frac{d\,\Delta p_n}{dx} = S_p \Delta p_n, \text{ pour [x = 0]} \tag{81}$$

2. A la limite de la jonction, la densité des porteurs en excès est annulée par le champ électrique dans la zone de déplétion :

$$p_n - p_{n0} = 0, \qquad \text{pour [x = } x_j\text{]}, \tag{82}$$

En appliquant ces conditions aux limites dans l'équation (79), la densité de trous devient :

$$\Delta p_n = \left[\alpha F(1-R)\,\tau_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)\right] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p\right)\sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + \exp(-\alpha x_j)\left(\frac{S_p L_p}{D_p}\sinh\frac{x}{L_p} + \cosh\frac{x}{L_p}\right)}{\frac{S_p L_p}{D_p}\sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p}} - \exp(-\alpha x) \right] \tag{83}$$

et la densité du photocourant des trous à la limite de la zone de déplétion devient :

$$J_p = -qD_p\left(\frac{dp_n}{dx_j}\right) = \left[qF(1-R)\,\alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)\right] \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p\right) - \exp(-\alpha x_j)\left(\frac{S_p L_p}{D_p}\cosh\frac{x_j}{L_p} + \sinh\frac{x_j}{L_p}\right)}{\frac{S_p L_p}{D_p}\sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p}} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \tag{84}$$

IV. 3. 3 Courant dans la région quasi-Neutre P

Pour calculer le photocourant des électrons générés dans la base, les équations (73) et (77) sont utilisées avec les conditions aux limites (en supposant comme précédemment, que cette région est uniforme dans la durée de vie, la mobilité et le niveau de dopage).

Les conditions aux limites sont :

- ✓ $(n_p - n_{p0} = 0)$, pour [x = x_j + w], (85)

(Au bord de la zone de déplétion, la densité des porteurs minoritaires en excès est nulle).

- ✓ A la surface arrière de la cellule, une recombinaison en surface S_n prend place.

$$S_n(n_p - n_{p0}) = -D_n(d\Delta n_P / dx), \qquad \text{pour [x=d]}, \tag{86}$$

Où d est l'épaisseur totale de la cellule.

L'épaisseur de la zone de déplétion *w*, qui se trouve dans la région la plus faiblement dopée, est donnée par [7] :

$$w = \sqrt{\frac{2(N_A + N_D)\varepsilon_0\varepsilon_r}{q N_A N_D} \mathrm{V_b}} \tag{87}$$

Pour une jonction dissymétrique N^+/P, la relation précédente devient :

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q N_A} \mathrm{V_b}} \tag{88}$$

La distribution des électrons dans une base uniformément dopée est donnée par [1]:

$$\Delta n_p = \left[\alpha F(1-R)\tau_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1)\right] \exp\left[-\alpha(x_j + w)\right] \times \left[\cosh\left(\frac{x_j + w}{L_n}\right) - \exp\left[-\alpha(x_j + w)\right] - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right)\left[\cosh\left(\frac{d'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha d')\right] + \sinh\left(\frac{d'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha d')}{\frac{S_n L_n}{D_n}\sinh\left(\frac{d'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{d'}{L_n}\right)} \times \sinh\left(\frac{x_j + w}{L_n}\right) \right] \tag{89}$$

La densité du photocourant est :

$$J_n = \frac{qF(1-R)\alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \exp\left[-\alpha(x_j + w)\right] \times \left[\alpha L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right)\left(\cosh\left(\frac{d'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha d')\right) + \sinh\left(\frac{d'}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha d')}{\frac{S_n L_n}{D_n}\sinh\left(\frac{d'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{d'}{L_n}\right)} \right] \tag{90}$$

Où : $d' = d - (x_j + w)$ est l'épaisseur de la région neutre côté P (la base).

IV. 3. 4 Courant dans la zone de charge d'espace

Cette zone est le siège d'un courant de génération. Le champ électrique étant assez élevé, nous admettons que les porteurs générés dans cette région se trouvent entraînés hors de cette zone, avant qu'ils ne puissent se recombiner.

En admettant que chaque photon absorbé crée une paire électron-trou, la densité du courant produite dans cette zone est égale au nombre de photons absorbés :

$$J_{dr} = qF(1-R)\exp(-\alpha x_j)\left[1-\exp(-\alpha w)\right] \tag{91}$$

IV. 3. 5 Photocourant total

La densité totale du courant d'éclairement en court-circuit, par longueur d'onde de rayonnement incident, est la somme des contributions des trois régions [1] :

$$J_E(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \tag{92}$$

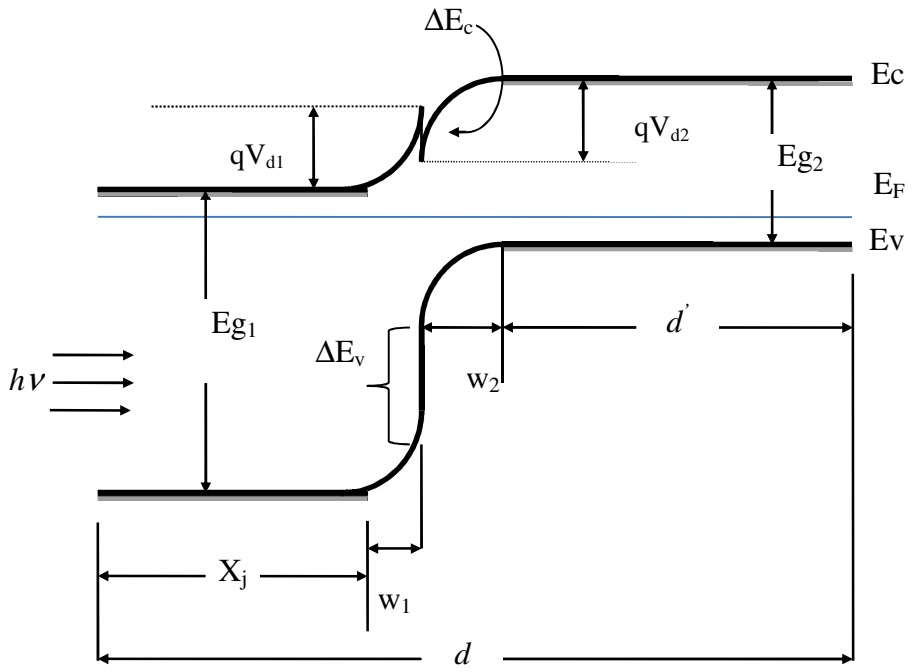
IV. 4 Hétérojonction

Une hétérojonction est une jonction entre deux matériaux différents. Si les deux matériaux sont des semi-conducteurs, il s'agit d'une hétérojonction à semi-conducteurs. Dans ce cas, la différence réside généralement dans la structure des bandes [7]. La figure 51 donne le diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction N/P à l'équilibre thermodynamique [8].

Lors de la mise en contact des deux semi-conducteurs, les porteurs sont diffusés d'une région à l'autre de la jonction, de la même façon qu'une homo-jonction. A l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi est unique le long de toute la cellule. Les photons ayant une énergie inférieure à E_{g1} et supérieure à E_{g2} traversent le premier semi-conducteur et sont absorbés par le second.

Les hétérojonctions ont des performances meilleures que les homo-jonctions [18] :

- Meilleure réponse spectrale et exploitation du maximum du spectre solaire.
- Faible résistance série, si le premier semi-conducteur est très dopé (sans affecter les caractéristiques de transmission de la lumière).
- Amélioration de l'absorption des photons si le premier semi-conducteur est épais (absorption dans les deux semi-conducteur).
- Tension en circuit-ouvert assez importante.



d' : largeur de la région neutre de la base.

$d'=d-(X_J+W_1+W_2)$

Figure 51 : Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction N/P (à l'équilibre thermodynamique) [1].

Le problème essentiel dans l'étude des hétérojonctions est la détermination de la barrière de potentiel existant aux différentes interfaces. Cette barrière conditionne le passage d'un électron ou d'un trou d'un matériau à l'autre. En général, les discontinuités des bandes peuvent être spécifiées dans l'une des expressions de discontinuité pour la bande de conduction ou la bande de valence. La discontinuité de la bande de conduction est généralement la plus intéressante.

La règle la plus adoptée par la plupart des chercheurs et scientifiques, pour le calcul de cette discontinuité, est la règle de l'affinité électronique ou modèle de Anderson [1-7]. Elle impose que la discontinuité des bandes de conduction, à une hétérojonction abrupte, est simplement égale à la différence des affinités électroniques des deux semi-conducteurs :

$$\Delta E_c = E_{c2} - E_{c1} = \chi_1 - \chi_2 \tag{93}$$

$$\Delta E_v = \Delta\chi + \Delta E_g \tag{94}$$

Ou χ_1 et χ_2 sont les affinités électroniques des deux matériaux.

IV. 4. 1 Photocourant

Les expressions des photocourants dans les hétérojonctions sont essentiellement les mêmes que celles des homo-jonctions. Pour une hétérojonction N/P, l'expression du photocourant est déduite des formules (73), (77), (85) et (86). Elle est donnée par la formule suivante [1-93] :

$$J_n = \frac{qF(\lambda)\exp\left[-\alpha_1(x_j + w_1)\right]\exp(-\alpha_2 w_2)\alpha_2 L_{n2}(1-R)}{\left(\alpha_2^2 L_{n2}^2 - 1\right)} \times \left[\alpha_2 L_{n2} - \frac{\left(\frac{S_n L_{n2}}{D_{n2}}\right)\left(\cosh\left(\frac{d'}{L_{n2}}\right) - \exp(-\alpha d')\right) + \sinh\left(\frac{d'}{L_{n2}}\right) + \alpha_2 L_{n2}\exp(-\alpha d')}{\frac{S_n L_{n2}}{D_{n2}}\sinh\left(\frac{d'}{L_{n2}}\right) + \cosh\left(\frac{d'}{L_{n2}}\right)}\right] \quad (95)$$

Pour la région de l'émetteur et :

$$J_p = \frac{q\,F(\lambda)\,\alpha_1 L_{p1}}{(\alpha_1^2 L_{p1}^2 - 1)}(1-R) \times \left[\frac{\left(\frac{S_p L_{p1}}{D_{p1}} + \alpha_1 L_{p1}\right) - \exp(-\alpha_1 x_j)\left(\frac{S_p L_{p1}}{D_{p1}}\cosh\frac{x_j}{L_{p1}} + \sinh\frac{x_j}{L_{p1}}\right)}{\frac{S_p L_{p1}}{D_{p1}}\sinh\frac{x_j}{L_{p1}} + \cosh\frac{x_j}{L_{p1}}} - \alpha_1 L_{p1}\exp(-\alpha_1 x_j)\right] \quad (96)$$

Pour la base. Avec :

α_1 et α_2 : coefficients d'absorption des deux matériaux.

w_1 et w_2 : largeurs des zones de déplétion dans les deux régions N et P.

d' : largeur de la région de base neutre.

S_n : vitesse de recombinaison de la surface arrière.

S_p : vitesse de recombinaison à la surface du semi-conducteur 1.

$F(\lambda)$: intensité de la lumière monochromatique incidente.

La largeur de la zone déplétion est donnée par :

$$w_1 = \left[\left(\frac{2\varepsilon_1}{qN_1}\right)\left[\frac{\varepsilon_2 N_2}{(\varepsilon_1 N_1+\varepsilon_2 N_2)}V_d\right]\right]^{1/2} \quad (97)$$

$$w_2 = \left[\left(\frac{2\varepsilon_2}{qN_2}\right)\left[\frac{\varepsilon_1 N_1}{(\varepsilon_1 N_1+\varepsilon_2 N_2)}V_d\right]\right]^{1/2} \quad (98)$$

Pour une hétérojonction N/P :

$$V_d = E_{g2} + \Delta E_c - (E_c - E_F) - (E_F - E_V) \quad (99)$$

Où : $(E_c - E_F)$ et $(E_F - E_V)$ représente la différence d'énergie, entre le niveau de fermi et la bande de conduction ainsi qu'entre le niveau de fermi et la bande valence.

Dans le cas d'une hétérojonction P/N :

$$V_d = E_{g2} + \Delta E_V - (E_c - E_F) - (E_F - E_V) \quad (100)$$

ΔE_c et ΔE_V sont donnés par les équations 93 et 94.

Les photocourant des régions de déplétion sont donnés par :

$$J_{w1}(\lambda)=qF(1-R)\exp(-\alpha_1 x_j)[1-\exp(-\alpha_1 w_1)] \quad (101)$$

$$J_{w2}(\lambda)=qF(1-R)\exp[-\alpha_1(x_j+w_1)][1-\exp(-\alpha_2 w_2)] \quad (102)$$

Où la réflexion est négligée aux interfaces dans l'équation (102).

$$J_w(\lambda)=J_{w1}(\lambda)+J_{w2}(\lambda)=qF(1-R)[\exp(-\alpha_1 x_j)[1-\exp(-\alpha_1 w_1)]+\exp[-\alpha_1(x_j+w_1)][1-\exp(-\alpha_2 w_2)]] \quad (103)$$

Les expressions ci-dessus ont été obtenues avec les hypothèses suivantes :

- L'excès des densités des porteurs minoritaires aux bords de la ZCE sont réduites à zéro par le champ électrique dans la zone de déplétion (condition aux limites).
- Les discontinuités ΔE_C et ΔE_V sont faibles (< KT/q).
- L'écart entre les paramètres de mailles des deux semi-conducteurs est très faible, pour que la recombinaison à l'interface devienne négligeable.

IV. 5 Hétérojonction à effet fenêtre

La recombinaison superficielle est un des mécanismes des pertes qui diminuent le rendement dans la cellule solaire mono-jonction. Une manière efficace d'éliminer ce type de recombinaison tout en assurant une amélioration des caractéristiques électriques de la cellule solaire, consiste à éloigner

la jonction de la surface de la cellule. Il suffit de la situer assez loin de la zone active de génération, pour que son influence s'annule [7].

En général, on forme une hétérostructure dans laquelle la partie frontale possède une bande interdite élevée de sorte qu'elle soit transparente au rayonnement solaire [1].

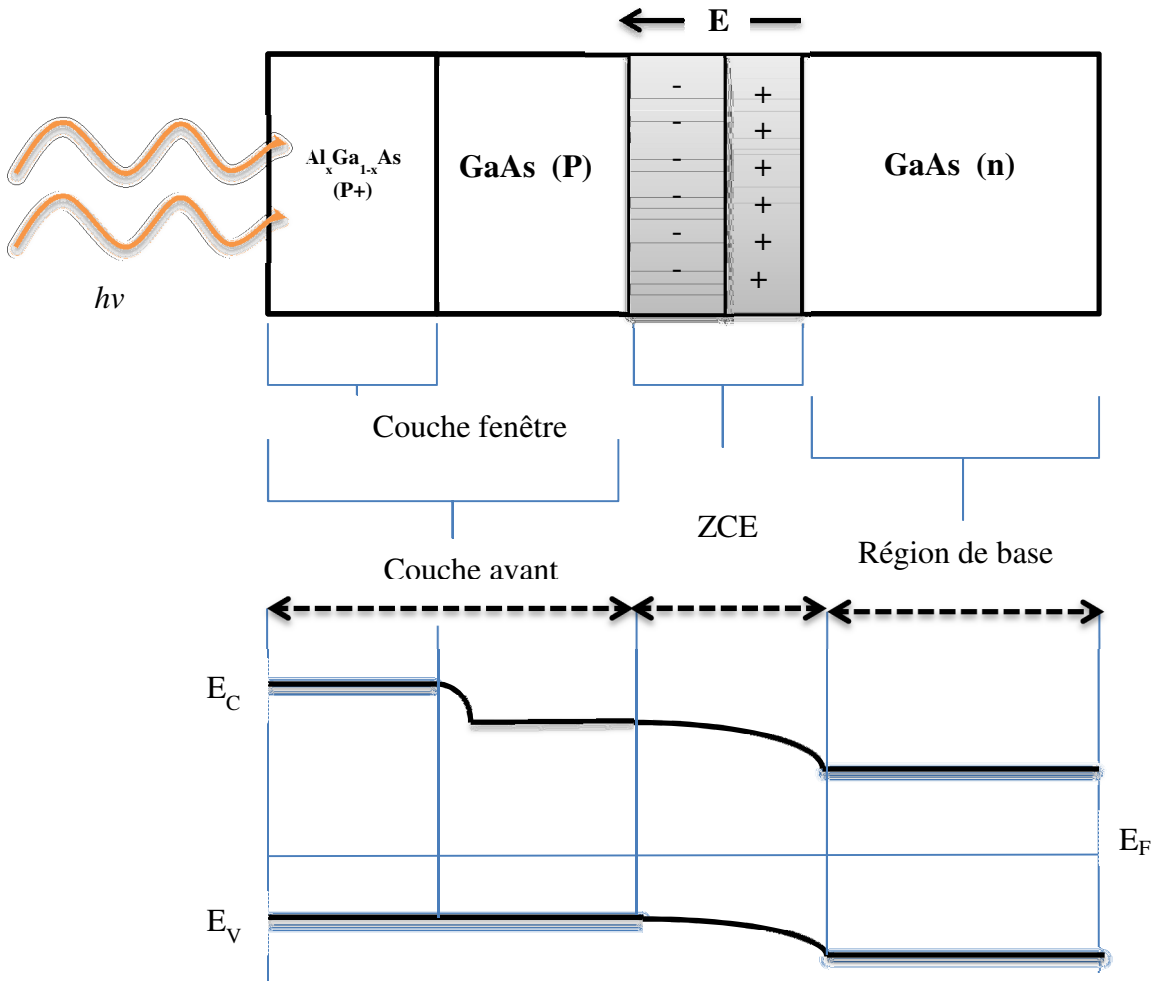


Figure 52: Cellule solaire à couche fenêtre AlGaAs / GaAs : a) hétérostructure, b) diagramme des bandes d'énergies de l'hétérostructure [1].

Dans le cas d'une cellule solaire GaAs, une couche $Al_xGa_{1-x}As$ à énergie de gap E_{g1} sert de fenêtre. Cette cellule est dite à effet fenêtre, car la couche avant demeure transparente aux radiations d'énergie inférieure à E_{g1}, tandis que les radiations supérieures à E_{g1} sont absorbées dans cette couche. Le meilleur compromis, entre les deux matériaux GaAs et $Al_xGa_{1-x}As$, est obtenu pour une

fraction molaire d'aluminium x=0.9, ceci est possible grâce aux paramètres cristallins de AlAs et de GaAs qui sont très voisins [22]. La figure 52 présente la cellule solaire à couche fenêtre GaAs avec le diagramme des bandes d'énergies de l'heterostructure.

IV. 5. 1 Contribution de la couche fenêtre ($Al_xGa_{1-x}As$) au photocourant

La densité du courant de court-circuit, provenant de cette couche, est donnée par [93- 94] :

$$Ic_1(\lambda) = \frac{q\ (\alpha_1 L_{n1})^2 F(\lambda)\,(1-R(\lambda))}{(\alpha_1^2 L_{n1}^2 - 1)} \times \left[\frac{1+\frac{Sn_1}{D_{n1}\alpha_1}\,(1-\cosh(d_1/Ln_1)\exp(-\alpha_1 d_1)) - \sinh(d_1/Ln_1)/\alpha_1 d_1 \exp(-\alpha_1 d_1)}{\frac{S n_1 Ln_1}{D_{n1}}\sinh\frac{d_1}{L_{n1}} + \cosh\frac{d_1}{L_{n1}}} - \exp(-\alpha_1 d_1) \right] \quad (104)$$

Où F est le flux de la photo incidence, R le coefficient de réflexion, α_1 le coefficient d'absorption du matériau de la couche fenêtre, Ln_1 la longueur de diffusion du matériau de la couche fenêtre, D_{n1} la diffusivité des électrons du matériau de la couche fenêtre, d_1 l'épaisseur de la couche fenêtre et S_{n1} la vitesse de recombinaison superficielle.

IV. 5. 2 Contribution de la totalité de la couche avant (fenêtre-émetteur)

Cette contribution est donnée par :

$$Jn_1(\lambda) = \left[\frac{q(\alpha_2 L_{n2})^2 F(\lambda)(1-R(\lambda))\exp(-\alpha_1 d_1)}{(\alpha_2^2 L_{n2}^2 - 1)} \right] \times \left[\frac{1+\frac{Sn_2}{D_{n2}\alpha_2}(1-\cosh(d_2-d_1)/Ln_2)\exp(-\alpha_2(d_2-d_1))) - (\sinh((d_2-d_1)/Ln_2)/\alpha_2 Ln_2)\exp(-\alpha_2(d_2-d_1))}{\frac{S n_2 Ln_2}{D_{n2}}\sinh\frac{d_2-d_1}{L_{n2}} + \cosh\frac{d_2-d_1}{L_{n2}}} - \exp(\alpha_2(d_2-d_1)) \right] + \left[\frac{Ic_1((\lambda)}{\frac{S n_2 Ln_2}{D_{n2}}\sinh\frac{d_2-d_1}{L_{n2}} + \cosh\frac{d_2-d_1}{L_{n2}}} \right] \quad (105)$$

Où α_2 , Ln_2 et D_{n2} sont respectivement : le coefficient d'absorption, la longueur de diffusion et la diffusivité des électrons du matériau de la couche émetteur. S_{n1} est la vitesse de recombinaison à l'interface fenêtre-émetteur et d_2 l'épaisseur de la couche avant (fenêtre et émetteur).

IV. 5. 3 Contribution de la région de charge d'espace

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$J_d(\lambda) = q\,F(\lambda)(1-R(\lambda))\exp(-\alpha_1 d_1)\left[1-\exp(-\alpha_2 w)\right]\exp(-\alpha_2 (d_2 - d_1)) \quad (106)$$

Où w est l'épaisseur de la zone de charge d'espace.

IV. 5. 4 Contribution de la région de base

Le courant dans cette région est donné par :

$$J_p(\lambda) = \frac{q\,F(\lambda)(1-R(\lambda))\,\alpha_2 L_p \exp(-\alpha_1 d_1)\exp(-\alpha_2\left[(d_2 - d_1 + w)\right]}{\alpha_2 L_p + 1} \quad (107)$$

L_p étant la longueur de diffusion des trous de la base.

IV. 5. 5 Courant d'éclairement total

La densité totale du courant d'éclairement en court-circuit, par longueur d'onde du rayonnement incident, est égale à :

$$J_{ET}(\lambda) = J_{n1}(\lambda) + J_p(\lambda) + J_d(\lambda) \quad (108)$$

IV. 6 Courant d'obscurité

Lorsque la cellule solaire est branchée sur une charge externe, seule une partie du photocourant est utilisable, car le courant circulant dans cette charge provoque la polarisation (en direct) de la jonction. Le courant électrique fourni à la charge externe sera donc la différence entre le photocourant d'éclairement et le courant d'obscurité (courant de diode). Il faut alors minimiser ce dernier pour avoir un rendement de conversion maximal.

Les trois zones de la cellule solaire participent à la génération du courant d'obscurité. Du fait de la polarisation en direct de la jonction, les porteurs majoritaires franchissent la barrière de potentiel, diffusent et se recombinent dans les zones quasi neutres de type opposé, où ils deviennent porteurs minoritaires. Un courant de diffusion prend naissance dans ces deux régions et certains de ces porteurs se recombinent en traversant la Z.C.E [93].

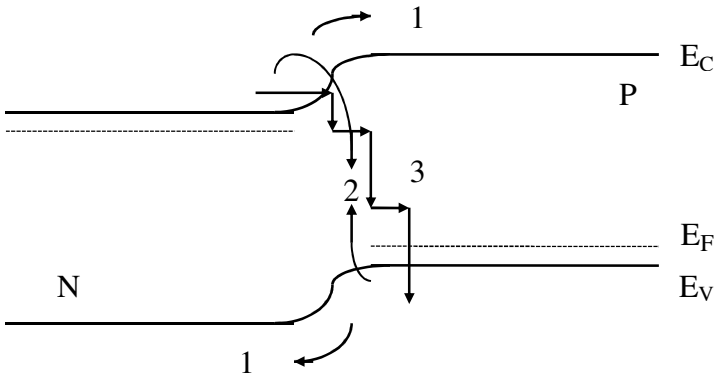


Figure 53 : Mécanismes de transport des trois courants dans une cellule solaire en polarisation directe : 1) courant d'injection, 2) courant de recombinaison dans la Z.C.E, 3) Effet tunnel à travers les états d'énergie créés par les défauts [1].

IV. 6. 1 Courant d'injection

Le transfert des charges à travers la jonction détermine le courant d'injection qui est dû au gradient de concentration. Après la diffusion, ces porteurs deviennent minoritaires et leur comportement est gouverné par les équations de continuité :

$$(1/q)(dJ_n/dx) - \lfloor \Delta n_p/\tau_n \rfloor = 0 \quad \text{(Électrons sur la région P)}, \tag{109}$$

$$(1/q)(dJ_p/dx) + \lfloor \Delta p_n/\tau_p \rfloor = 0 \quad \text{(Trous sur la région N)}. \tag{110}$$

Où les expressions des densités de courant sont données par :

$$J_n = q\mu n_p E + qD_n(dn_p/dx) \quad \text{(Région P)}, \tag{111}$$

$$J_p = q\mu p_n E - qD_p(dp_n/dx) \quad \text{(Région N)}. \tag{112}$$

Pour avoir des solutions analytiques à ces équations, il est nécessaire de considérer la mobilité μ, la durée de vie τ, le champ électrique E et le coefficient de diffusion D comme constantes, sinon la résolution doit se faire numériquement [95]. Les conditions aux limites nécessaires pour résoudre les équations (111) et (112), pour une cellule N/P, sont :

$$p_n = p_{n0}\exp(qV_j/kT) \qquad (x = x_j), \tag{113}$$

$$n_p = n_{p0}\exp(qV_j/kT) \qquad (x = x_j + w), \tag{114}$$

$$S_p \Delta p_n = D_p (d\Delta p_n / dx) - \mu_p p_n E_p \qquad (x = 0), \tag{115}$$

$$S_n \Delta n_p = -D_n (d\Delta n_p / dx) - \mu_n n_p E_n \qquad (x = d). \tag{116}$$

Où x=0 et x= d sont les surfaces avant et arrière de la cellule.

Les équations (113) et (114) sont les relations de Boltzmann, pour les porteurs de charge dans les deux régions N et P, quand la tension V_j est appliquée à la jonction.

Si les niveaux de dopage dans les deux régions de la jonction sont constants, le champ électrique en dehors de la zone de déplétion est négligeable. La solution de (112) et (109) peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta p_n = A_1 \cosh(x / L_p) + B_1 \sinh(x / L_p) \qquad (x \le x_j), \tag{117}$$

$$\Delta n_p = A_2 \cosh\left[(x - (x_j + w)) / L_n\right] + A_2 \sinh\left[(x - (x_j + w)) / L_n\right] \quad (x_j + w \le x \le d) \tag{118}$$

En utilisant les conditions aux limites des équations (113) et (116), le courant injecté J_{in} sera [1] :

$$J_{Inj} = J_0 \left[\exp(qV_j / kT) - 1\right] \tag{119}$$

Avec

$$\begin{aligned} J_0 = {} & q \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_d} \left[\frac{(S_p L_p / D_p)\cosh(x_j / L_p) + \sinh(x_j / L_p)}{(S_p L_p / D_p)\sinh(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} \right] \\ & + q \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_a} \left[\frac{(S_n L_n / D_n)\cosh(d' / L_n) + \sinh(d' / L_n)}{(S_n L_n / D_n)\sinh(d' / L_n) + \cosh(d' / L_n)} \right] \end{aligned} \tag{120}$$

$d' = d - (x_j + x)$ et S_p et S_n sont respectivement les vitesses de recombinaison en surface avant et arrière.

IV. 6. 2 Courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace

La recombinaison dans la ZCE est très faible à cause du champ électrique intense qui y règne. Cependant, la densité du courant de recombinaison dans cette zone provient des électrons de la région N et des trous de la région P qui se recombinent dans la Z.C.E en produisant une augmentation du courant d'obscurité. Quand la jonction est polarisée en direct, cette densité de courant est donnée par l'expression de Sah-Noyce-Shockley [1] :

$$J_{Z.C.E} = \frac{q\, n_i\, w 2\sinh(qV_j / 2kT)}{\sqrt{\tau_{p0}.\tau_{n0}}\, q(V_b - V_j)/kT}\, f(b) \tag{121}$$

$$f(b) = \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^2 + 2bx + 1} \tag{122}$$

$$b = \left[\exp(-qV_j/2kT)\right] \cosh\left[(E_t - E_i)/kT + (1/2)\ln(\tau_{p0}/\tau_{n0})\right] \tag{123}$$

Le facteur *f*(b) est une expression complexe, l'équation (121) atteint son maximum pour f(b)=π/2. La densité de courant dans la zone de charge d'espace sera alors :

$$J_{rg} = \frac{\pi q\, n_i\, w}{\sqrt{\tau_{p0}.\tau_{n0}}} \frac{\sinh(qV_j / 2kT)}{q(V_b - V_j)/kT} \tag{124}$$

Où V_b est la tension de diffusion, V_j la tension aux bornes de la jonction, E_t et E_i sont respectivement le niveau de piège et le niveau de Fermi intrinsèque et τ_{p0}, τ_{n0} sont les durées de vie des porteurs minoritaires dans les deux côtés de la jonction.

IV. 6. 3 Courant tunnel

La troisième composante du courant d'obscurité est le courant tunnel. C'est un courant qui apparaît dans les jonctions très fortement dopées et de mauvaise qualité, notamment dans les jonctions métal-semi-conducteur ou dans certaines hétérojonctions ayant une épaisseur de barrière très faible. Il s'agit du passage, par effet tunnel, des électrons et des trous d'une bande à l'autre sans apport d'énergie. Ces transitions sont, en général, assistées par des pièges de la bande interdite. La densité du courant tunnel est donnée par [1, 7, 93] :

$$J_{Tun} = K_l\, N_t \exp(BV_j) \tag{125}$$

Où K_l et B sont des constantes dépendant du dopage, de la masse effective, de la constante de Planck et de la constante électrique et N_t est la densité d'état (d'énergie E_t dans la bande interdite).

La constante B est donnée par :

$$B = (4/3\hbar)\left(m^* \varepsilon / N_{d,a}\right)^{1/2} \tag{126}$$

IV. 6. 4 Courant total d'obscurité

Le courant d'obscurité total J_{Obs} est donné par la somme des trois composantes d'injection, de déplétion et tunnel.

$$J_{Obs} = J_{Inj} + J_{rg} + J_{Tun} \tag{127}$$

Notons que le courant d'obscurité varie inversement avec la largeur de bande interdite et dépend de la température par l'intermédiaire du potentiel thermodynamique *KT* et de la densité intrinsèque, comme le montrent les équations (124), (125).

IV. 7 Simulateur numérique solaire

La modélisation numérique est un outil indispensable dans l'analyse et la conception des composants à semi-conducteurs. Elle joue un rôle très important dans le développement moderne de la cellule solaire. Les performances de cette dernière sont analysées rapidement par l'utilisation de simulateurs solaires puissants et performants, qui donnent des résultats proches des résultats expérimentaux. Ceci rend le coût d'investissement moins cher et le temps de développement très court pour le processus de fabrication de la cellule solaire [96].

Un simulateur solaire est un ensemble de programmes basés sur des méthodes de discrétisation numérique, permettant de faire une modélisation rapide des composants semi-conducteurs. Il est capable de résoudre les équations de base du semi-conducteur telles que l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous [97]. La présence du terme de recombinaison dans l'équation de continuité rend le problème non-linéaire, ce qui exige l'utilisation de méthodes numériques pour résoudre ces équations.

Au cours de ces dernières années, plusieurs outils de modélisation spécifiques aux dispositifs photovoltaïques à couches minces ont été élaborés dont plusieurs ont atteint un degré de maturité et sont maintenant disponibles et largement utilisés dans le secteur du photovoltaïque.

Un simulateur solaire idéal doit satisfaire les exigences figurant dans le tableau 16 [98]. Il doit être capable de modéliser les cellules solaires en multicouches (six couches, au moins doivent être considérées) et manipuler correctement les matériaux gradués. En effet, dans ce type de dispositifs, il n'y a pas que la largeur de la bande interdite E_g qui varie avec la position x (le long de

l'axe de profondeur du composant), mais aussi l'affinité électronique e χ , la densité effective d'états N_C et N_V et l'absorption optique α.

Il doit aussi être capable de décrire correctement les éventuelles discontinuités dans les bandes d'énergie E_V et E_C et à l'interface entre les couches et l'effet des états énergétiques profonds. Comme il doit permettre la simulation de l'effet de la recombinaison en surface et en volume, la simulation des mesures électro-optiques telles que : la caractéristique J-V, la réponse spectrale Q(λ), la caractéristique C-V (en fonction de la température ambiante et à température variable). En plus, il doit être capable de traiter l'effet tunnel et enfin, le simulateur doit être rapide et facile à utiliser.

Tableau 16 : Paramètres critiques devant exister dans un simulateur solaire idéal de couches minces.

▪ Multicouches
▪ Discontinuités de bande dans E_C et E_V : ΔE_C et ΔE_V
▪ Largeur de gap : E_g>2–3.7 eV
▪ Gap Gradué : E_g (x) et aussi χ(x), N_C(x), N_V(x), α(x) . . .
▪ Recombinaison et charge dans les états profonds
▪ Recombinaison et charge dans les états d'interface
▪ Simulation de mesures : J–V, C–V, C–f, QE(λ), . . . toutes en fonction de T
▪ Rapide et facile à utililiser

IV. 7 .1 Discrétisation

La première étape pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles non linaires couplées exige leurs discrétisation sur le domaine de simulation. Elle consiste à remplacer le problème physique continu, par un problème numérique discret adapté au traitement.

La méthode choisie pour la discrétisation du dispositif étudié dépend de divers facteurs tels que : la géométrie de la structure à étudier, les coordonnées du système utilisé pour décrire le problème continu, les équations différentielles partielles ainsi que les conditions aux limites. Parmi les différentes méthodes utilisées pour la discrétisation des structures à semi-conducteurs on peut citer les suivantes [96] :

IV. 7. 1. 1 La méthode des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis est une méthode de modélisation numérique appliquée dans la simulation des cellules solaires. Cette méthode offre la flexibilité de faire varier plusieurs paramètres simultanément, à savoir la durée de vie, la vitesse de recombinaison en surface, la concentration et le type de dopage, l'épaisseur des couches etc.

Le PC1D est un exemple de simulateur solaire qui se base sur cette méthode dans la discrétisation de la structure solaire à étudier [96-99]. La structure unidimensionnelle du semi-conducteur est divisée spatialement en un nombre fini de M éléments. Le point de division entre deux éléments est appelé « nœud ». Ces nœuds sont numérotés de zéro (limite gauche) à M (limite droite). A chaque nœud interne, les trois équations non linaire (l'équation de Poisson et les deux équations de continuité pour les électrons et les trous) sont résolues pour les trois variables : le potentiel électrostatique Ψ, le potentiel quasi-Fermi des électrons et des trous φ_n et φ_p. A ces équations sont ajoutées trois autres équations pour chaque limite qui sont basées sur : 1) la densité du courant d'injection, 2) la recombinaison en surface, 3) le potentiel électrostatique en surface. Pour (M) éléments, il y a un total de 3 (M +1) équations pour 3 (M +1) inconnues. Après la discrétisation de la structure, la méthode de Newton est utilisée pour la résolution de l'ensemble des équations [100]. La Réf [100] apporte plus de détails sur la méthode de discrétisation par la méthode FEM dans le PC1D.

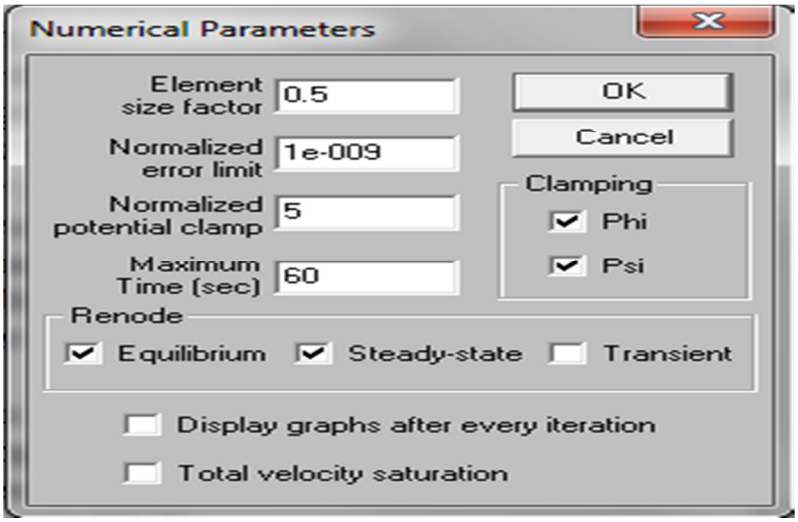
IV. 7 .1. 2 La méthode des différences finies

Dans cette méthode, le domaine est partagé en plusieurs sous-domaines en définissant un maillage structuré de points où la grille est un ensemble de lignes de maillage parallèles aux axes de coordonnées. Une quantité de champ local est attachée à chaque point. La discrétisation du problème est basée sur l'utilisation des formules de différences finies pour rapprocher localement les équations aux dérivées partielles. Cette méthode s'avère particulièrement efficace lorsque le système étudié est homogène, isotrope, unidimensionnel et de frontières régulières. L'inconvénient majeur de cette méthode est le fait qu'elle repose sur une grille cartésienne, ce qui rend difficile leur application aux domaines non rectangulaires. Aussi, cette méthode ne fournit de solution que pour quelques points discrets du domaine étudié. Au contraire, la méthode des éléments finis permet d'obtenir une solution pour tous les points du domaine d'écoulement, mais sous forme d'une fonction approchée [100]. Parmi les simulateurs solaires qui utilisent cette méthode on cite SCAPS-1D.

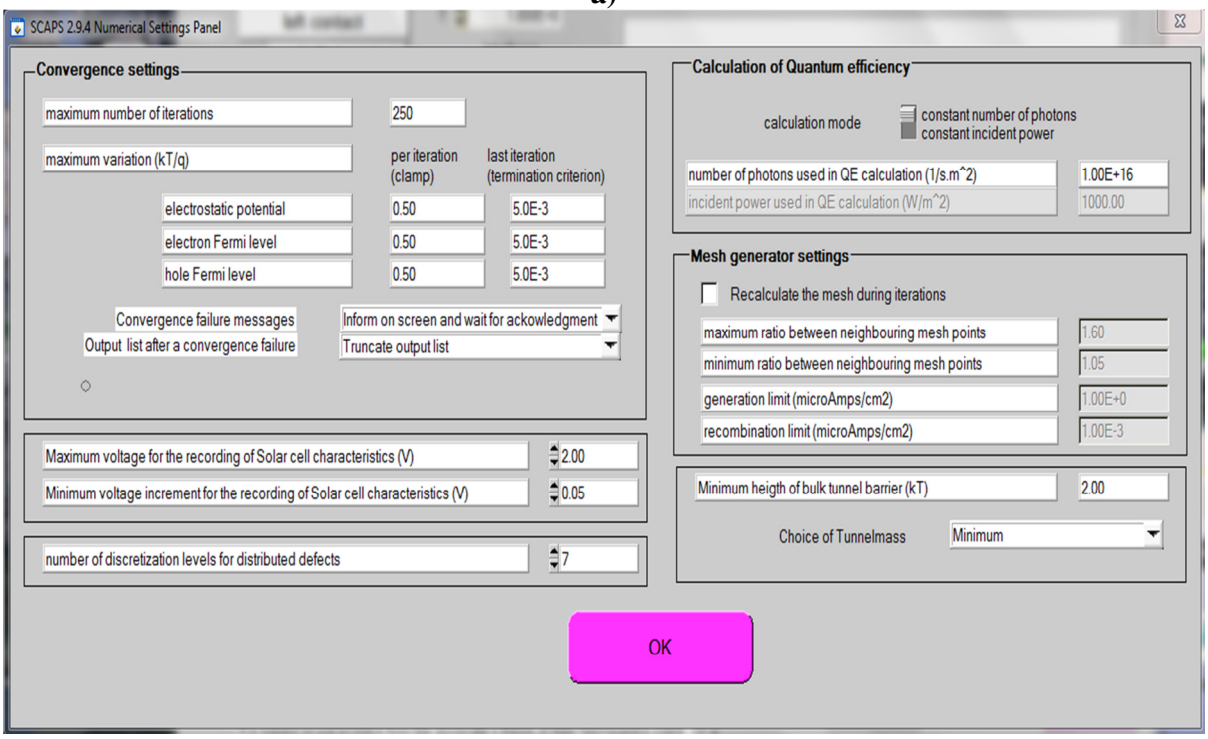
IV. 7. 2 Amélioration de la convergence du simulateur solaire en contrôlant la méthode numérique

Durant la simulation, l'utilisateur a la possibilité d'affecter l'algorithme numérique de calcul utilisé par les deux simulateurs solaire PC1D et SCAPS-1D, à travers les deux panneaux apparaissant

dans la figure 54. La modification de ces paramètres ne modifie pas la définition de la structure mais elle influence la précision de la solution et la vitesse de calcul. Aussi, elle permet d'améliorer la convergence [101, 102].



a)



b)

Figure 54 : Panneau de contrôle de la méthode numérique des deux simulateurs solaires, a) PC1D, b) SCAPS-1D.

IV. 7. 3 PC1D (**P**ersonal**C**omputer **O**ne **D**imension)

Le PC1D est un simulateur solaire unidimensionnel pour Windows, créé initialement au laboratoire de Sandia National par Dr. Paul Basore et son équipe en 1984 [103], puis développé par Dr. Don Clugston à l'Université de New South Wales (UNSW) en Australie. La première version a été publiée en décembre 1985. Le programme est devenu populaire grâce à son interface simple et souple, ce qui le rend facile à utiliser. Durant son exécution, seul le fichier PC1D.EXE est nécessaire pour les calculs. La base de données du PC1D contient un fichier help PC1D.HLP et quelques fichiers additionnels des paramètres physiques de quelques matériaux tels que le Silicium (Si), le Germanium (Ge), l'InP et le GaAs. Il contient aussi les spectres solaires standards terrestres, spatiaux et diffus (AM0, AM1.5G et AM1.5D). Typiquement, le PC1D est utilisé pour modéliser les cellules solaires à base de Si, Ge et les cellules solaires à base de semi-conducteurs III-V [104, 101].

IV. 7. 3. 1 Fichier utilisé durant l'exécution du PC1D

Pour présenter une structure solaire sur PC1D, le simulateur utilise un ensemble de fichiers constitué de [101-103] :

IV. 7. 3. 2 Fichier *.prm

Ce fichier contient les informations concernant le design du matériau comme l'épaisseur des couches, les profils de dopage, la durée de vie du porteur et la vitesse de recombinaison.

IV. 7. 3. 3 Fichier *.mat

Ce fichier contient les informations correspondant à la propriété électronique du matériau comme la bande interdite, l'affinité électronique, la constante diélectrique et la mobilité.

IV. 7. 3. 4 Fichier paramètres optiques

Durant la simulation d'une structure solaire, deux types de fichiers sont nécessaires ; le fichier du coefficient d'absorption **(*.abs)** et le fichier de l'indice de réfraction **(*.inr).** Ces deux fichiers sont liés au fichier (*.mat), ils contiennent les valeurs du coefficient d'absorption et l'indice de réflexion en fonction de la longueur d'onde incidente.

IV. 7. 3. 5 Le fonctionnement du PC1D

L'interface proposée par le simulateur PC1D permet de bien présenter la structure solaire à étudier, qui peut être représentée au maximum par cinq couches. Chaque couche est prise en charge par le simulateur à travers les paramètres de la figure 55.

Pour chaque couche, une liste de paramètres s'affiche sur la fenêtre principale. En cliquant sur le paramètre, on introduit la nouvelle valeur.

Après l'introduction de toutes les données nécessaires du matériau, le PC1D peut fonctionner. Un schéma descriptif de la structure étudiée est généré systématiquement du côté droit du panneau principal du simulateur. Pour spécifier l'étude à faire sous PC1D, deux fichiers externes sont nécessaires pour son exécution. Ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (**Dark-IV.EXC**) soit sous éclairement (**Ine-Sun.EXC**, **Scan-Qe.EXC**). Le fichier (**Ine-Sun.EXC**) permet le calcul des caractéristiques (I-V, P-V), ainsi que le rendement η et le facteur de forme FF, alors que le fichier (**Scan-Qe.EXC**) permet le calcul de la réponse spectrale.

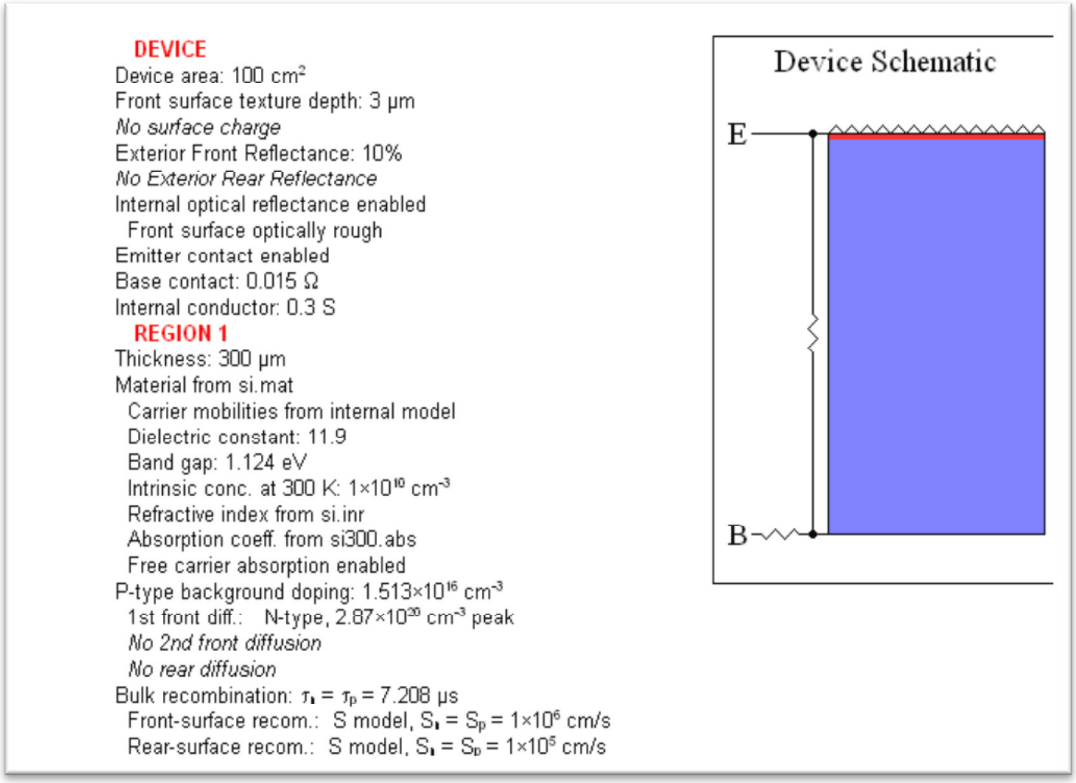


Figure 55 : Panneau principal du simulateur solaire PC1D (version 5.9).

IV. 7. 4 SCPAS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator One Dimension)

SCPAS-1D est un simulateur solaire orienté Windows, écrit et maintenu par Marc Burgelman et al [97] au département ELIS, à l'université de Gent en Belgique avec Windows/CVI National Instruments. Il a été conçu pour la simulation des cellules solaires polycristallines à hétérojonction. Pratiquement, il est utilisé et testé avec les cellules solaires à base des matériaux CdTe et CIGS [98-102]. Le simulateur arrive à simuler sept couches, en plus des deux couches des contacts avant et arrière. Toutes les propriétés physiques et optoélectroniques de chaque couche peuvent être affichées et modifiées dans une fenêtre séparée [102]. La première version de ce logiciel (version 2.0) a été distribué en 1998 durant la deuxième conférence internationale en photovoltaïque à Wien.

IV. 7. 4. 1 Le fonctionnement du SCAPS-1D

Apres le lancement du simulateur SCAPS-1D à partir de l'icône (1- Run SCAPS), la fenêtre principale du simulateur « Action Panel » apparait (Fig. 56). Elle est constituée de plusieurs panneaux dédiés aux actions de base suivantes :

Fenêtre 2 : Définition du problème **:** Toutes les propriétés électriques et optiques ainsi que la géométrie de la cellule solaire à étudier sont définies à travers ce menu. Après le click sur le bouton, une autre fenêtre s'affiche (Fig. 57.a). Cette dernière donne la possibilité de : créer une nouvelle structure « New », charger une ancienne « Load » ou sauvegarder la stucture en cours de simulation « Save ».

Dans le cas de création d'une nouvelle structure « New », on introduit les couches une par une, avec leurs proprietés optiques et électriques (Fig. 57. b). Le sens de la lumière peut être choisi en direction du contact avant ou arrière. Les propriétés des contacts sont choisies par la sélection de la fenêtre Left contact / Right contact, ce qui ouvre une nouvelle fenêtre (Fig.58). Les propriétés spécifiées dans cette fenêtre sont : la vitesse de recombinaison des électrons et des trous aux interfaces avant et arrière, le travail de sortie du métal et les proprietés optiques de l'interface.

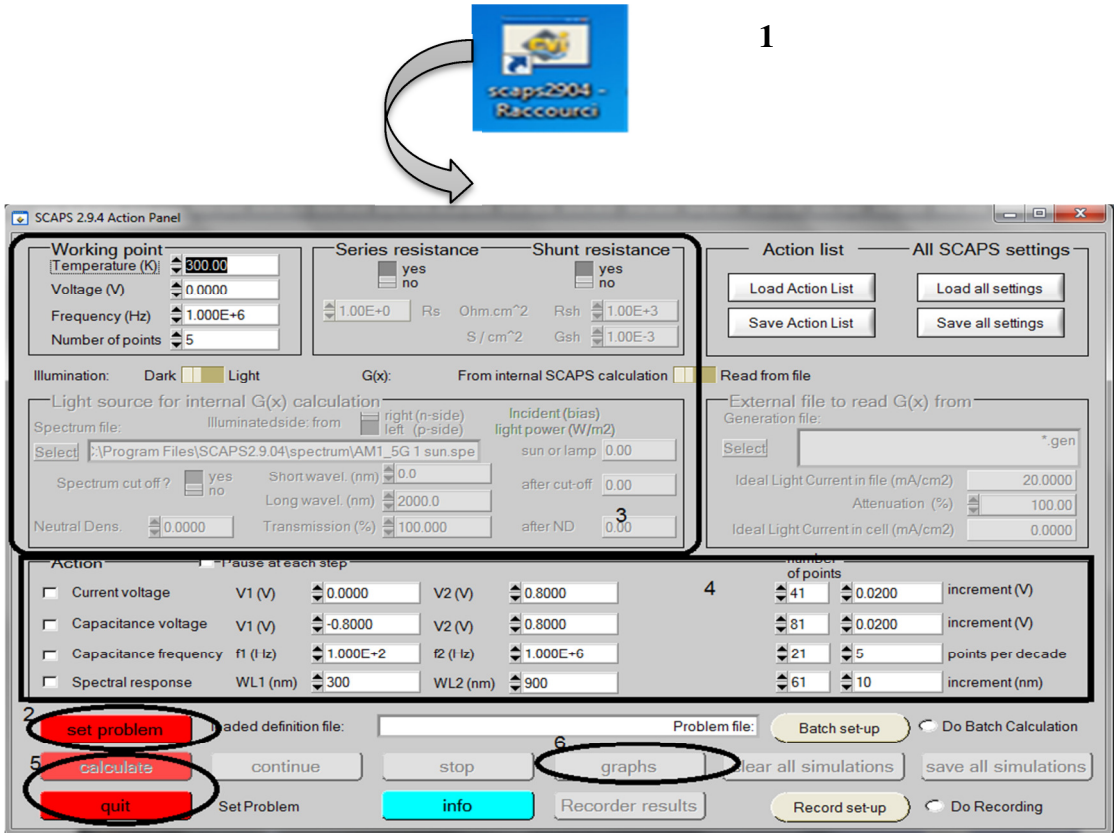
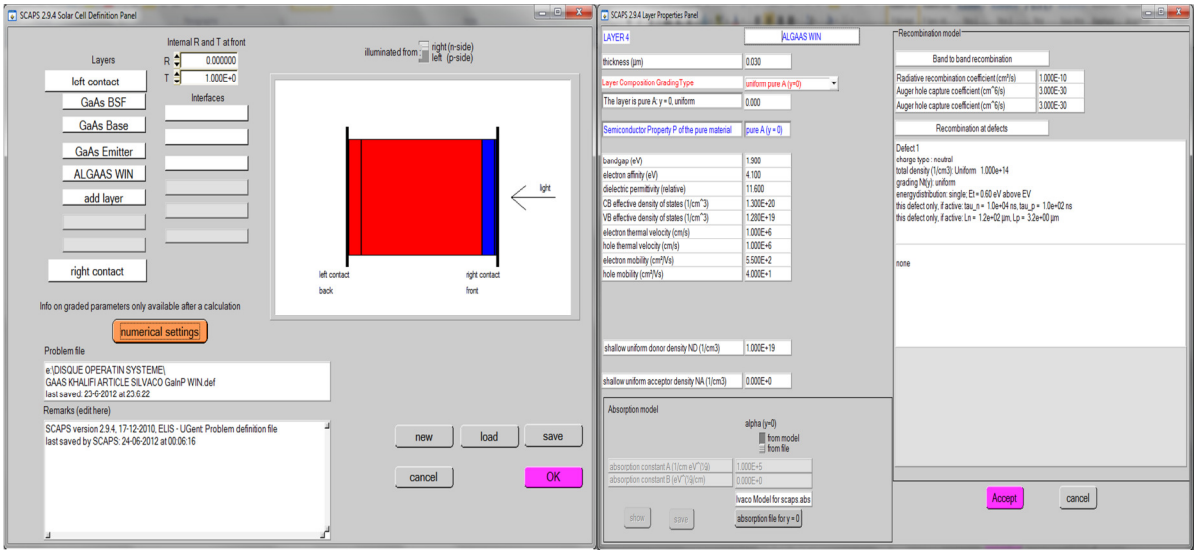


Figure 56 : Fenêtre principale du simulateur solaire SCAPS-1D (Version 2. 9. 4).



(a) (b)

Figure 57 : Présentation d'une structure sous SCAPS-1D.

(a) Panneau de définition de la cellule solaire, (b) Panneau définissant les proprietés de chaque couche.

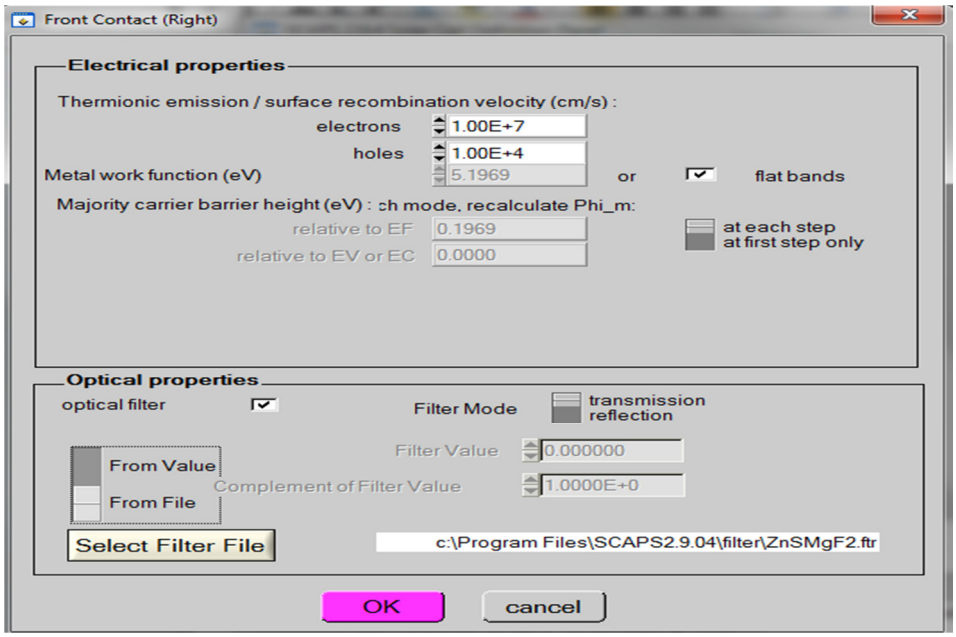


Figure 58 : Panneau décrivant les propriétés des contacts de la cellule solaire.

Fenêtre 3 : Sert à spécifier les paramètres de travail pour faire la simulation. Ces paramètres sont : la température ambiante, l'éclairement ou l'obscurité, le spectre solaire utilisé et les résistances parasites. Ces paramètres sont considérés fixes et ne varieront pas durant la simulation.

Fenêtre 4 : Indique ce que nous voulons avoir comme paramètres de sortie après la simulation : les courbes courant-tension et la réponse spectrale.

Fenêtre 5 : Pour le lancement des calculs qui peut se faire en deux modes, soit en mode simple (variation d'un seul paramètre), soit en mode Batch. Dans le mode Batch l'étude peut se faire sur un ou plusieurs paramètres. L'utilisateur a la possibilité de choisir les paramètres, l'intervalle et le mode de variation (linéaire ou logarithmique) (Fig. 59).

Fenêtre 6 : Utilisée pour l'affichage des courbes de simulation. Après la simulation de la structure choisie, SCAPS-1D commute vers la présentation des résultats sous forme graphique (Fig. 60). A cette étape on peut imprimer ou sauvegarder les courbes sous forme data (excel).

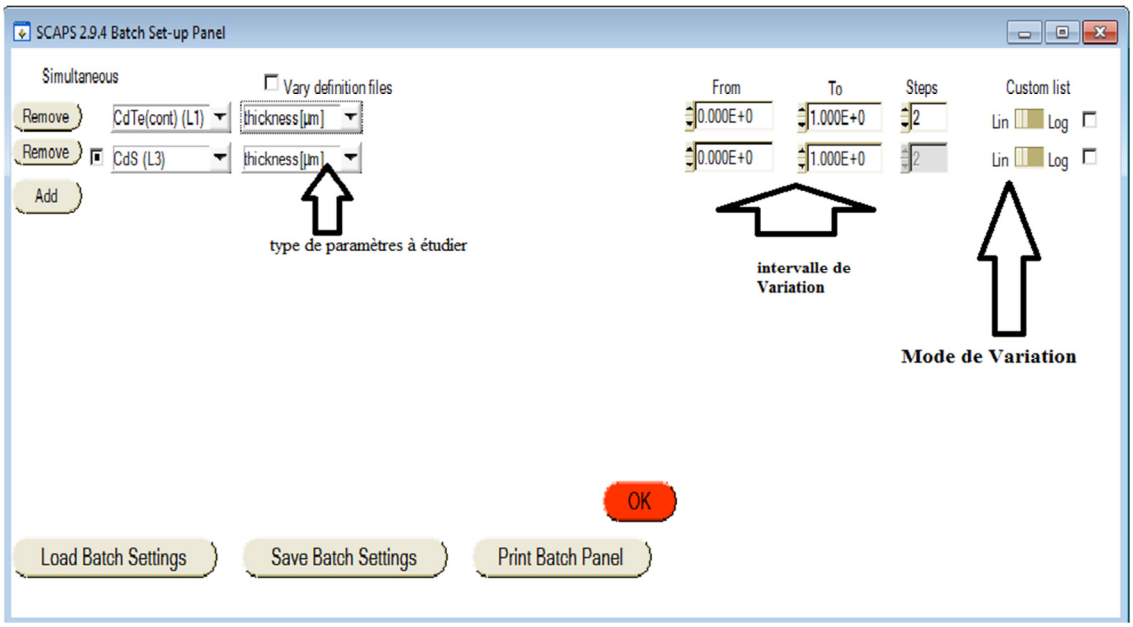


Figure 59 : Panneau décrivant le mode de Simulation Batch.

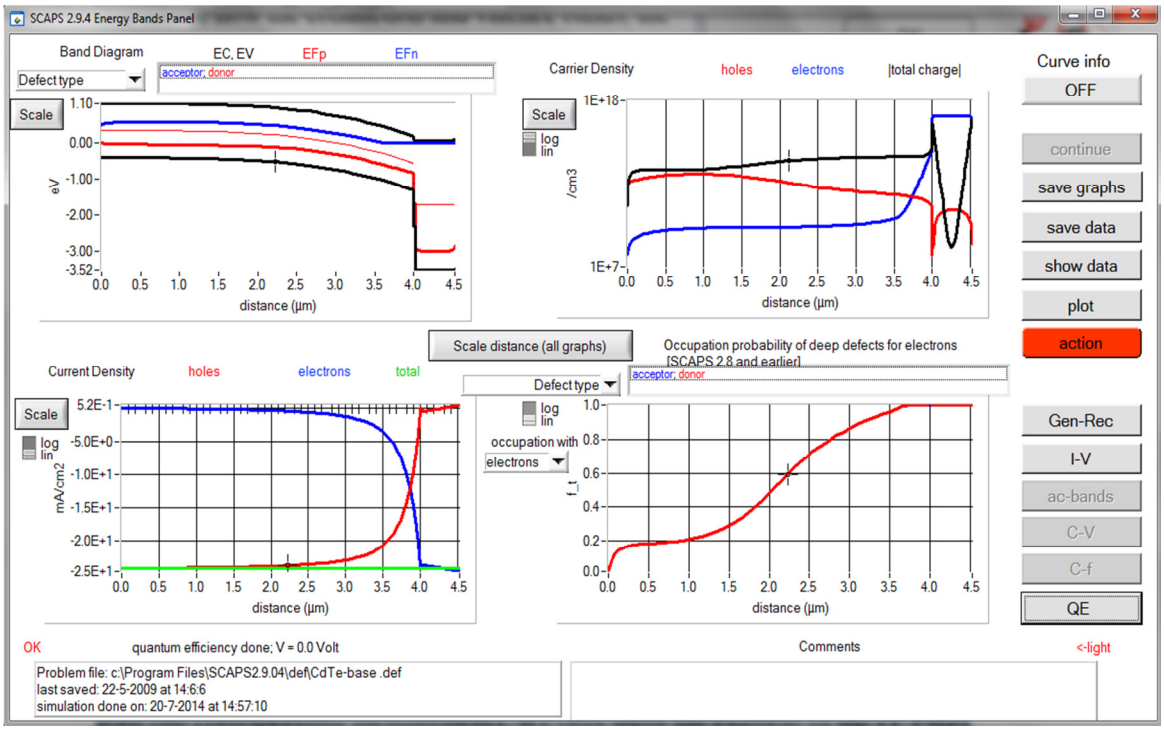


Figure 60 : Panneau des courbes des résultats de la simulation.

IV. 7. 5 Comparaison

En plus des deux méthodes de discrétisation, le tableau 17 de la Réf [98], présente une étude comparative entre certaines caractéristiques des simulateurs solaires.

Tableau 17 : Caractéristiques de quelques simulateurs solaires des couches minces

	AMPS	**SCAPS**	**ASA**	**PC1D**
Nombre maximum de couches	30	7	Illimité	5
Discontinuités de bande dans E_C et E_V	Tous les programmes utilisent le modèle d'Anderson			
Gap Graduel	Non	Non	Oui	Non
Etats profond	50	3	4	aucune charge
Etats d'interface profond	Non	Oui	Non	Non
Changement dans les états profond	Oui	Oui	Oui	Non
Robustesse numérique (convergence)	++	Ok	++	Ok
Rapide	-	+	++	++
Facile à utiliser	+	++	-	++

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les expressions de base qui gouvernent le transport des charges dans une cellule solaire (homo / hétérojonction) sous éclairement et sous obscurité. Sans certaines simplifications, la résolution analytique de ces expressions est difficile ce qui exige l'utilisation des méthodes numériques. Dans la deuxième partie, nous avons présenté le fonctionnement et les caractéristiques des deux simulateurs solaires numériques PC1D et SCAPS-1D le plus reconnu dans la modélisation des cellules solaires. Dans le prochain chapitre nous allons utiliser le simulateur SCPAS-1D comme outils de simulation.

Chapitre V :

Résultats et interprétations

Chapitre V

Résultats et interprétations

V. 1 Introduction

L'objectif, dans la modélisation des cellules solaires, est de trouver un lien entre les propriétés des matériaux et les caractéristiques électriques de sortie de la cellule solaire [104]. La recherche des paramètres technologiques optimaux des différentes couches de la cellule qui assurent des meilleurs rendements est devenue nécessaire.

Dans notre travail, nous effectuons une modélisation de la cellule tandem monolithique GaInP/GaAs et de l'heterostructure NP à base du matériau GaAs avec couche fenêtre GaInP, en utilisant le simulateur solaire unidimensionnel SCAPS-1D.

V. 2 Tandem GaInP/GaAs

V. 2. 1 Simulation des cellules solaires tandems avec SCAPS-1D

La simulation des cellules solaires tandem nécessite un simulateur puissant et capable de gérer des nombreuses couches (jonctions PN, diodes tunnel, Back Surface Field (BSF)…). Il doit également être capable de simuler les diodes tunnels inter- connexion, qui sont essentiellement des dispositifs quantiques. Ces deux aspects sont les limites principales du simulateur SCAPS -1D. En fait, ce simulateur ne permet pas plus de neuf couches y compris les contacts avant et arrière. Dans cette partie, nous proposons une nouvelle technique qui nous permet d'utiliser le simulateur SCAPS -1D pour simuler des cellules solaires tandems. Dans cette technique, la cellule supérieure (Top-cell) et la cellule inférieure (Bottom-cell) sont simulées séparément, le spectre solaire traversant la première cellule est modifié par l'absorption dans la cellule supérieure. Le spectre absorbé est éliminé, ce qui nécessite son évaluation pour la simulation. Les paramètres de la cellule à déterminer, au cours de la simulation, sont les suivants : la densité optimale du courant de court-circuit entre les deux cellules (Top-Bottom), la tension de circuit ouvert, le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion de la cellule tandem.

V. 2. 2 Matériaux et méthodes

La cellule solaire monolithique tandem que nous voulons optimiser a déjà été étudiée par T. Takamoto et al. [107] (fig. 1). Elle est constituée d'une cellule supérieure GaInP en série avec une cellule inférieure GaAs et une couche fenêtre AlInP. Pour améliorer l'absorption de la cellule tandem une couche anti reflet MgF_2/ZnS est ajoutée sur la face avant. Les paramètres technologiques des couches sont représentés sur le schéma de la figure 61.

ARC (MgF_2/ZnS)			
AlInP	fenêtre	0.03µm	$n < 2\times10^{18}cm^{-3}$
GaInP	Emetteur	0.05µm	$n= 3\times10^{18}cm^{-3}$
GaInP	Base	Epaisseur réglable	$p= 1.5\times10^{17}\ cm^{-3}$
GaInP	BSF	0.5µm	$p+=2\times10^{18}cm^{-3}$
P+/N+ Jonction Tunnel			
GaInP	fenêtre	0.1 µm	$n= 2\times10^{18}cm^{-3}$
GaAs	Emetteur	0.1µm	$n= 2\times10^{18}cm^{-3}$
GaAs	Base	3 µm	$P= 2\times10^{17}cm^{-3}$
GaInP	BSF	0.1 µm	$P+= 2\times10^{18}cm^{-3}$
P+	Substrat		$P+ <1\times10^{19}cm^{-3}$

Figure 61: Schéma de la cellule monolithique Tandem GaInP / GaAs avec ses paramètres technologiques.

Pour rendre cette simulation réalisable avec le simulateur SCAPS-1D, la valeur du spectre solaire sur la face avant de la cellule inférieure GaAs doit être évaluée correctement. Pour cette raison, nous utilisons le modèle de Beer-Lambert dans notre calcul du spectre résultant. Ce dernier permet de calculer le flux des photons d'énergie E à une épaisseur *x* à l'intérieur d'un matériau absorbant, en utilisant l'expression suivante [1] :

$$\boldsymbol{F(x,t) = F0(E)}\times\left[1-\boldsymbol{R(E)}\right]\times\exp\left[-\boldsymbol{\alpha(E)}\times\boldsymbol{x}\right]\ [\text{photon.cm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (128)$$

Où ***F0(E)*** est le flux de photons incidents par unité de surface, ***R (E)*** est le facteur de réflexion de surface, et ***α (E)*** est le coefficient d'absorption du matériau.

Si tous ces paramètres sont déterminés, nous pouvons obtenir le flux des photons qui traversent la cellule inférieure, d'où nous pouvons obtenir le nouveau spectre qui sera utilisé comme un spectre d'entrée et ainsi simuler la cellule inferieure GaAs. Les paramètres de la cellule tandem sont calculés selon les étapes suivantes :

- La densité de courant de court-circuit de la cellule tandem (J_{SC}-Tandem) est définie par la plus faible densité de courant circulant dans les deux cellules (Top et Bottom), tandis que la tension en circuit ouvert du tandem (V_{oc}-Tandem) est la somme des deux tensions ($V_{oc\text{-}Top} + V_{oc\text{-}Bottom}$) [42,105].
- Pour le calcul du Facteur de Forme (FF), nous utilisons la formule analytique suivante [44,106] :

$$FF = (V_{oc} - A \times V_{th} \times \ln(V_{oc} / (A \times V_{th}) + 0.72)) / (V_{oc} + A \times V_{th}) \quad (129)$$

Ou en utilisant la formule donnée dans [9] :

$$FF = (1 - A \times V_{th} / V_{oc}) \times (1 + (A \times V_{th} / V_{oc}) \times \ln((A \times V_{th}) / V_{oc})) \quad (130)$$

Où: $V_{th} = \frac{KT}{q}$ est la tension thermique, K la constante de Boltzmann, q la charge élémentaire et A est le facteur d'idéalité de la cellule (pris comme 2) à T = 300 K.

- Enfin, le rendement de conversion de la cellule η, est calculé par :

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times J_{sc}}{P_{in}} \quad (131)$$

Où P_{in} est la puissance incidente du spectre AM1.5G (1000 w / m^2).

V. 2. 3 Résultats et discussions

V. 2. 3. 1 Validation du modèle

Pour modéliser la cellule tandem GaInP / GaAs, nous commençons par le calibrage des deux cellules supérieures (Top cell) GaInP et inferieure (Bottom cell) GaAs constituant la cellule tandem.

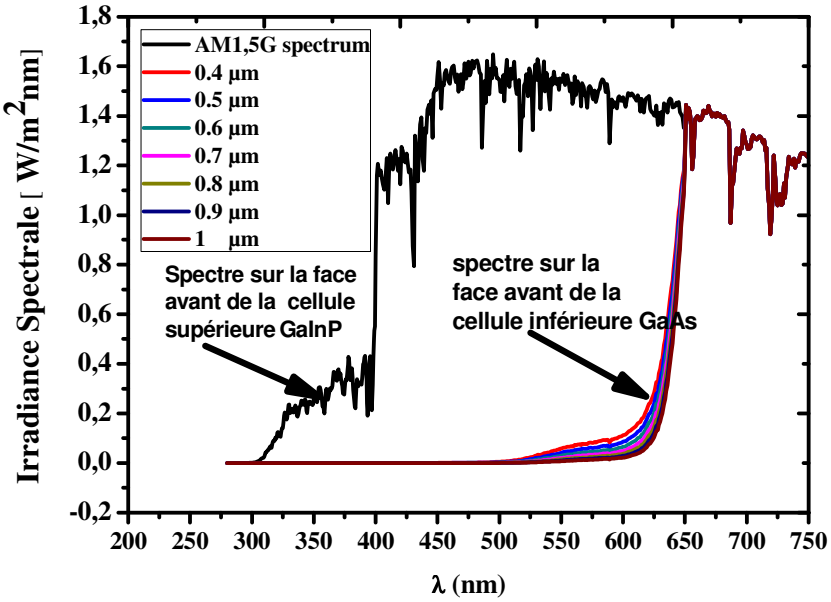
Le tableau 18 présente les résultats de simulation comparés avec ceux obtenus expérimentalement dans les Références [107] et [108]. Nous constatons, du tableau 2, que nos résultats sont conformes à ceux rapportés dans la littérature.

Tableau 18 : Résultats de simulation obtenus par SCAPS1.D et ceux obtenus dans les références [107], [108].

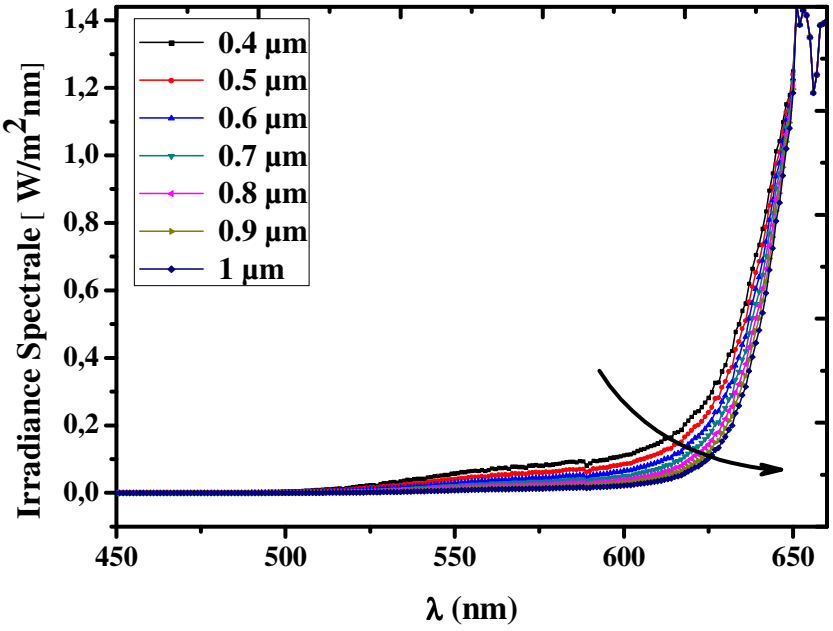
Paramètres de la cellule	GaInP REF [107]	Résultats de simulation GaInP	GaAs ref. [108]	Résultats de simulation GaAs
V_{oc} (V)	1.391	1.417	1.050	1.01
J_{sc} (mA/cm2)	15.12	15.32	27.80	28.01
FF (%)	87.9	85.11	85.55	86.28
η (%)	18.48	18.43	25.0	24.44

V. 2. 3. 2 Modélisation du tandem

Pour assurer le critère d'égalité du courant de court-circuit entre la cellule supérieure GaInP et la cellule inférieure GaAs, on fait varier l'épaisseur de la base de la cellule supérieure GaInP ($X_{B\text{-}GaInP}$) entre 0,4 µm et 1 µm. L'effet de cette variation sur le spectre solaire est présenté sur la figure 62. La capacité d'absorption de la cellule supérieure varie proportionnellement avec l'épaisseur de base $X_{B\text{-}GaInP}$ (plus l'épaisseur augmente plus la cellule absorbe).



(a)

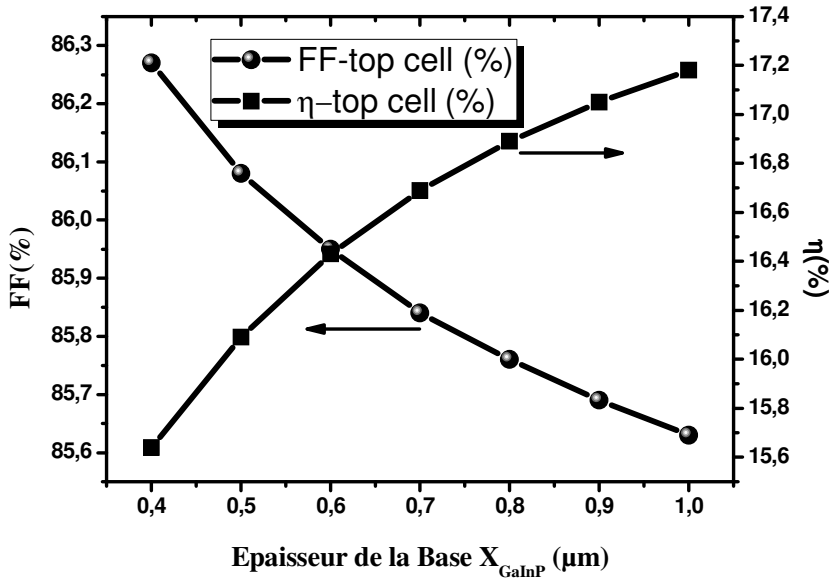


(b)

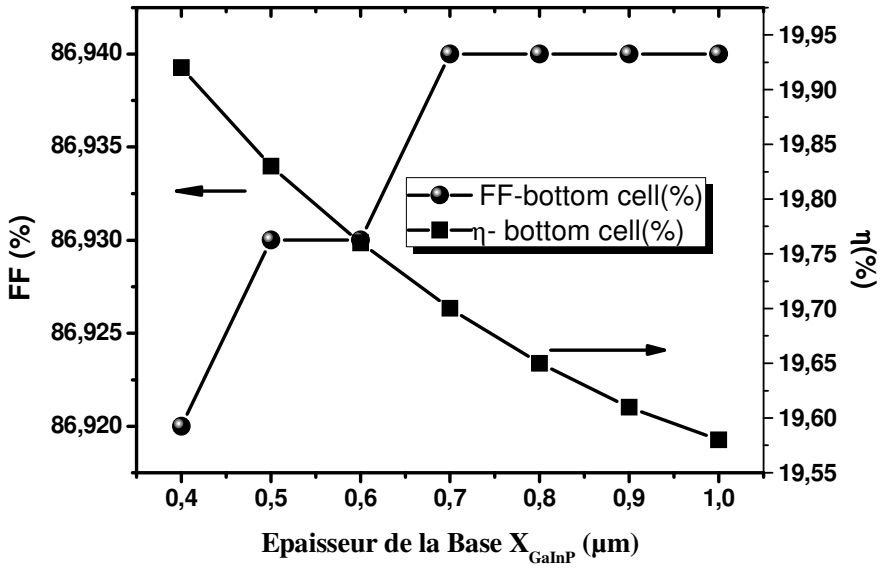
Figure 62 : Spectres solaires, calculés sur la face avant de la cellule GaAs, en fonction de la variation sur l'épaisseur de base de la cellule supérieure GaInP. spectre solaire au niveau de la face avant de la : (a) cellule supérieure et inférieur, (b) cellule inférieur.

La figure 63 présente l'effet de l'épaisseur $X_{B\text{-}GaInP}$ sur le facteur de forme et le rendement de conversion de la cellule supérieure et inférieure. On remarque que le facteur de forme FF est un peu influencé par le changement de l'épaisseur de la cellule supérieure. Cependant, le rendement de conversion est légèrement meilleur dans la cellule supérieure que dans la cellule inférieure. Il augmente dans la cellule supérieure de 15,64% pour $X_{B\text{-}GaInP}$ = 0, 4 µm, à 17,18% pour $X_{B\text{-}GaInP}$ = 1 µm. Un meilleur compromis entre le rendement de conversion et le facteur de forme est obtenu pour une $X_{B\text{-}GaInP}$ = 0.6µm. D'autre part, afin d'assurer la condition d'égalité du courant de court-circuit entre la cellule supérieure GaInP et la cellule inférieure GaAs, l'épaisseur de la base doit être 0.7µm (Fig. 4, 5). Nous pouvons également voir que cette valeur correspond à un maximum dans le rendement de conversion η (29.83 %). Cela est dû au fait que l'augmentation dans l'épaisseur de la base de la cellule supérieure, au-dessus de la longueur de diffusion du porteur minoritaire, conduit à

une réduction dans le rendement de conversion de la cellule en raison d'une diminution de la densité de courant.



(a)



(b)

Figure 63 : Variation du facteur de forme et du rendement de conversion de la cellule supérieure et inférieure, en fonction de l'épaisseur de la base de la cellule supérieure GaInP
(a) cellule supérieure GaInP, (b) cellule inférieure GaAs.

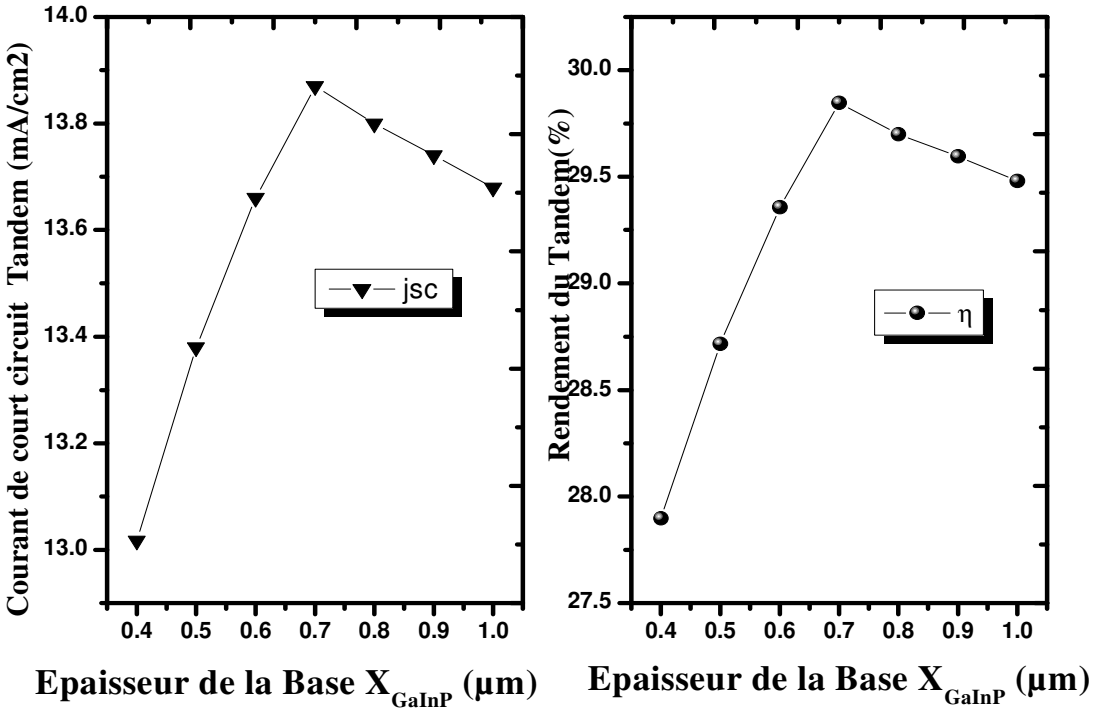


Figure 64 : Effet de l'épaisseur de base de la cellule supérieure GaInP sur la densité de courant de court-circuit et le rendement de conversion du Tandem.

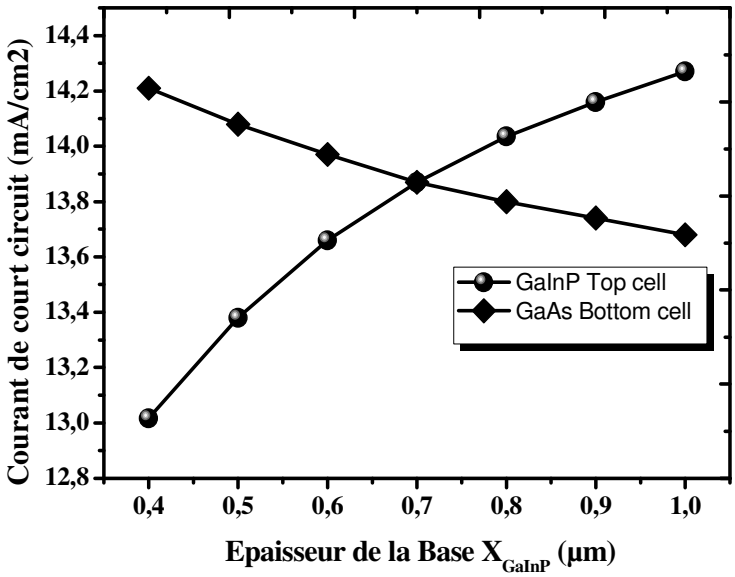


Figure 65 : Densité de courant de court-circuit optimisé des deux cellules solaires supérieure et inférieure, en fonction de l'épaisseur de la base de la cellule supérieure GaInP.

La caractéristique (J-V) des cellules supérieure et inférieure après optimisation, sous le spectre AM1.5G, est représentée par figure 66. Les paramètres électriques correspondant à la cellule tandem monolithique GaInP/GaAs sont résumés dans le tableau 19.

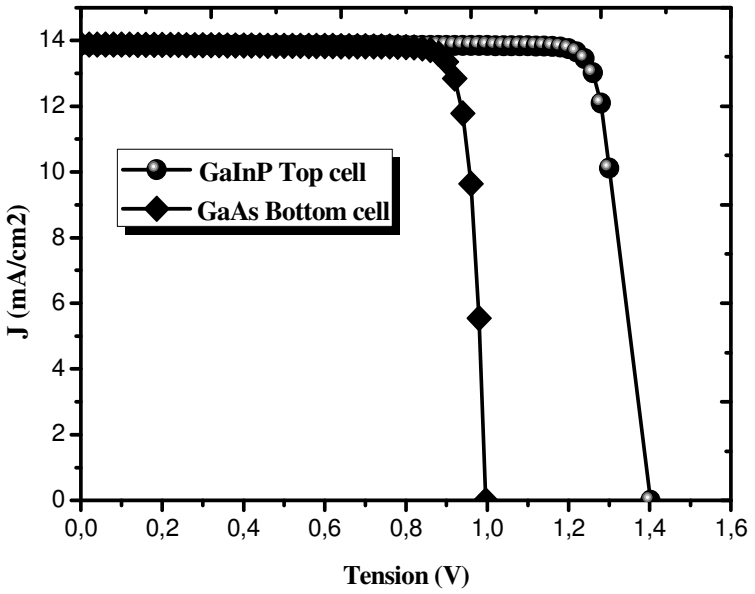


Figure 66 : Caractéristique J-V de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs optimisée.

Tableau 19 : Paramètres électriques de la cellule tandem optimisée et ceux de la référence [107].

Paramètres de la cellule	cellule supérieure	cellule inférieure	**Tandem optimisé par Scaps**	**Tandem Réf [107]**	**Tandem Réf [107]**
V_{co} (V)	1.401	0.996	**2.397**	**2.418**	**2.418**
Jcc (mA/cm^2)	13.87	13.87	**13.87**	**13.16**	**13.16**
FF (%)	85.84	86.94	**89.74**	**89.8 (résultat Théorique)**	**85.8 (résultat Expérimental)**
η(%)	16.69	19.7	**29.83**	**28.57**	**27.3**

V. 3 Effet des paramètres technologiques sur la cellule optimisée

Le dopage est l'un des différents paramètres qui peuvent affecter le fonctionnement de la cellule.

V. 3. 1 Effet du dopage de la base de la cellule supérieure

Ce paramètre joue un rôle important aussi bien dans la cellule supérieure que dans la cellule inférieure.

V. 3. 1. 1 Cellule supérieure

Les paramètres technologiques de la base de la cellule supérieure jouent un rôle très important dans l'optimisation des performances de la cellule tandem. Le dopage de cette région est choisi de façon à minimiser le courant d'obscurité d'une part, et de réduire les pertes résistives dans cette région d'autre part. Dans cette optique nous avons fixé les paramètres technologiques des autres régions (Fenêtre, Emetteur, BSF) en gardant l'épaisseur de cette zone 0.7µm (valeur optimisée de l'étude précédente). Nous avons alors étudié l'influence du dopage de la base de la cellule supérieure sur les caractéristiques de la cellule supérieure (GaInP) et de la cellule tandem GaInP/GaAs.

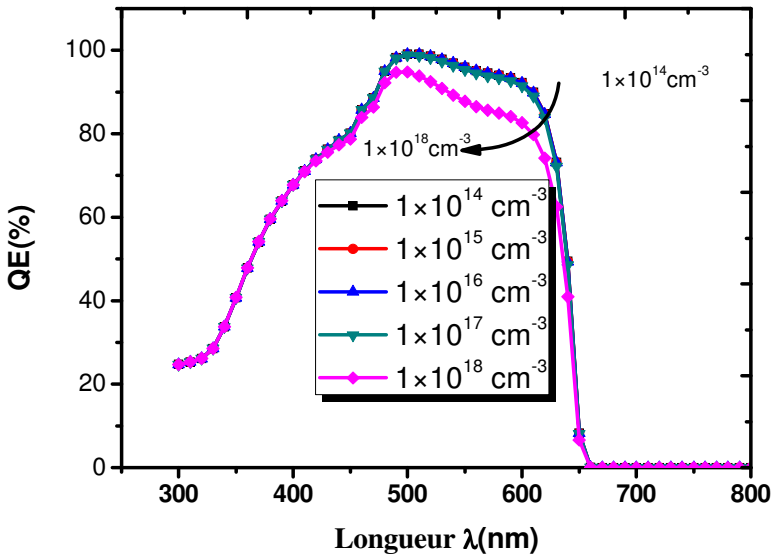


Figure 67 : Effet du dopage de la cellule supérieure sur rendement quantique de la cellule supérieure.

D'après la figure 67, on remarque que le dopage de la base affecte le rendement quantique de la cellule GaInP dès que les radiations dépassent 500 nm.

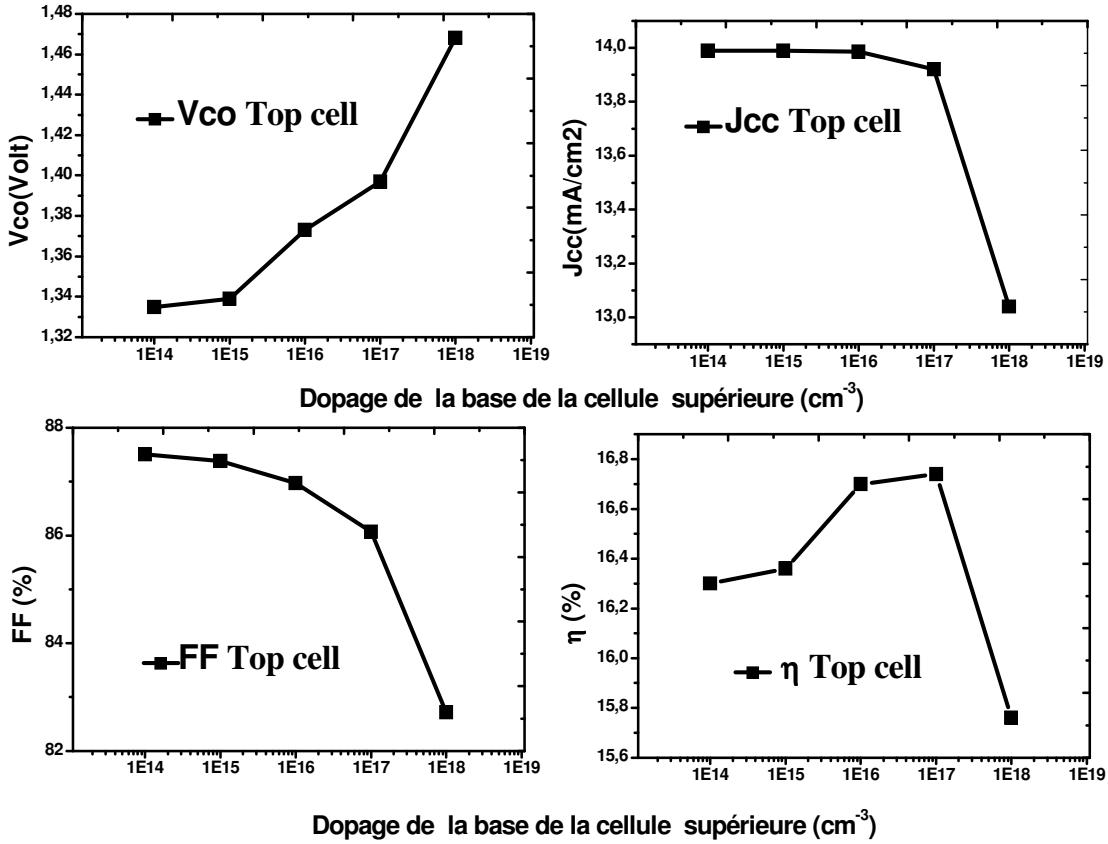


Figure 68 : Effet du dopage de la cellule supérieure sur ses performances.

Avec un fort dopage de la base ($N > 1\times10^{17}$), le QE(λ) subit une forte dégradation. Le fort dopage ($N=1\times10^{18}$) implique une augmentation dans la tension en circuit ouvert, à cause d'une diminution dans le courant d'obscurité. Mais il provoque une diminution dans le courant de court-circuit à cause de l'augmentation de la résistivité de la base (Fig. 68). Le rendement de la cellule supérieure augmente proportionnellement avec le dopage jusqu'à un optimum pour $10^{17}cm^{-3}$.

V. 3. 1. 2 Cellule Tandem

La figure 69 présente l'effet du dopage de la base sur toute la cellule tandem, on remarque que la tension en circuit ouvert augmente avec l'augmentation du dopage de la base de la cellule supérieure. La densité du courant de court-circuit est quasiment constante pour un dopage variant entre 10^{14} et 10^{17} cm^{-3} puis elle diminue rapidement pour N> 10^{17} cm^{-3}. Ceci est dû à la diminution de la longueur de diffusion et la mobilité des porteurs minoritaires aux forts dopages [8].

Le facteur de forme augmente légèrement avec l'augmentation du dopage, alors que le rendement augmente de 28.95%, pour N=1×10^{14}, à 29.90% pour N=1×10^{18} cm^{-3}.

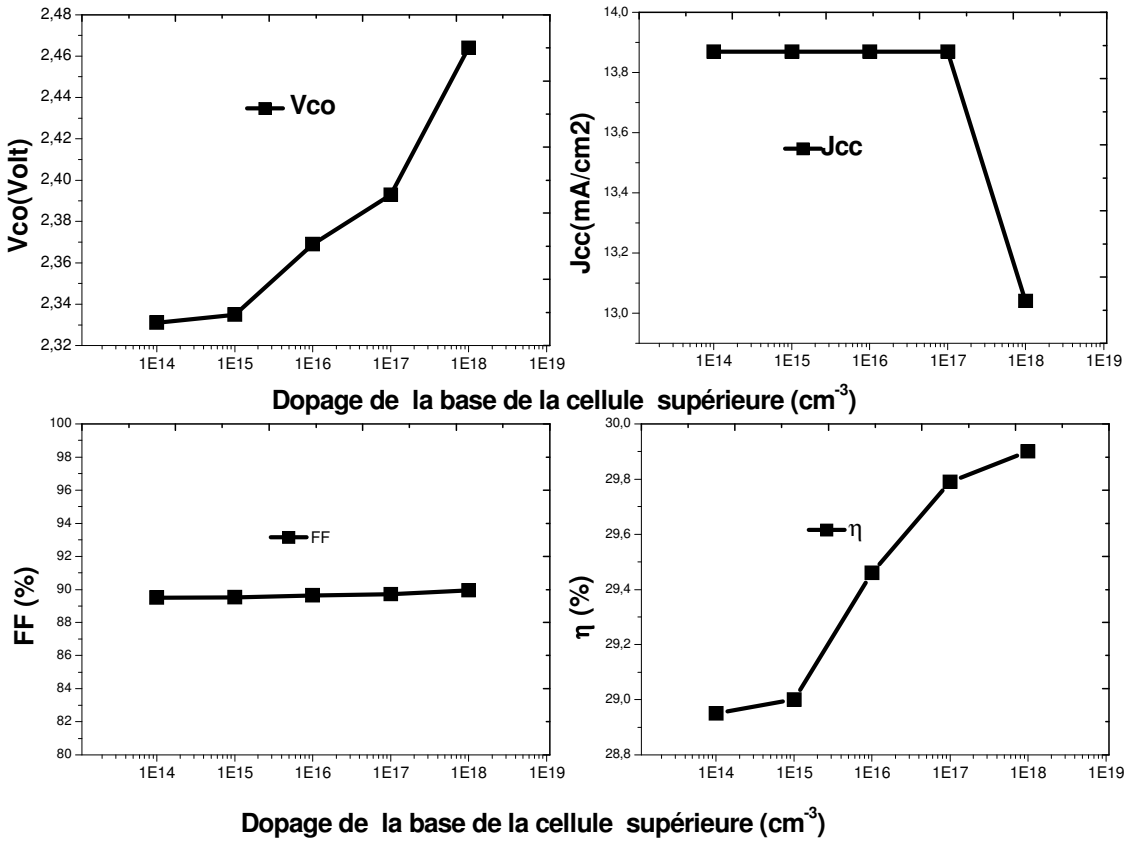


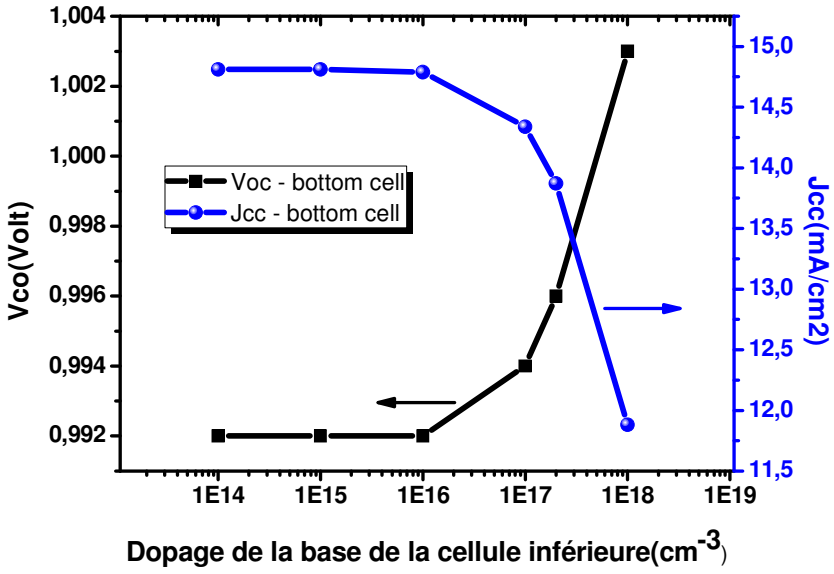
Figure 69 : Effet du dopage de la cellule supérieure sur les performances du Tandem.

V. 3. 2 Effet du dopage de la base de la cellule inférieure (bottom cell)

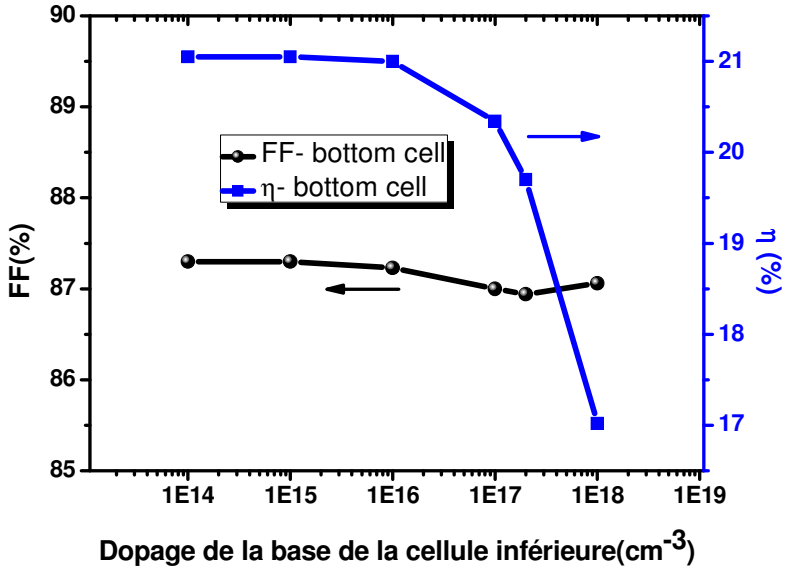
De même que la cellule supérieure, la cellule inférieure est également affectée par le dopage.

V. 3. 2. 1 Cellule inférieure

Dans cette partie on utilise les paramètres technologiques de la cellule tandem optimisée en faisant varier le dopage de la base de la cellule inferieure entre 1×10^{14} et $1\times10^{18}cm^{-3}$. Les résultats obtenus pour la cellule inférieure GaAs sont représentés sur la figure 70.



(a)



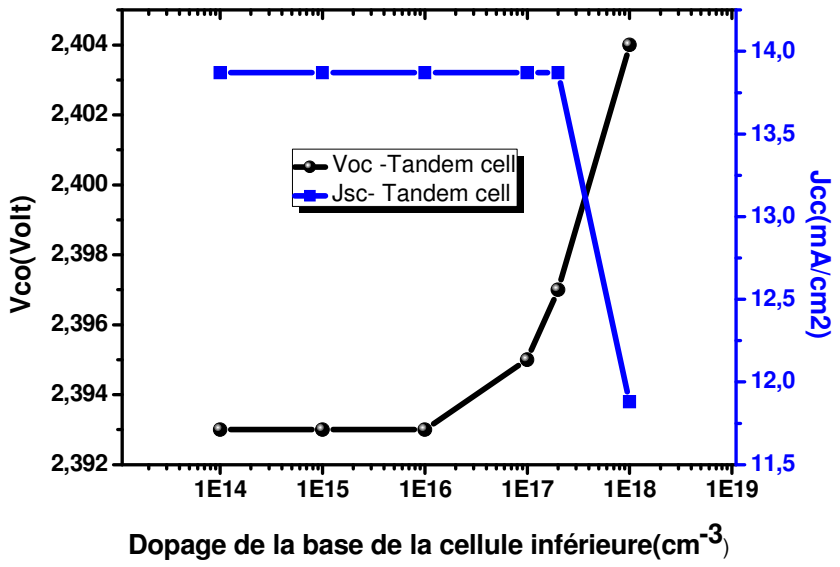
(b)

Figure 70 : Effet du dopage de la cellule inférieure sur ses performances.

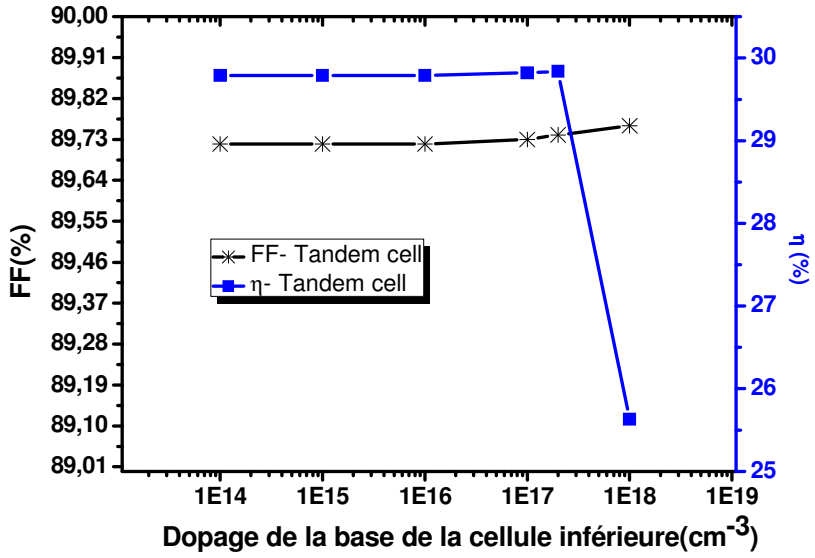
Les paramètres de la cellule restent insensibles à l'augmentation du dopage pour $N<1\times10^{16}cm^{-3}$, puis le courant de court-circuit et le rendement subissent une forte dégradation lorsque le dopage dépasse 1×10^{17}. Le facteur de forme reste insensible aux variations du dopage, mais la tension en circuit ouvert augmente.

V. 3. 2. 2 Cellule Tandem

Les performances de la cellule tandem dépendent des paramètres de la cellule inférieure. Un rendement maximum de 29.83% est obtenu pour un dopage de la base de la cellule inférieure de $2\times10^{17}cm^{-3}$. On remarque aussi que la condition d'égalité de courant est assurée par la cellule supérieure pour des valeurs du dopage de la cellule inférieure inférieures à 2×10^{17} cm^{-3} (Fig. 71).



(a)



(b)

Figure 71: Effet du dopage de la cellule inférieure sur les performances de la cellule tandem.

V. 3. 3 Effet de la couche BSF sur le rendement de la cellule tandem

Dans cette partie, nous examinons l'influence du dopage de la couche BSF de la cellule supérieure sur ses propres performances et la valeur optimale qui valide la condition d'égalité du courant de court-circuit dans la cellule tandem. Nous faisons alors varier la valeur du dopage du $N_{A\text{-}BSF\text{-}Top\ cell}$ entre 10^{14} et $10^{19}cm^{-3}$.

Dans les figures 72 et 73, on remarque que les caractéristiques électriques de la cellule supérieure sont légèrement sensibles à la variation du dopage pour une variation de ce dernier entre 10^{14} et 10^{16} cm^{-3}. Pour un dopage supérieur à 10^{17} cm^{-3}, les caractéristiques de la cellule supérieure sont améliorées, en particulier la tension en circuit ouvert par réduction du courant d'obscurité. L'amélioration de la réponse spectrale est remarquable pour les fortes longueurs d'onde et pour les forts dopages du BSF (Fig. 74).

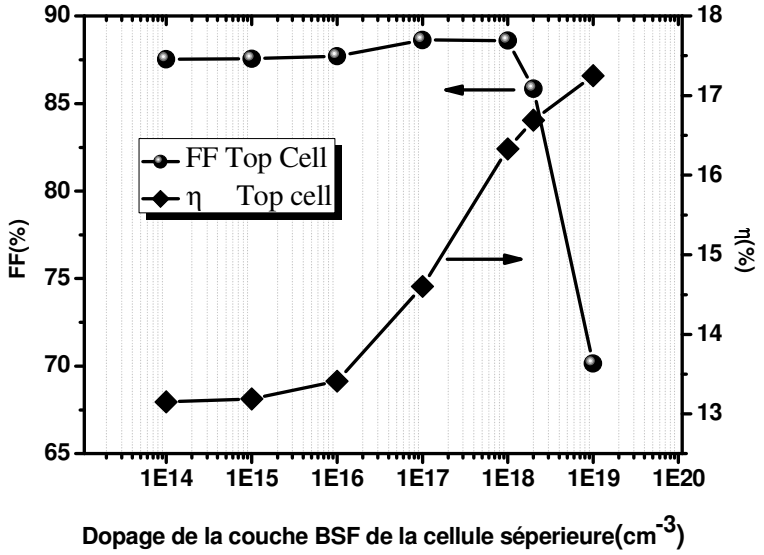


Figure 72 : Effet du dopage de la couche BSF sur le facteur de forme
et le rendement de conversion de la cellule supérieure.

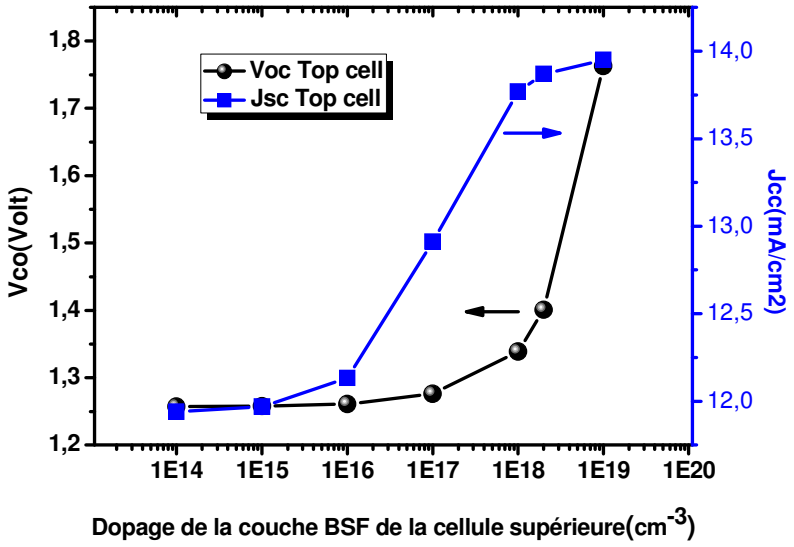


Figure 73 : Effet du dopage de la couche BSF sur le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert de la cellule supérieure.

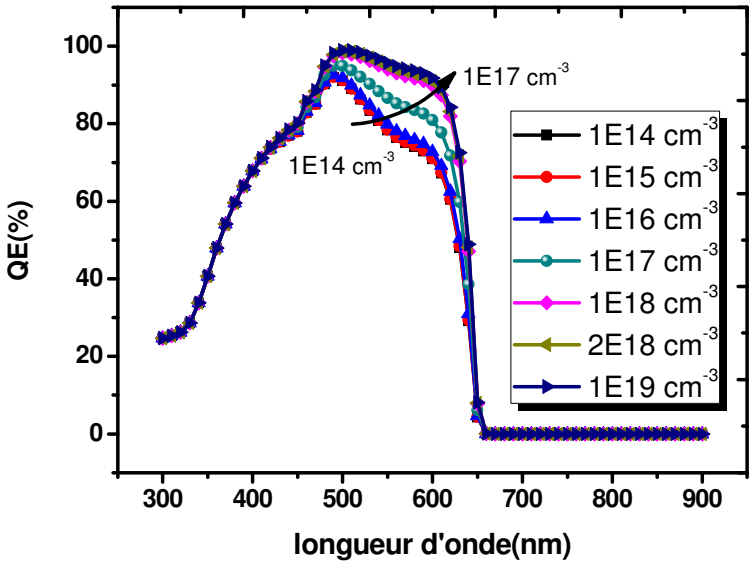


Figure 74 : Effet du dopage de la couche BSF sur le rendement quantique de la cellule supérieure.

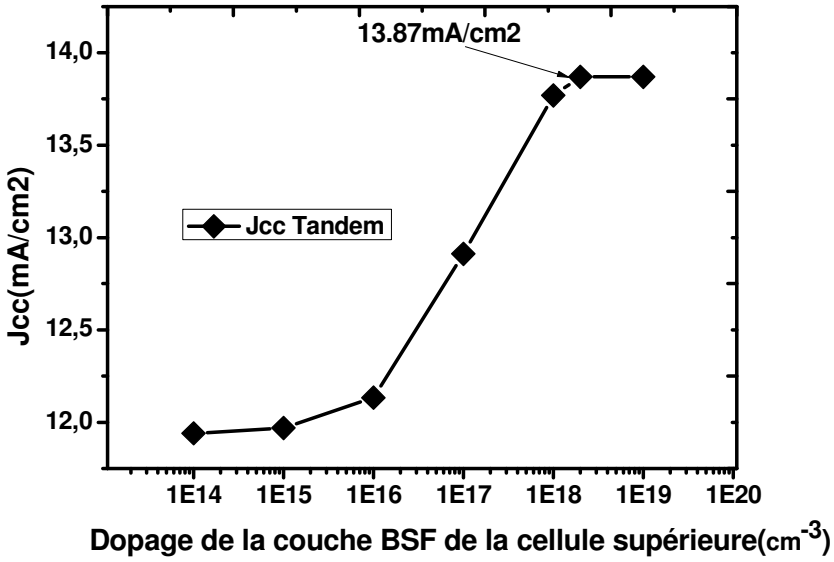


Figure 75 : Effet du dopage de la couche BSF sur le courant de court-circuit optimum de la cellule tandem.

Pour la cellule tandem, le plus faible courant reste fourni par la cellule supérieure jusqu'à un dopage de 2×10^{18} cm^{-3}, les deux courants circulant dans les deux cellules supérieure et inférieure deviennent égaux et la condition d'égalité du courant est respectée (Fig. 75).

V. 4 Etude de l'effet de la température sur la cellule solaire

La température est un paramètre majeur dans la détermination des performances des cellules solaires. Une grande partie de l'énergie incidente (85%), à la surface de la cellule, est dissipée sous forme de chaleur [01]. En général, la chaleur est évacuée par convection naturelle de l'air ambiant à la surface des modules. Les propriétés de la cellule solaire sont très sensibles à la variation de la température. Nous voulons ici, examiner l'effet de la température sur les performances de la cellule photovoltaïque monojonction à couche fenêtre et la cellule à multijonctions (tandem).

V. 4. 1 Effet de la température sur les propriétés des matériaux

Le gap du matériau semi-conducteur est l'un des paramètres dominants dans la détermination des caractéristiques de la cellule solaire. Il est très sensible à la variation de la température et son expression est donnée par l'équation de Varshni [109].

$$E_G\ (eV) = E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \qquad (132)$$

Où T est la température absolue en Kelvin, β et α sont deux constantes données par le tableau 20 et E_{g0} est la bande interdite à T= 0°K.

Tableau 20 : Les paramètres E_{g0} , α et β des matériaux Si (a), GaAs(a), InP(b) et $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ [9].

Matériau	E_{g0} , eV	α x 10^{-4}, eV/K^2	β, °K
Si (a)	1.17	4.730	636
GaAs(a)	1.52	5.405	204
InP(b)	1.42	4.906	327
$Ga_{0.5}In_{0.5}P$	1.9614	5.400	204

La variation des propriétés des deux matériaux GaInP et GaAs en fonction de la température est donnée par le tableau 21 et illustrée dans les figures 76 et 77.

Tableau 21 : Variation des paramètres du matériau en fonction de la température

paramètres	GaInP	GaAs
E_G (eV)	$1.9614 - 5.4 \times \frac{10^{-4}}{(T+204)} \times T^2$ [09]	$1.5204 - 5.4 \times \frac{10^{-4}}{(T+204)} \times T^2$ [54]
n_i (cm^{-3})	$1.15 \times 10^{15} T^{3/2} \exp - E_G/2KT$ [09]	$3.62 \times 10^{14} T^{3/2} \exp - (E_G/2KT)$ [54]
N_c (cm^{-3})	$1.2 \times 10^{14} \times T^{3/2}$ [54]	$4.82 \times 10^{15} T^{3/2} (0.063)^{3/2}$ [54]
N_V(cm^{-3})	$4.82 \times 10^{15} \times T^{3/2} (0.6+0.19x)^{3/2}$ [54]	$4.82 \times 10^{15} T^{3/2} (0.51)^{3/2}$ [54]

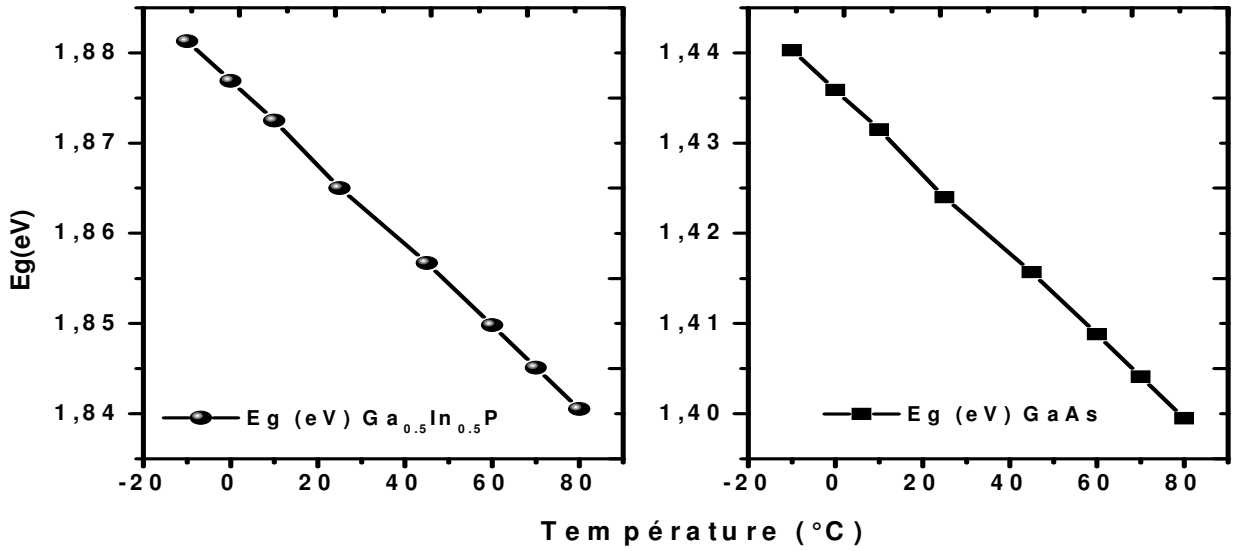
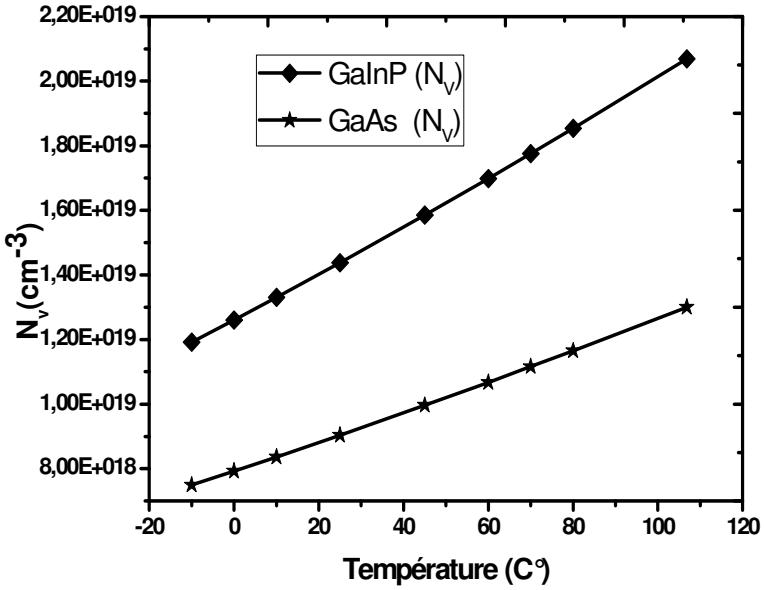


Figure 76 : Effet de la température sur la bande interdite des deux matériaux GaInP et GaAs.



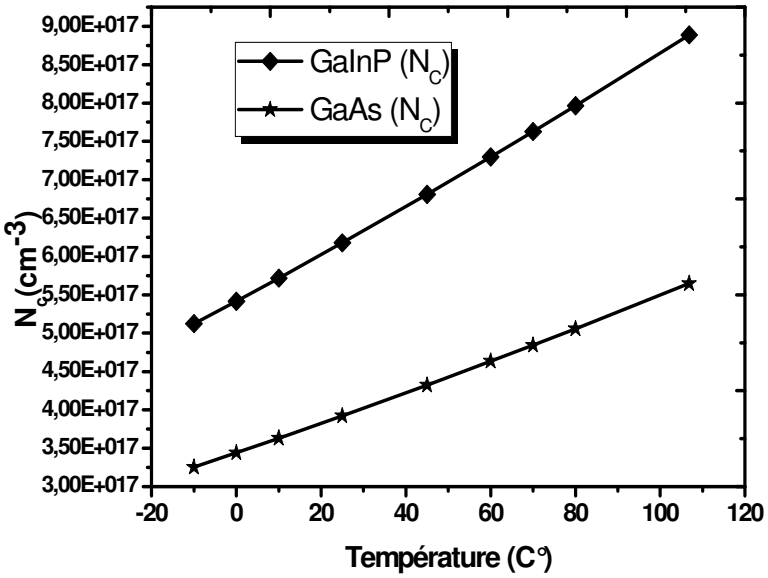


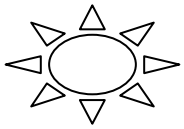
Figure 77 : Effet de la température sur la densité effective d'états des deux matériaux GaInP et GaAs.

V. 4. 2 Effet de la température sur la cellule solaire GaAs à couche fenêtre GaInP

La structure étudiée, est composée d'une fine couche émettrice GaAs avec les couches base et BSF de même type (GaAs), une fine couche fenêtre du matériau GaInP fortement dopé n+ y est appliquée (Fig. 78).

Avant de faire l'étude de la structure sous différentes valeurs de température, un calibrage de la structure GaAs est effectué avec une autre structure similaire présentée dans la Réf [68] sous les conditions standards (spectre solaire standard AM1.5G avec une température de fonctionnement 300K°).

Les résultats de simulation obtenus en comparaison avec la Réf [68] sont donnés dans le tableau 22.



GaInP	Fenêtre	0.1 µm	n+ = 2 × 10^{+18} cm^{-3}
GaAs	Emetteur	0.1 µm	n = 2 × 10^{+18} cm^{-3}
GaAs	Base	3 µm	P = 2 × 10^{+17} cm^{-3}
GaAs	BSF	0.1 µm	P+= 2 × 10^{+18} cm^{-3}
P+		SUBSTRAT	P+ <1 × 10^{+19} cm^{-3}

Figure 78 : Schéma de la cellule solaire GaAs avec la couche fenêtre GaInP.

Tableau 22 : Résultats de simulations de la cellule solaire GaAs en comparaison avec la référence [108].

Paramètres de la cellule	Résultat du REF [108]	Résultat de simulation SCAPS-1D
V_{co} (V)	1.050	1.0277
J_{cc} (mA/cm^2)	27.80	28.559
FF (%)	85.55	88.01
η (%)	25.0	25.76

Après le calibrage de la cellule étudiée, on fait varier la température de la cellule entre -10°C et 80°C, les résultats sont présentés au tableau 23.

Tableau 23 : Variation des paramètres de la cellule GaAs en fonction de la température.

Paramètre de la cellule	**-10°C**	**0°C**	**10°C**	**25°C**	**45°C**	**60°C**	**70°C**	**80°C**
V_{co} (V)	1.111	1.089	1.0667	1.0277	0.9855	0.95	0.926	0.903
J_{cc} (mA/cm^2)	28.073	28.213	28.347	28.559	28.77	28.933	29.036	29.135
FF (%)	89.6	89.19	88.76	88.01	87.14	86.39	85.85	85.28
η (%)	27.88	27.33	26.76	25.76	24.64	23.7	23.04	22.38

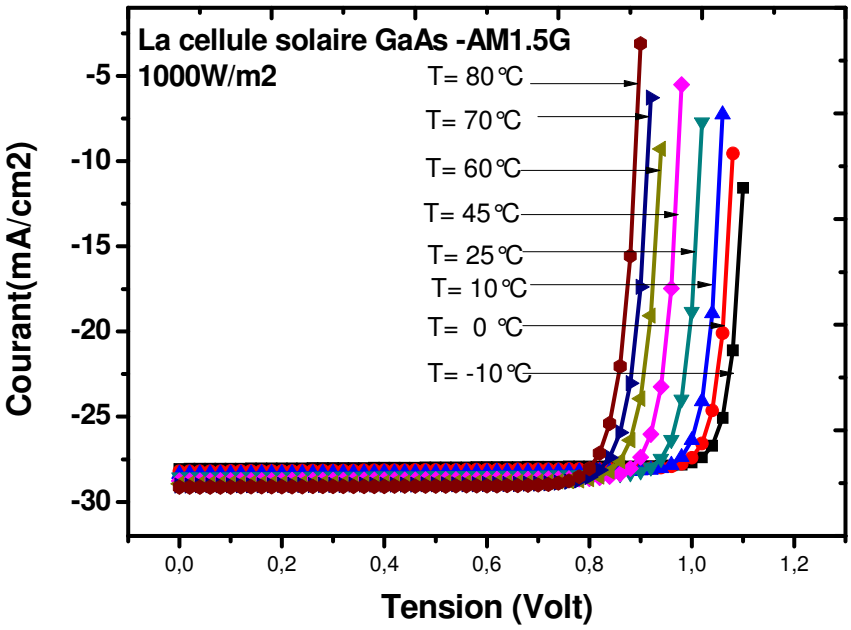


Figure 79 : Effet de la température sur la caractéristique J(V) de la cellule GaAs.

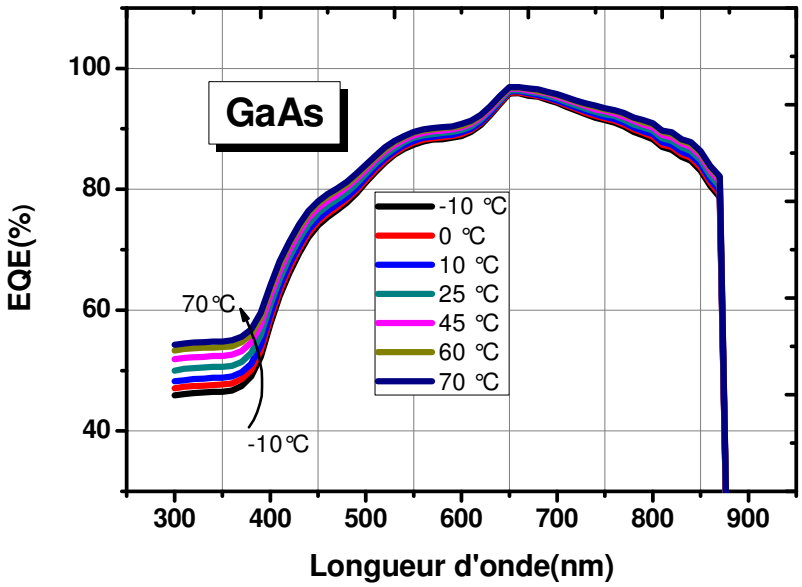


Figure 80 : Effet de la température sur le rendement quantique externe de la cellule GaAs.

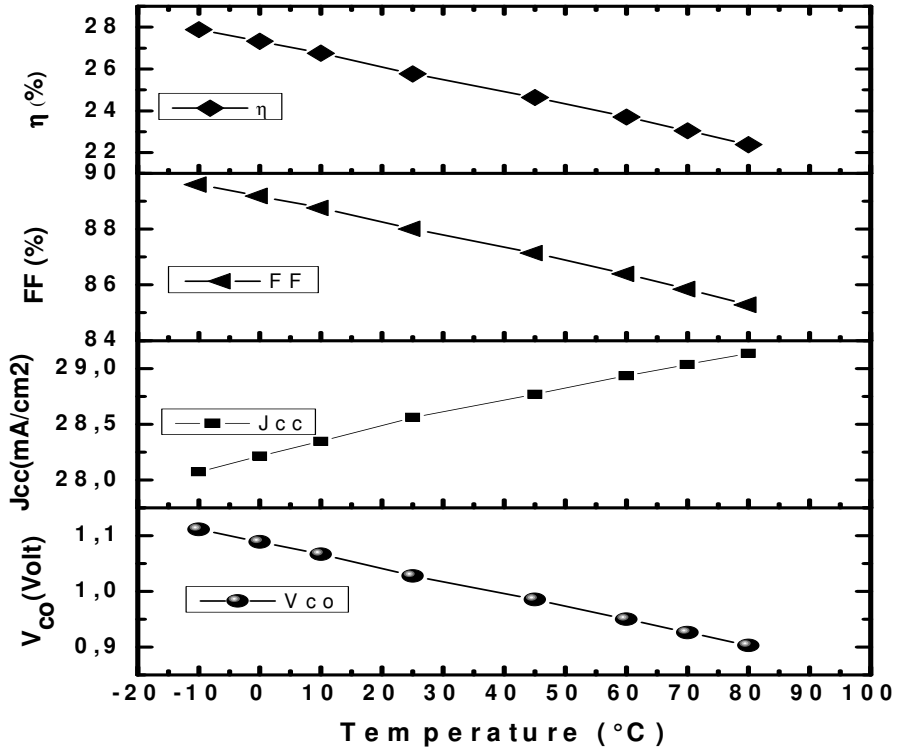
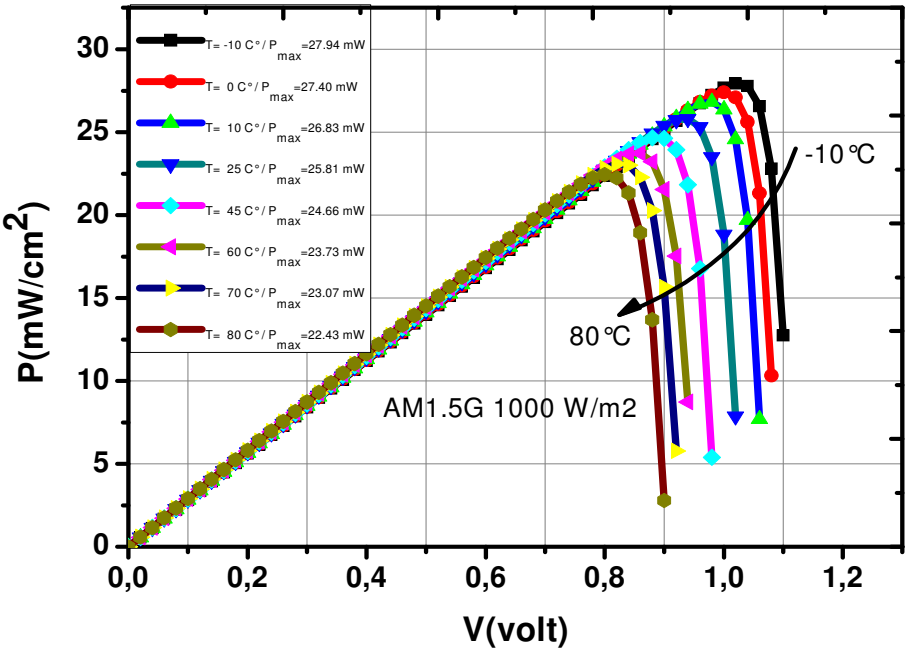
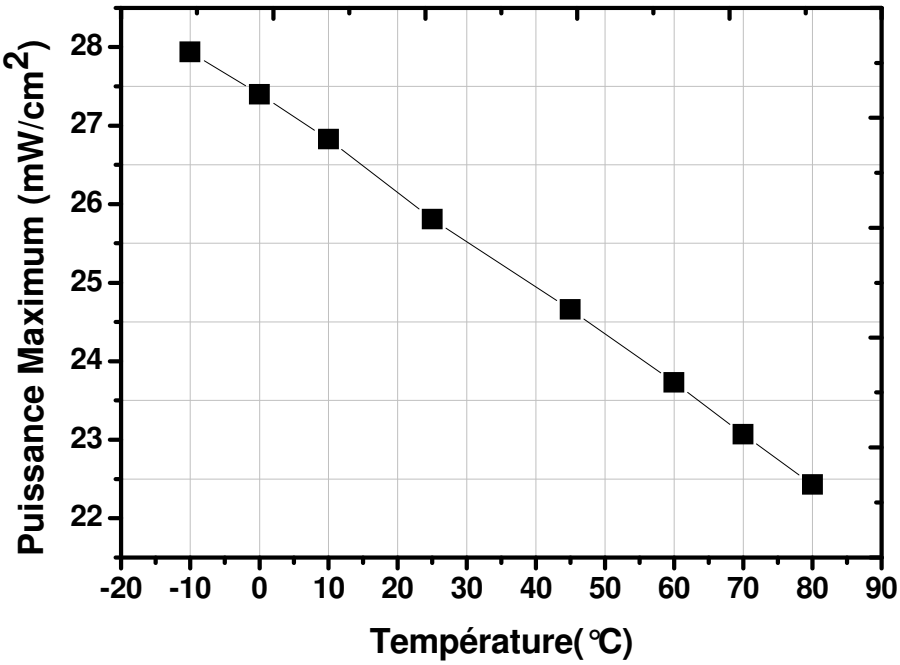


Figure 81: Effet de la température sur les paramètres de la cellule solaire GaAs.



(a)



(b)

Figure 82 : Effet de la température sur : a) La caractéristique P(V),
b) La puissance maximum de la cellule GaAs.

Sur les courbes caractéristiques J(V) de la cellule GaAs (Fig. 79), on remarque une légère augmentation dans le photocourant. Cela est dû, d'une part, à la diminution de la bande interdite Eg du semi-conducteur (Fig.76) et, d'une autre part à l'augmentation de conductivité du matériau à cause de la variation de la mobilité des paires électron-trou :

$$\rho = \sigma^{-1} = 1/q\left(\mu_n(T) + \mu_p(T)\right) n_i\,(T) \qquad (133)$$

Où ρ et σ sont la résistivité et la conductivité électrique du matériau [26, 110].

Ces deux phénomènes qui accompagnent l'augmentation de la température permettent d'exploiter plus de photons dans la conversion photovoltaïque (Fig. 80). L'augmentation du courant de court-circuit avec la température est d'ordre de 1×10^{-4} A/cm2/°C. Il en va de même pour le rendement quantique externe. La probabilité de collection des porteurs de charge augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température (Fig. 80). La plage d'absorption de la cellule s'élargit avec la diminution de la bande interdite du matériau GaAs. En revanche, le courant d'obscurité I_d augmente

très rapidement avec l'augmentation de la température, ce qui se traduit par une diminution de la tension en circuit ouvert, du facteur de forme et du rendement de conversion de la cellule (Fig. 81). La diminution est d'ordre de 2 mV/°C.

On note que la diminution de la tension en circuit ouvert est considérée comme importante en comparaison avec la diminution du courant de court-circuit. Elle se dégrade linéairement avec l'augmentation de la température, cela est prouvé par le modèle de Green [111].

$$\frac{\partial Voc}{\partial T} = -\frac{(\frac{\langle E_{g0} \rangle}{q} - Voc + \frac{KT}{q}\left\langle \gamma \frac{f \partial \zeta}{\zeta \partial f} \right\rangle}{T} \quad (134)$$

$$\zeta = npexp(^{-E_g}/_{KT})/n_{ie}^2 \quad (135)$$

Où f: est une fonction générale utilisée dans le document de Green [19].

V. 4. 3 Effet de la température sur la cellule solaire tandem optimisée

Nous étudions, dans cette partie, l'effet de la température sur la cellule tandem GaInP/GaAs et ses deux composantes : la cellule supérieure (Top cell) et la cellule inferieure (Bottom cell). Nous utilisons les mêmes paramètres technologiques de la cellule solaire optimisée de la section précédente.

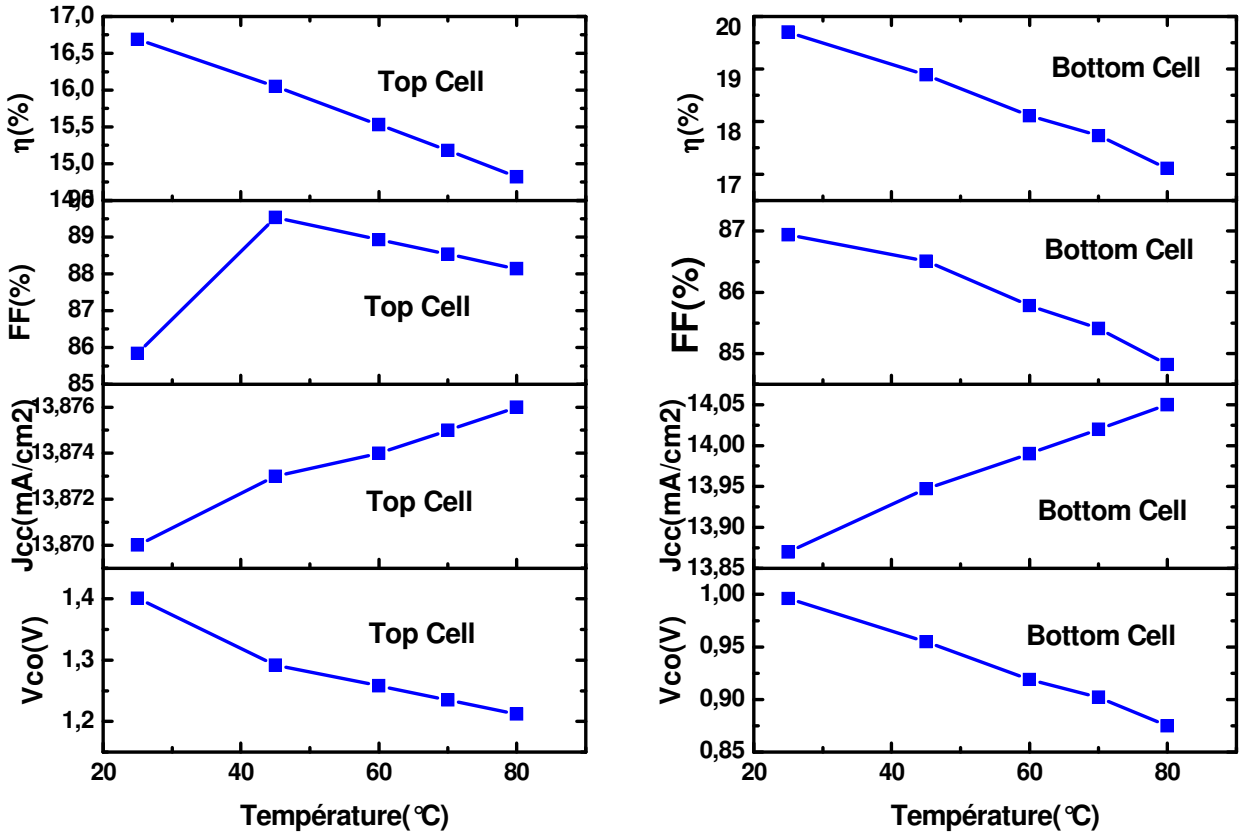


Figure 83 : Effet de la température sur la cellule supérieure et la cellule inférieure de la cellule Tandem GaInP/GaAs.

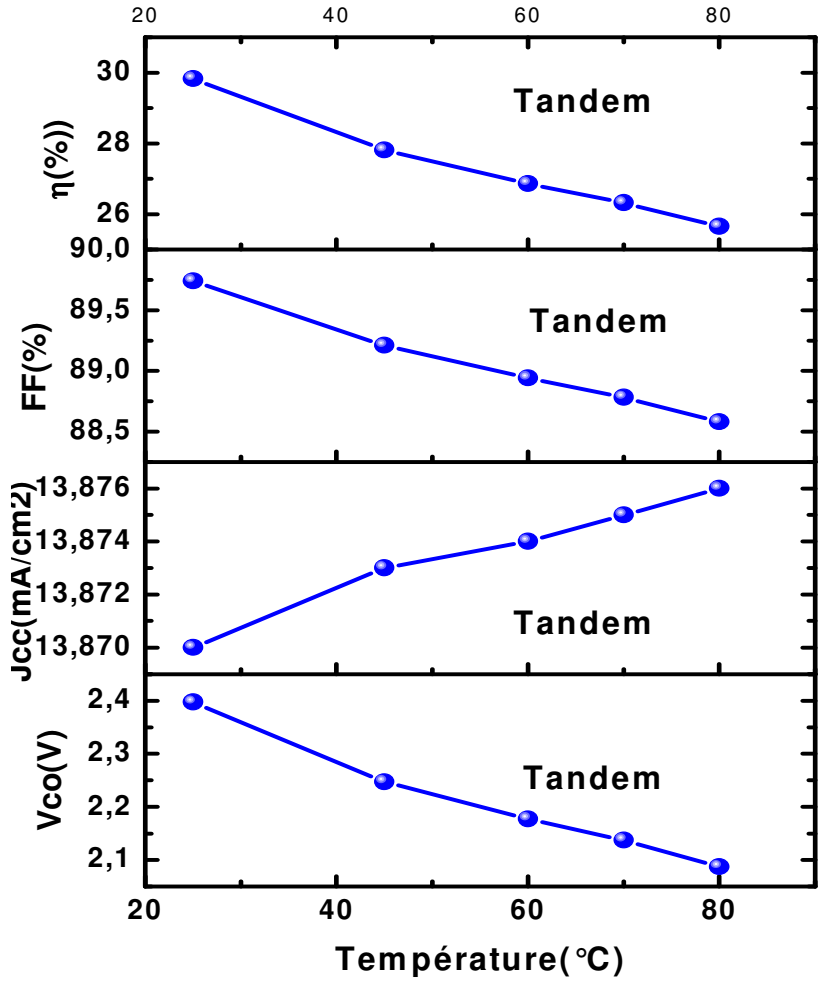


Figure 84 : Effet de la température sur la cellule tandem GaInP/GaAs.

Dans la figure 83, on remarque une légère augmentation du photocourant des deux cellules solaires supérieure et inférieure. La variation est remarquable dans la cellule inferieure du fait que la cellule supérieure joue le rôle d'un filtre pour la cellule inférieure.

La tension en circuit ouvert se dégrade linéairement avec l'augmentation de la température, cette dégradation vient de l'augmentation du courant d'obscurité de la cellule. Ceci est vrai pour la cellule supérieure, inférieure et tandem monolithique (Fig. 84). Le coefficient de variation de cette tension, en fonction de la température pour la cellule tandem, est de l'ordre de $\Delta V / \Delta T$ (tandem) = -4 mV/°C. Cette quantité est indépendante et additive, elle représente la somme des variations des

deux cellules supérieure GaInP (- 2 mV/°C) et inférieure GaAs (- 2 mV/°C). Ce résultat est confirmé par la Réf [36].

Le facteur de forme FF est une fonction de la tension en circuit ouvert (équation 2), il décroit avec l'augmentation de la température. La diminution du V_{oc} contribue, dans la plupart des cas, à la diminution du rendement de conversion de la cellule. Cette diminution est de l'ordre de -0.038, -0.035 et -0.054 % / °C sur les cellules inférieure, supérieure et la cellule tandem respectivement.

V. 5 Etude de l'effet de la luminescence down-shifting sur les cellules solaires

V. 5. 1 Introduction

La Luminescence Down Shifting (LDS) est une approche élégante pour l'amélioration des performances des cellules solaires. Dans cette approche, on remplace le matériau encapsulant « le verre » par une fine couche en polymère Polymethyl Methacrylate « PMMA » dopée avec des dopants organiques optiquement actifs. Ces derniers permettent d'absorber les photons de forte énergie situés dans la zone bleu et ultra-violet (UV) où le rendement quantique (QE) de la cellule solaire est faible et émettent dans la zone infrarouge est visible où le QE de la cellule est fort, ce qui permet de minimiser les pertes optiques et d'améliorer les performances de la cellule solaire. L'amélioration introduite par cet effet sera étudiée dans différentes structures solaires Tandem et simple.

V. 5. 2 Etude l'effet de la luminescence down-shifting sur la cellule solaire GaAs avec différentes couches fenêtres

Il s'agit d'étudier l'effet de la couche LDS sur la cellule solaire n-i-p GaAs, formée des différentes couches fenêtres AlGaAs, GaInP et AlInP. Dans la figure 85, nous représentons le rendement quantique externe (QE) de la cellule n-i-p GaAs, avec ses différentes couches fenêtres.

La cellule solaire étudiée, n-i-p-GaAs, avec ses paramètres technologiques est représentée dans la figure 86. La modélisation des paramètres électriques de la cellule se fait sous les conditions standards (AM1.5G, 300K). On considère, durant la simulation, que la résistance série est nulle et la résistance shunt est infiniment grande. Les vitesses de recombinaison en surface avant (S_F) et en surface arrière (S_B) valent respectivement 1×10^6cm/s et 1×10^4cm/s.

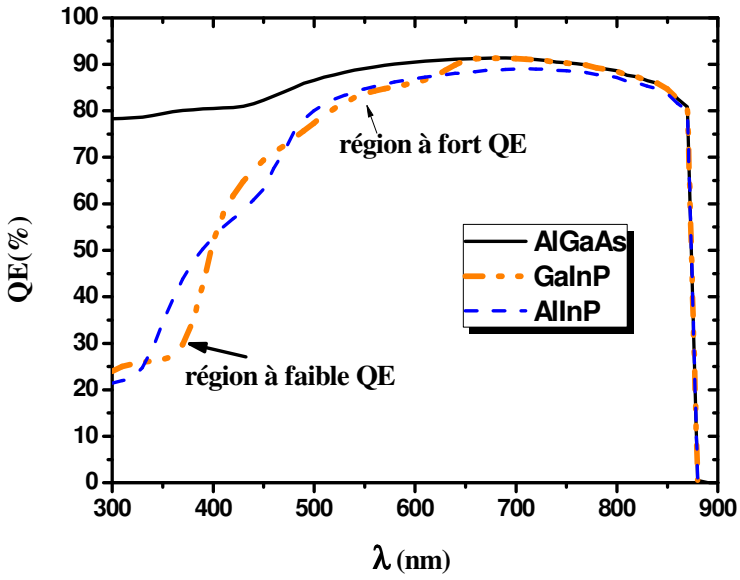


Figure 85 : Rendement Quantique de la cellule solaire n-i-p GaAs avec les différentes couches fenêtres.

Lumière incidente

La couche LDS 3mm			
ARC (MgF2/ZnS)			
Fenêtre		**0.02µm**	**n=1E18 cm-3**
GaAs	**Emetteur**	**0.2µm**	**n=5E18 cm-3**
GaAs	**I**	**0.1µm**	**i=1E15 cm-3**
GaAs	**Base**	**2µm**	**p=3E17 cm-3**
GaAs	**BSF**	**0.2 µm**	**P=3E18 cm-3**
P+ GaAs Substrat			

Figure 86 : Structure de la cellule solaire n-i-p GaAs avec la couche LDS.

V. 5. 2. 1 Cascade lumineuse

Afin d'avoir une bonne adaptation entre la réponse spectrale de la cellule solaire GaAs et la couche PMMA dopée avec des dopants organiques BASF Lumogen Violet 570(V570), Yellow 083(Y083) et Orange (O240) [89], tout en assurant une meilleure exploitation du spectre solaire, une cascade lumineuse est formée avec un mélange de dopants organiques (dyes) dans une fine couche du PMMA. Différents dopants sont mixés en même temps dans la même couche PMMA de façon à ce que la gamme d'émission du premier dopant tombe dans la gamme d'absorption du second. Le premier dopant, le Violet 570 absorbe les photons situés dans la région UV du spectre solaire. Il émet les photons absorbés dans la gamme d'absorption du deuxième dopant le Yellow 083. Ce dernier émet dans la zone d'absorption de l'Orange 240. Un exemple de cette approche est illustré dans la figure 87 pour les deux dopants Violet 570 et Yellow 083 [112].

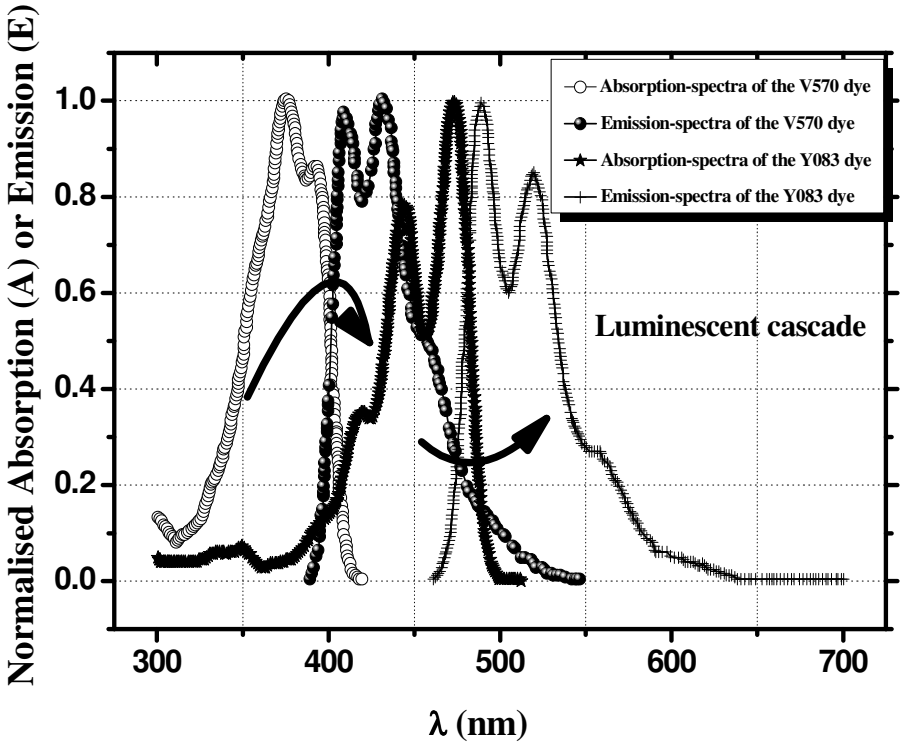


Figure 87 : Principe de la cascade lumineuse PMMA dopé avec le Violet 570 et le Yellow 083.

V. 5. 2. 2 Méthode de simulation

Le spectre solaire standard AM1.5G (ASTM G173-03) est un spectre riche en photons, allant de l'ultraviolet au visible et infrarouge. Généralement, les cellules solaires utilisent des photons de longueurs d'onde comprises entre 300 nm et 1100 nm. Quand une couche LDS est introduite au-dessus de la cellule solaire, le spectre solaire incident φs (λ) est affecté et modifié par l'absorption et l'émission des photons dans la couche LDS. Le spectre solaire résultant φsae (λ) est calculé à partir de la quantité de photons absorbés et émis. En outre, 75% des photons émis sont dirigés vers la cellule solaire sous-jacente. En raison de la réflexion interne à l'intérieur de la couche LDS [113].

Nous avons constaté ici que, si un événement de réabsorption se produit, en raison du recouvrement partiel des bandes d'absorption et d'émission des dopants, nous allons avoir à la fois une probabilité que les photons soient perdus (car le rendement quantique des dopants < 1) et une probabilité qu'ils soient émis sur l'un des cônes d'échappement de la couche LDS.

La probabilité qu'un photon reste piégé après un événement (R) de réabsorption est $(P_{TIR})^{R}$, où P_{TIR} est la probabilité de réflexion interne totale ($P_{TIR} = \frac{\sqrt{n^2-1}}{n}$, n représente l'indice de réfraction du matériau). Pour un matériau à indice de réfraction n = 1.5, comme dans le PMMA, P_{TIR} = 75%. La combinaison des pertes par réabsorption et par échappement peut conduire à une réduction importante du nombre de photons piégés à l'intérieur du PMMA dopé [114].

La quantité des photons absorbés dans la région de courte longueur d'onde est calculée à partir du spectre d'absorption des dopants. Cette quantité dépend de la taille et de la concentration des dopants dans la couche de LDS. La densité du flux de photons décroît exponentiellement après avoir franchi une distance x dans la couche PMMA, φ(x,λ)= φ0(λ) exp (-α (λ)*x), où α (λ) est le coefficient d'absorption de la couche de LDS (cm^{-1}). Le terme exponentiel est donné par α (λ) * x = ελ * C * D, où ελ est le coefficient d'extinction molaire (mol^{-1} cm^{-1}), C est la concentration (M) et D est l'épaisseur de la couche PMMA (cm).

En outre, la quantité de photons émis dans la région visible et infrarouge φ_e (λ) est calculée à partir du spectre d'émission des dopants, le spectre résultant φ_{sae} (λ) sert comme un spectre d'entrée pour le simulateur solaire SCAPS-1D [114, 115]. Ce dernier permet de calcul des paramètres de la cellule étudiée à savoir, Jsc, Voc, FF et le rendement de conversion (η).

$$\varphi_{sae}(\lambda) = \varphi_s(\lambda) - \varphi_a(\lambda) + \varphi_e(\lambda) \quad (136)$$

Où $\varphi_s(\lambda)$ est le spectre solaire incident, $\varphi_a(\lambda)$ la quantité des photons absorbés par les dopants introduits dans la couche de PMMA et $\varphi_e(\lambda)$ la quantité des photons émis par les dopants introduits dans la couche de PMMA.

Afin d'étudier l'effet de chaque dopant sur la cellule solaire, une cascade luminescente d'absorption et de réémission des dopants est formée par la combinaison de plusieurs dopants à l'intérieur d'une fine couche de PMMA, puis on observe les améliorations apportées par l'examen des différentes situations, l'épaisseur du PMMA utilisé pour les trois échantillons est de 3 mm.

Tableau 24: Les différents types des cascades lumineuses formées par la couche LDS [116]

Échantillon	caractéristiques	Plage d'absorption du mélange (nm)	Plage d'émission du mélange (nm)
S1	PMMA dopé avec le dopant Violet 570	300-410	395-500
S2	S1+ le dopant Yellow 083	300-490	470-585
S3	S2+ le dopant Orange240	300-530	510-625

V. 5. 2. 3 Résultats et discussions

L'effet des différentes cascades lumineuses utilisées sur le spectre solaire incident AM1.5G est représenté dans la figure 88. Les trois cascades lumineuses (S1, S2 et S3) formées avec les dopants organiques (Violet 570, Yellow 083 et Orange240) introduisent une modification substantielle sur le spectre solaire AM1.5G, les photons situés dans la zone de l'ultraviolet sont transférés vers la région visible et infrarouge du spectre solaire. Les résultats du spectre modifié sont utilisés comme spectre d'entrée pour la simulation SCAPS-1D.

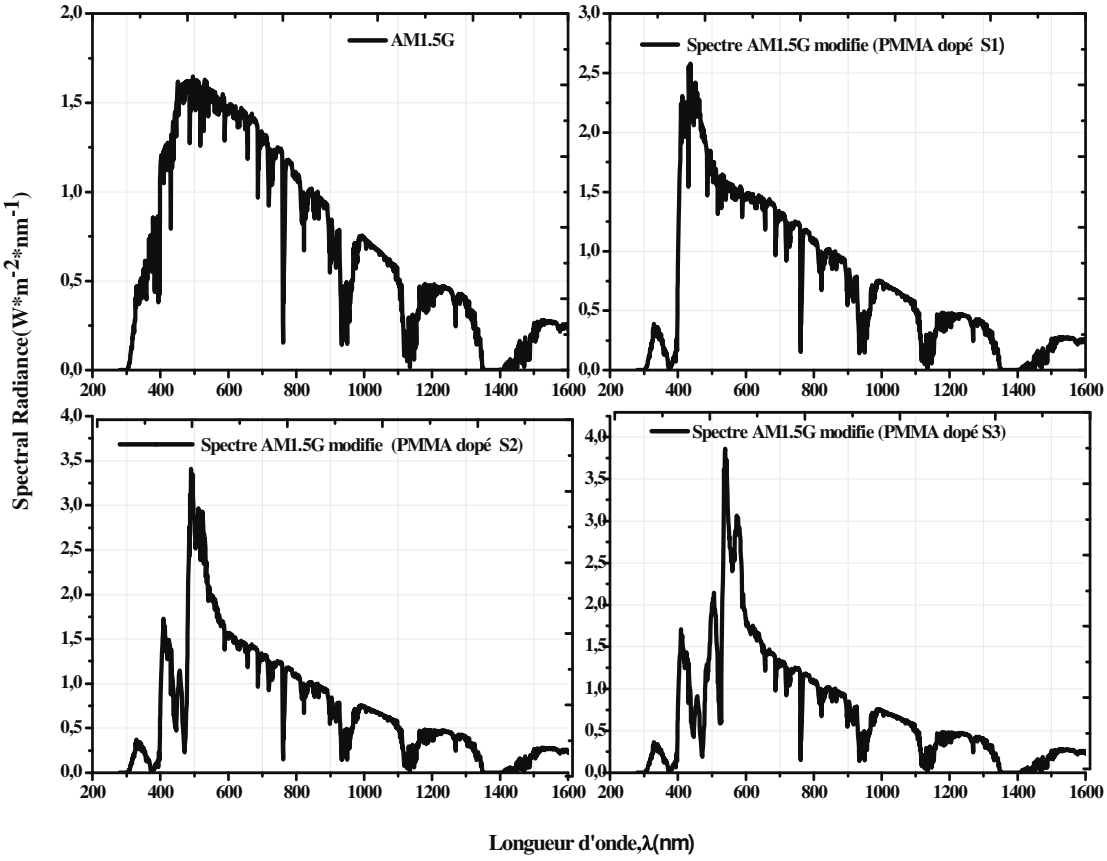


Figure 87 : Effet des différents types de cascades lumineuses (S1, S2 et S3) sur le spectre solaire standard AM1.5G.

L'étude de la cellule $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$-GaAs avec les trois échantillons (S1, S2 et S3) de cascades lumineuses se fait après le calibrage de la structure solaire $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$-GaAs avec les cellules solaires référencées dans les papiers [117,118].

Les résultats de simulation de la cellule solaire $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$-GaAs avec les trois échantillons de cascades lumineuses sont présentés dans le tableau 25.

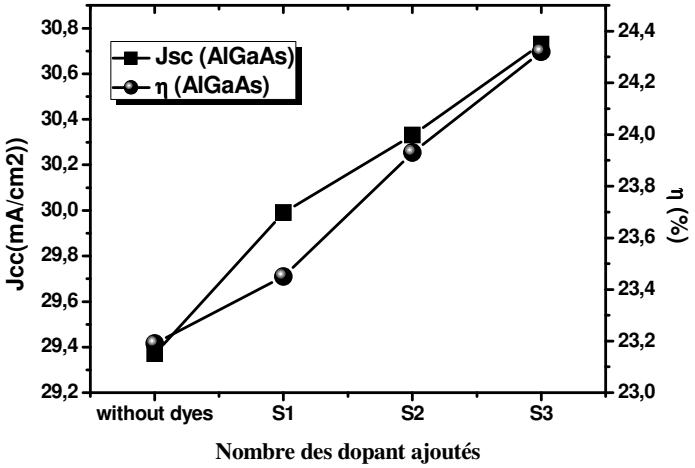
Tableau 25 : Résultats de simulation de la cellule solaire $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$-GaAs avec les différents échantillons de cascades lumineuses.

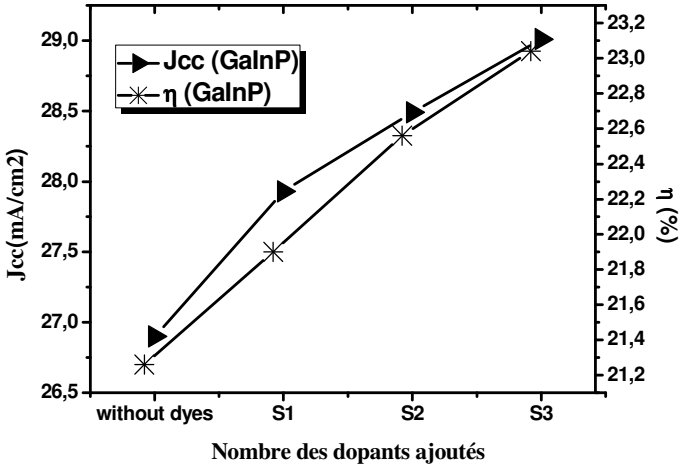
Paramètre électrique calculé	Ref [117] valeur mesurée	Ref [118]	nip-GaAs sans couche PMMA	nip-GaAs avec PMMA dopé S1	nip-GaAs avec PMMA dopé S2	nip-GaAs avec PMMA dopé S3
V_{co}(V)	1.038	0.98	0.963	0.964	0.964	0.965
J_{cc}(mA / cm2)	27.1	29.22	29.37	29.99	30.33	30.73
FF (%)	82.9	82.7	82.15	82.16	82.17	82.18
η(%)	23.3	23.67	23.19	23.45	23.93	24.32
G J_{cc} (%)	/	/	/	**2.11**	**3.26**	**4.63**
G η (%)	/	/	/	**1.12**	**3.19**	**5.79**

A partir des résultats obtenus dans le tableau 3, on remarque que la tension en circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) ne changent pas considérablement avec les différents types de dopants ajoutés, cela est dû au fait qu'il n'y a aucun changement ni dans les propriétés électroniques ni dans la résistance du matériau semi-conducteur utilisé. En revanche, on remarque que le rendement de conversion η s'améliore avec le nombre et le type des dopants ajoutés dans le PMMA. C'est un résultat direct de l'augmentation dans la densité du courant de court-circuit.

La couche LDS implique une séquence d'absorption et d'émission sur les photons, le pic d'absorption du Violet 570 est situé dans la région à faible rendement quantique de la cellule GaAs. Cependant, il émet les photons absorbés dans la gamme d'absorption du dopant Jaune 083 qui lui, émet les photons absorbés dans la gamme de l'absorption de l'Orange 240. Ce dernier dopant absorbe et émet les photons dans la région où le QE de la cellule est élevé, ce qui assure une meilleure exploitation du spectre solaire par la cellule. Les meilleurs résultats sont obtenus avec l'échantillon (S3) formé des trois dopants organiques (Violet 570, Yellow 083 et Orange240).

Les figures 88 et 89 présentent les résultats de simulation de la cellule GaAs formée avec les couches fenêtres (AlGaAs, GaInP et AlInP), en fonction de différentes cascades lumineuses.


Jsc (AlGaAs)
η (AlGaAs)
Jcc(mA/cm2))
η (%)
30,8
30,6
30,4
30,2
30,0
29,8
29,6
29,4
29,2
24,4
24,2
24,0
23,8
23,6
23,4
23,2
23,0
without dyes
S1
S2
S3
Nombre des dopant ajoutés


Jcc (GaInP)
η (GaInP)
Jcc(mA/cm2)
η (%)
29,0
28,5
28,0
27,5
27,0
26,5
23,2
23,0
22,8
22,6
22,4
22,2
22,0
21,8
21,6
21,4
21,2
without dyes
S1
S2
S3
Nombre des dopants ajoutés

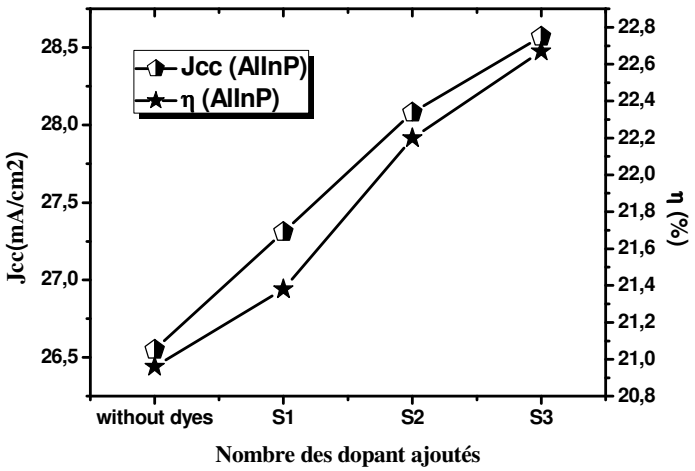
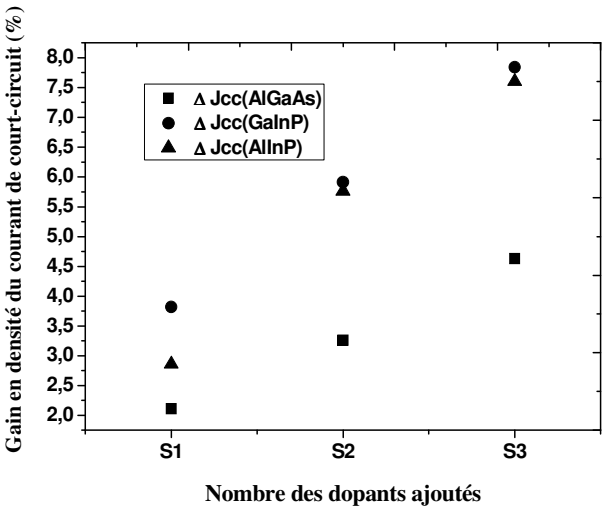

Jcc (AlInP)
η (AlInP)
Jcc(mA/cm2)
η (%)
28,5
28,0
27,5
27,0
26,5
22,8
22,6
22,4
22,2
22,0
21,8
21,6
21,4
21,2
21,0
20,8
without dyes
S1
S2
S3
Nombre des dopant ajoutés

Figure 88 : Effet des cascades lumineuses (S1, S2 et S3) sur la densité du courant de court-circuit et le rendement de conversion de la cellule GaAs, formée avec différentes couches fenêtres.



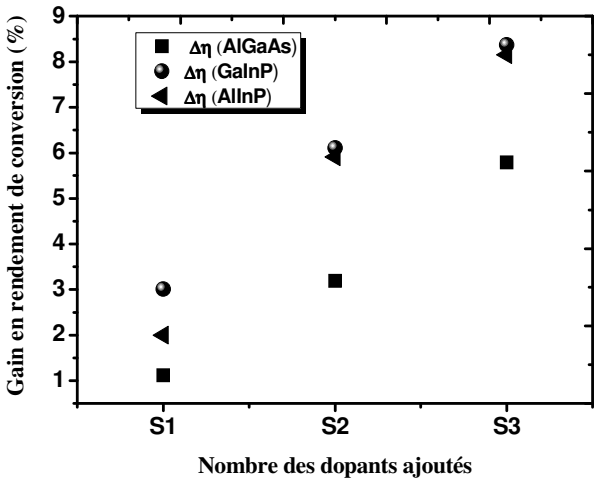


Figure 89 : Effet des cascades lumineuses (S1, S2 et S3) sur le gain en densité du courant de court-circuit et le rendement de conversion de la cellule GaAs avec différentes couches fenêtres.

Les figures 88 et 89 montrent une amélioration considérable dans la densité du courant de court-circuit et dans le rendement de conversion avec les couches fenêtres GaInP et AlInP par rapport à la couche fenêtre AlGaAs. Cela est dû au faible rendement quantique (QE) de la cellule GaAs formée avec les deux couches fenêtres GaInP et AlInP, en comparaison avec la couche

AlGaAs dans la région UV (Fig. 85). Ceci permet une meilleure conversion des photons par la couche fenêtre LDS.

De cette étude, nous concluons que la cellule solaire GaAs, avec la couche fenêtre qui présente un mauvais QE dans la région UV, bénéficie plus de la conversion des photons.

Les résultats de simulation de la cellule solaire GaAs formée avec les trois couches fenêtres et avec la cascade lumineuse S3 sont résumés dans le tableau 26. Nous constatons une augmentation importante de la densité de courant de court-circuit et du rendement de conversion de la cellule GaAs.

Tableau 26 : Résultat de simulation de la structure GaAs avec et sans couche LDS pour les différentes couches fenêtres

Couche fenêtre	J_{cc} (cellule sans couche LDS) (mA/cm2)	J_{cc} (cellule & LDS-S3) (mA/cm2)	ΔJ_{cc} (%)	η (cellule sans couche LDS) (%)	η (cellule & LDS- S3) (%)	$\Delta \eta$ (%)
$Ga_{0.5}In_{0.5}P$	26.90	29.01	+ 7.84	21.26	23.04	+ 8.37
$Al_{0.52}In_{0.48}P$	26.55	28.57	+ 7.60	20.96	22.67	+ 8.15
$Al_{0.8}Ga_{0.2}As$	29.37	30.73	+ 4.63	23.19	24.32	+ 5.79

V. 5. 3 Effet du Luminescent Down-shifting sur la cellule solaire tandem

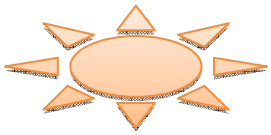
La densité du courant de court-circuit d'une cellule solaire tandem monolithique est limitée par la cellule solaire qui débite le moins de courant [36, 119]. Généralement, on ajuste sur l'épaisseur de la base de la cellule supérieure afin d'assurer le critère d'égalité du courant entre la cellule supérieure et la cellule inférieure, car la cellule supérieure présente la plus faible valeur de la densité de courant de court-circuit par rapport à la cellule inférieure (Faine et al [119]). Cependant, l'augmentation de l'épaisseur de la base de la cellule supérieure conduit à une augmentation dans les pertes d'absorption de la cellule tandem (diminution dans le rendement), le spectre solaire dans la cellule tandem est atténué de façon exponentielle par rapport à l'augmentation de l'épaisseur de la base.

Dans cette partie, nous présentons une technique basée sur l'approche (LDS). Cette dernière permet d'introduire quelques modifications dans la conception des cellules solaires tandem GaInP/GaAs étudiées par T. Takamoto et al [107]. Cela permet d'améliorer la densité de courant de

court-circuit dans la cellule supérieure, tout en gardant le rendement de la cellule solaire tandem élevé. Deux structures solaires seront étudiées, la structure N/P/P+ GaInP qui représente la cellule supérieure du tandem GaInP/GaAs et la cellule Tandem elle-même. Avec la première structure on étudie l'effet des différents dopants sur les performances de la cellule GaInP. Cette partie nous permet de connaitre l'amélioration introduite par chaque dopant sur la cellule GaInP. Dans la deuxième étape, nous démontrons comment réaliser la condition d'égalité du courant entre les cellules supérieure et inférieure de la cellule tandem, tout en assurant une amélioration de ses caractéristiques.

V. 5. 3 Structure solaire GaInP

Le GaInP est le matériau de base constituant la cellule supérieure (Top cell). Cette dernière est formée par les couches : émetteur, base, BSF et une couche fenêtre mince et fortement dopée à base du semi-conducteur AlInP (Fig. 90).



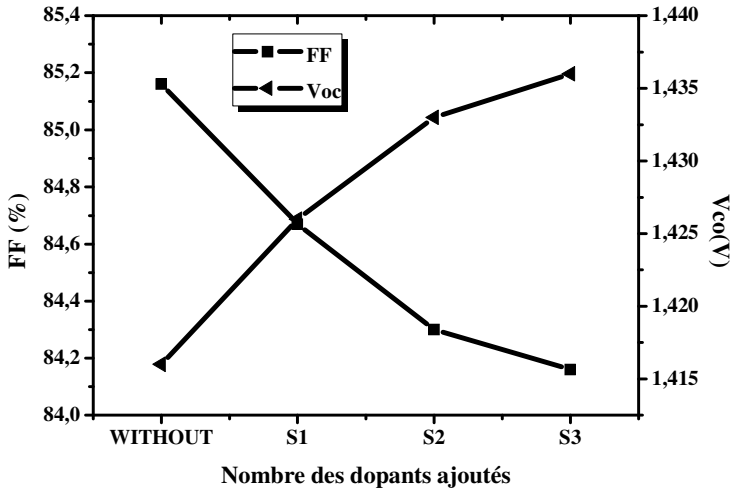
	PMMA dopé 3 mm			
	ARC (MgF_2/ZnS)			
Cellule supérieure	AlInP	fenêtre	0.03µm	n < 2E+18 cm^{-3}
	GaInP	Emetteur	0.05µm	n= 3E+18 cm^{-3}
	GaInP	Base	Epaisseur réglable	p= 1.5E+17 cm^{-3}
	GaInP	BSF	0.5µm	p+=2E+18 cm^{-3}
	P+/N+ Jonction Tunnel			
Cellule inférieure	GaInP	fenêtre	0.1 µm	n= 2E+18 cm^{-3}
	GaAs	Emetteur	0.1µm	n= 2E+18 cm^{-3}
	GaAs	Base	3 µm	P= 2E+17 cm^{-3}
	GaInP	BSF	0.1 µm	P+= 2E+18 cm^{-3}
	P+	Substrat		P+ <1E+19 cm^{-3}

Figure 90 : Schéma de la cellule monolithique Tandem GaInP / GaAs avec la couche LDS et ses paramètres technologiques.

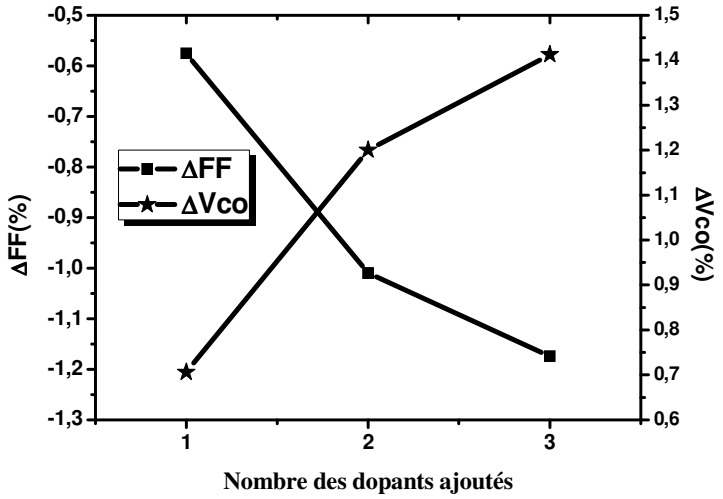
V. 5. 3. 1 Résultats et discussions

Nous examinons, ici, l'effet des différents dopants organiques sur les performances de la cellule supérieur GaInP avant d'être appliqués à toute la structure tandem. On commence la simulation de la cellule par le calibrage de la cellule solaire étudié (GaInP) sans couche LDS. Les résultats de simulation obtenus sont en accord avec ceux de la littérature [107].

Après l'introduction de la couche LDS surface avant de la cellule solaire, les colorants organiques produisent une modification importante sur le spectre solaire incident AM1.5G. Ils obligent les photons dans la région de l'ultraviolet à se déplacer vers la région visible. La simulation est effectuée avec les différents types de cascades lumineuses formées à base de colorants organiques.

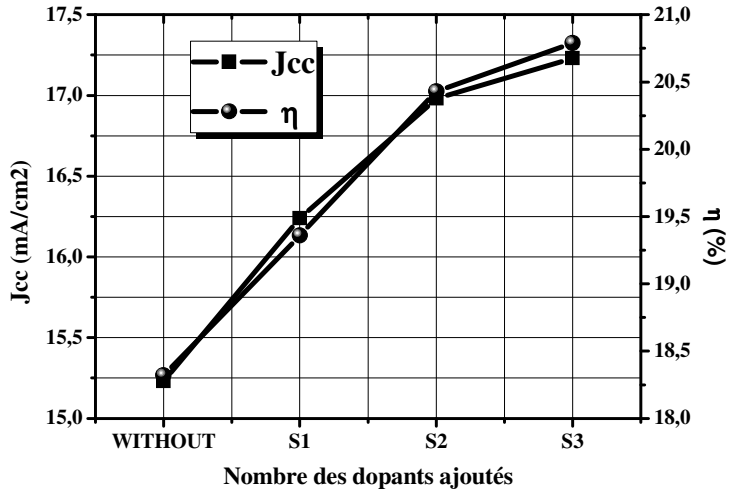


(a)

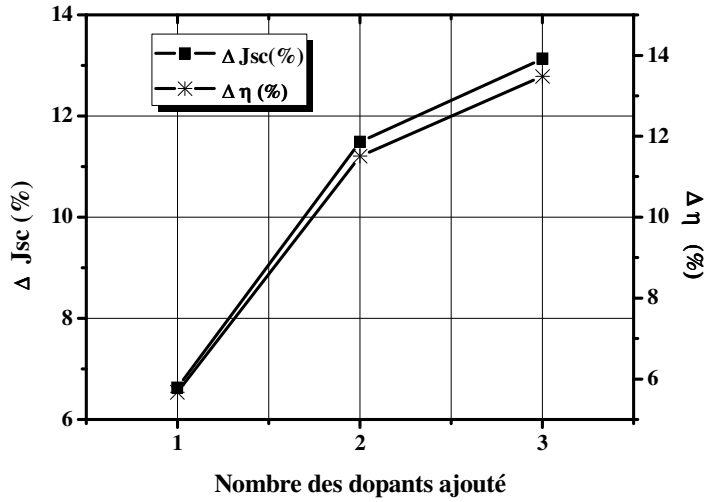


(b)

Figure 91: Effet des cascades lumineuses (S1, S2 et S3) sur le facteur de forme et la tension en circuit ouvert (a) et sur le gain dans le facteur de forme et la tension en circuit ouvert (b).



(a)



(b)

Figure 92: Effet des cascades lumineuses (S1, S2 et S3) sur la densité de courant de court-circuit et le rendement de conversion (a) et sur le gain dans la densité de courant de court-circuit et le rendement de conversion (b).

Les améliorations apportées par la couche LDS sur la cellule solaire GaInP, en fonction des nombres des colorants ajoutés montre que, les meilleurs résultats sont obtenus avec les deux échantillons de cascades lumineuses S1, S2 (violet, violet + jaune) avec un gain dans la densité du courant court-circuit de 6,63%, 4,86% respectivement. Alors que l'addition du troisième colorant ne contribue que de 1,64% dans l'augmentation totale du gain de la densité du courant de court-circuit (Figs. 91 et 92). Cela est dû au fait que le QE de GaInP est faible dans la région d'absorption et d'émission des deux échantillons S1 et S2. Plus on ajoute des dopants, plus on rapproche le spectre solaire transféré de la zone sensible d'absorption de la cellule solaire (Fig. 93). En outre, lorsqu'on ajoute le troisième colorant (orange 240) à S2, il induit une réémission des photons dans la région à fort QE de la cellule (QE-dessus de 80%). Donc le troisième colorant contribue faiblement à l'amélioration des performances de la cellule solaire GaInP.

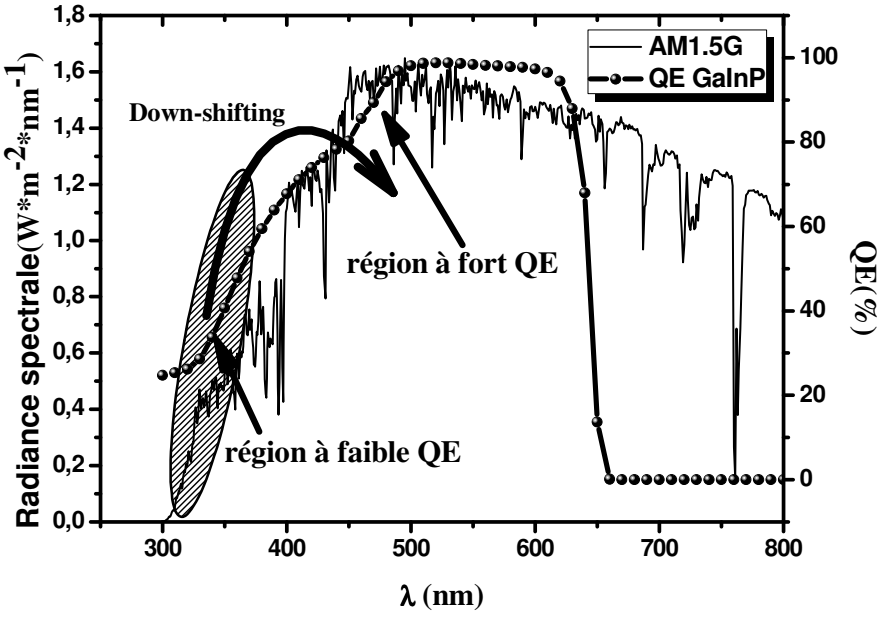


Figure 93 : Spectre solaire AM1.5G avec le rendement quantique externe de la cellule solaire GaInP et le principe du Downshifting.

La caractéristique J(V) de la cellule GaInP avec et sans couche LDS (dopé avec la cascade S3) est représentée sur la figure 94. Les gains en densité du courant court-circuit et en rendement de conversion sont présentés dans le tableau 27.

Tableau 27 : La densité du courant de court-circuit et le rendement de conversion de la cellule solaire GaInP avec et sans couche LDS

Jcc (mA/cm2) cellule GaInP sans couche PMMA	Jcc (mA/cm2) cellule GaInP avec couche PMMA (dopé S3)	η (%) cellule GaInP sans couche PMMA	η (%) cellule GaInP avec couche PMMA (dopé S3)	gain en Jcc (%)	gain en η (%)
15.23	17.23	18.32	20.79	13.13	13.48

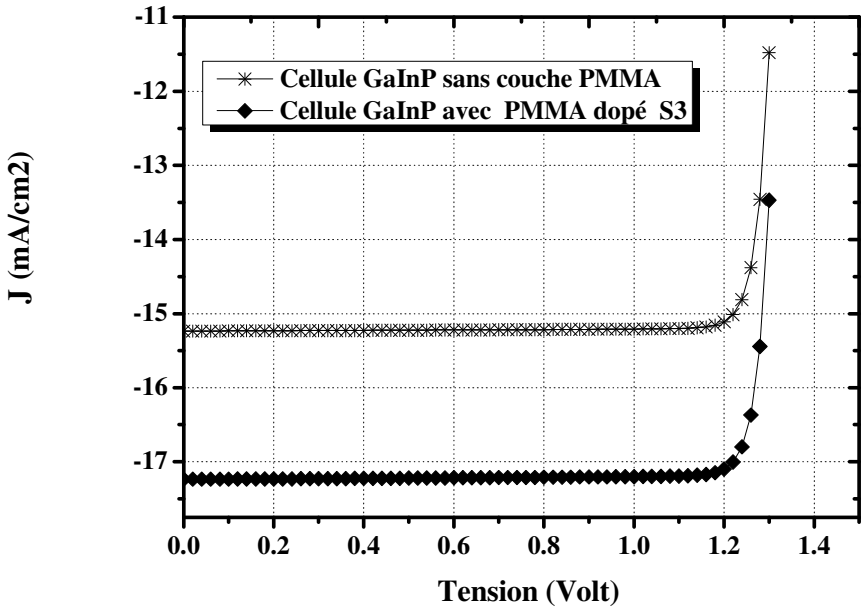


Figure 94 : Caractéristiques J(V) de la cellule solaire GaInP avec et sans la couche LDS dopée S3.

V. 5. 4 Tandem GaInP/GaAs avec couche LDS

Après l'étude de l'effet de la couche LDS sur la cellule supérieure GaInP, nous abordons l'étude de cet effet sur toute la cellule monolithique GaInP/GaAs. Les dopants utilisés dans cette partie sont (BASF Lumogen Violet 570(V570), Yellow 083(Y083), Orange 240(O240) and Red300 (R300)), les cascades lumineuses formées avec la couche PMMA sont présentées dans le tableau 28.

Tableau 28 : Mélange des quatre échantillons PMMA dopés avec différents dopants organiques [116].

Echantillons	**caractéristiques**	**Plage d'absorption du mélange (nm)**	**Plage d'émission du mélange (nm)**
S1	PMMA dopé avec le dopant Violet 570	300-410	395-500
S2	S1+ Le dopant Yellow 083	300-490	470-585
S3	S2+ Le dopant Orange240	300-530	510-625
S4	S3+ Le dopant Red 300 dye	300-600	565-707

V. 5. 4. 1 Résultats et discussions

Ces résultats concernent la cellule tandem GaInP/GaAs optimisée précédemment avec une épaisseur de base de la cellule supérieure $X_{B\text{-}GaInP}$ de 0.7µm. On insère les différents échantillons des cascades lumineuses figurant dans le tableau 1 sur la face avant du tandem GaInP/GaAs. Les résultats de simulation de la cellule tandem avec les différents échantillons sont présentés dans les figures 96, 97, 98 et 99.

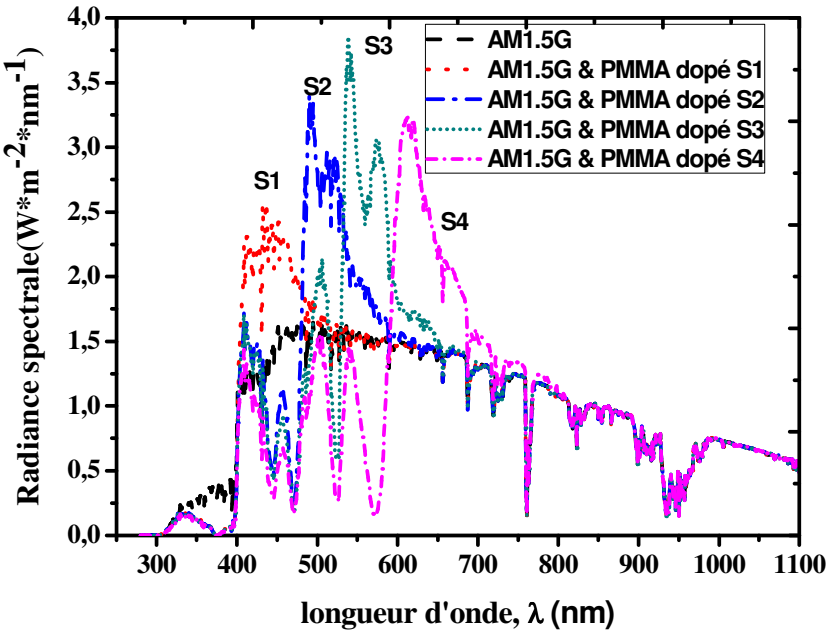
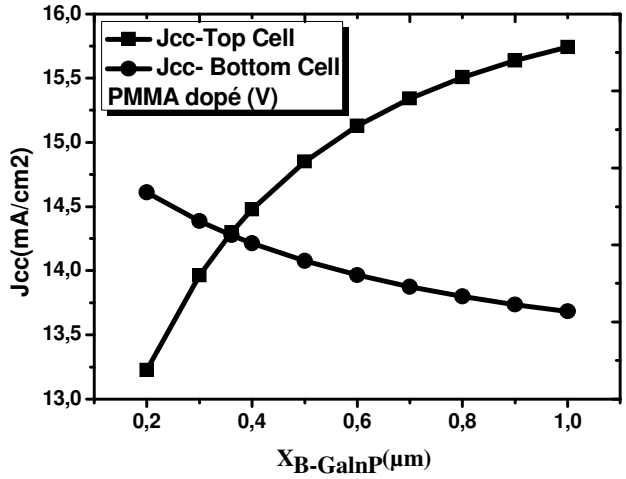
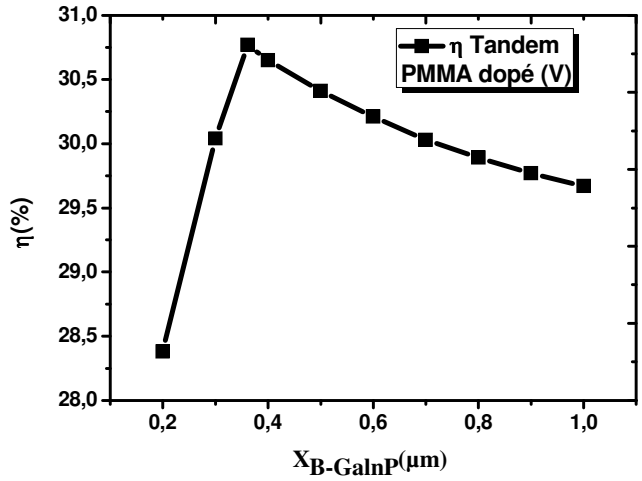


Figure 95 : Effet des cascades lumineuses (S1, S2, S3 et S4) sur le spectre solaire AM1.5G.

La valeur optimale du photocourant qui assure la condition d'égalité du courant entre les cellules supérieure et inferieure est représentée par le chevauchement des deux courbes de la densité du courant de court-circuit de la cellule supérieure et inférieure. Cette valeur correspond à la valeur maximale du rendement de conversion de la cellule tandem.

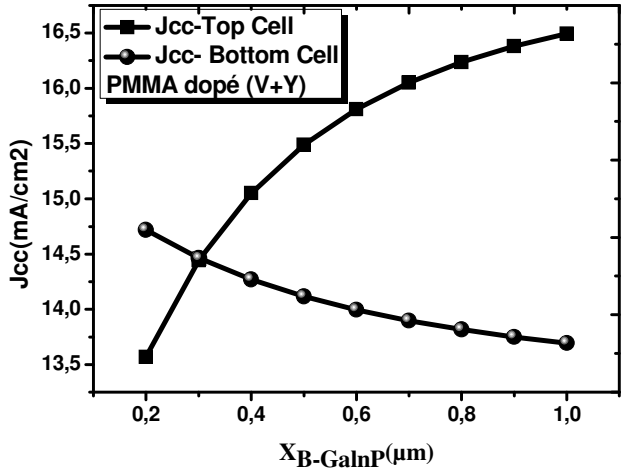


(a)

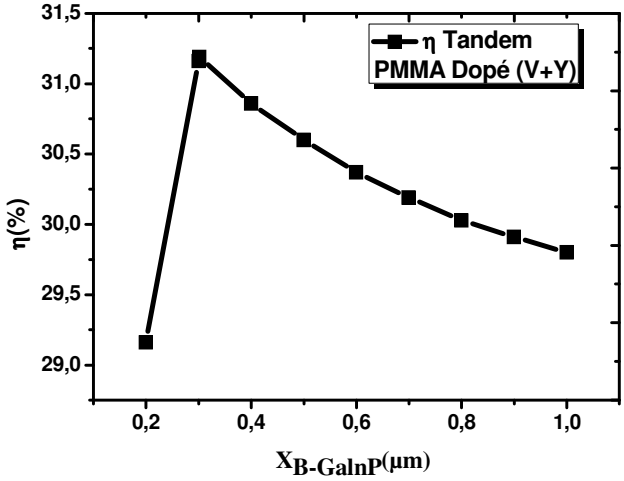


(b)

Figure 96 : Cellule solaire tandem GaInP/GaAs avec la cascade S1, (Valeur optimale a) courant de court-circuit, b) rendement de conversion : $X_{B\text{-}GaInP}$ = 0.361 µm, $J_{cc\text{-}Tandem}$=14.276 mA/cm2, V_{co}=2.402 volt, FF=% 89.75, η= 30.77%).

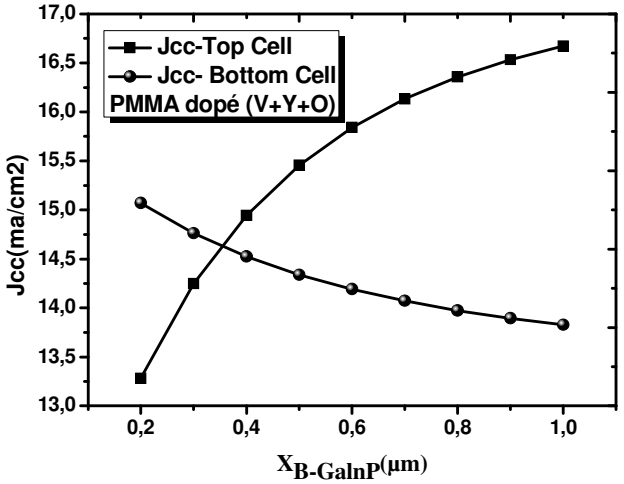


(a)

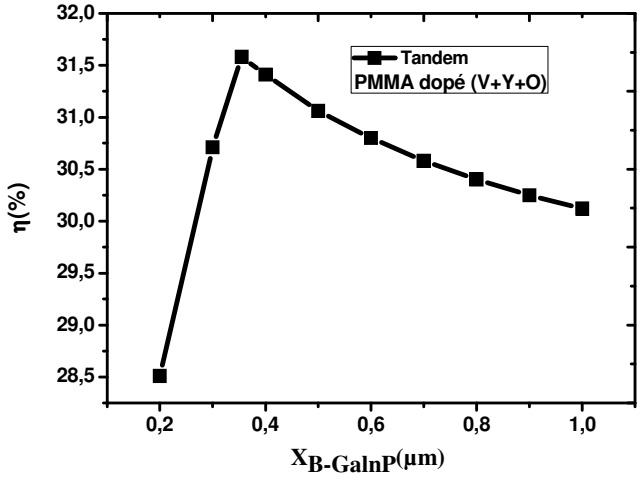


(b)

Figure 97: Cellule solaire tandem GaInP/GaAs avec la cascade S2, (Valeur optimale a) courant de court-circuit, b) rendement de conversion : $X_{B\text{-}GaInP}$ = 0.302µm, $J_{cc\text{-}Tandem}$=14.457 mA/cm2, V_{CO} =2.404 volt, FF=89.76 %, η=31.19 %).



(a)



(b)

Figure 98 : Cellule solaire tandem GaInP/GaAs avec la cascade S3, (Valeur optimale a) courant de court-circuit, b) rendement de conversion : $X_{B\text{-}GaInP}$ = 0.355µm, $J_{cc\text{-}Tandem}$=14.62ma/cm2, V_{oc}=2.406volt, FF=89.77%, η=31.58%).

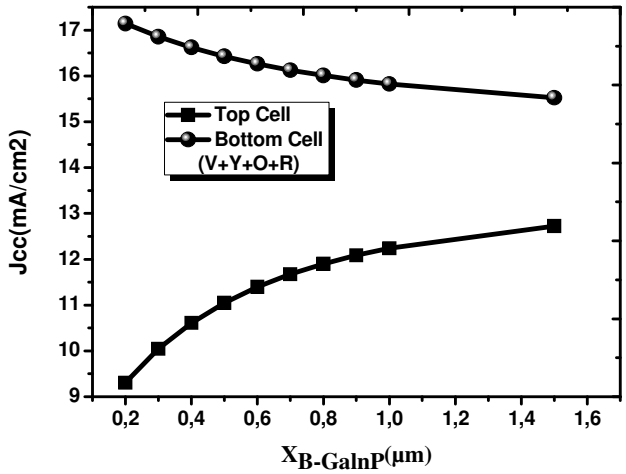


Figure 99 : Cellule solaire tandem GaInP/GaAs avec la cascade S4 (pas de convergence).

Nous remarquons que le rendement de conversion de la cellule tandem varie proportionnellement avec les dopants ajoutés, cela s'explique par l'augmentation du photo-courant qui est proportionnel au nombre de photons piégés par la cellule. Le transfert des photons de la région UV vers la région infrarouge augmente le photocourant dans la cellule supérieure. Cela permet d'avoir une cellule tandem à rendement élevé avec une base mince ($X_{B\text{-}GaInP}$). Le tableau 29 donne le rendement et l'épaisseur de la base avant et après l'utilisation de la couche LDS.

Une bonne adaptation entre le spectre solaire modifié est le rendement quantique de la cellule tandem est obtenue avec un mélange formé des trois dopants (Violet, Yellow et Orange). En revanche, l'insertion du 4ème dopant (S4) implique un décalage du spectre solaire hors la zone élevée du QE de la cellule, ce qui n'assure pas la condition d'égalité du courant entre les deux cellules.

Tableau 29 : Rendement de la cellule Tandem GaInP/GaAs avec et sans la couche PMMA dopé S3.

Caractéristique de la cellule tandem GaInP/GaAs	Tandem GaInP/GaAs sans couche PMMA	Tandem GaInP/GaAs avec couche PMMA (dopé S3)
Jcc (mA/cm2)	13.87	14.62
η (%)	29.83	31.58%
Epaisseur de la base de la cellule supérieure $X_{B\text{-}GaInP}$ (µm)	**0.7**	**0.355**

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons optimisé les performances de la cellule solaire tandem GaInP/GaAs, en utilisant le simulateur solaire unidimensionnel SCAPS-1D. Pour assurer le critère d'égalité du courant de court-circuit dans la cellule tandem, nous avons fait varier l'épaisseur de la base de la cellule supérieure $X_{B\text{-}GaInP}$. La valeur optimale du courant de court-circuit (13.87mA/cm^2), dans la cellule tandem, est obtenue pour une valeur de $X_{B\text{-}GaInP}$=0.7µm. Les résultats des paramètres électriques de la cellule sont conformes à ceux rapportés dans la littérature.

Nous avons ensuite étudié l'influence des paramètres technologiques de la cellule tandem (dopage de la base des cellules supérieure et inférieure et couche BSF). Cette étude a montré l'influence de ces paramètres sur le rendement de la cellule et nous a éclairés sur l'ordre de grandeur à choisir pour ces régions.

Nous avons également étudié l'influence de la température sur la cellule tandem GaInP/GaAs et l'hétérostucture GaInP-GaAs. Pour la cellule tandem, nous avons remarqué que la dégradation de la tension, en fonction de la température, est linaire et additive et que les performances de la cellule deviennent dépendantes des caractéristiques de la cellule supérieure, lorsque la température augmente.

Une autre étude sur la l'amélioration des performances de la cellule, en utilisant les matériaux à conversion de photon, nous a permis de minimiser les pertes par thermalisation et d'augmenter le rendement de la cellule.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons effectué une simulation des structures à couches minces en hétérostructure à base de GaInP/GaAs et du tandem monolithique à base d'une cellule supérieure GaInP et inférieure GaAs. Pour cela, nous avons utilisé le simulateur solaire unidimensionnel SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension).

En premier lieu, nous avons proposé une méthode de modélisation numérique pour simuler la cellule solaire tandem GaInP/GaAs, à l'aide d'un simulateur solaire unidimensionnel (SCAPS-1D) limité en nombre de couches. Les performances de la cellule tandem GaInP/GaAs sont optimisées en fonction de l'épaisseur de base de la cellule supérieure GaInP. La modélisation des cellules supérieure (GaInP) et inférieure (GaAs) a été effectuée séparément. Le spectre solaire atteignant la cellule inférieure a été calculé à partir de la loi de Beer-Lambert.

Afin d'évaluer le critère d'égalité du courant de court-circuit entre les deux cellules supérieure et inférieure, nous avons fait varier l'épaisseur de base de la cellule supérieure (GalnP) de 0,4 à 1 µm. Une valeur optimisée de 0.7µm pour l'épaisseur de base (GalnP) permet d'évaluer ce critère. Les paramètres photovoltaïques du tandem monolithique (GaInP/GaAs) optimisé sont les suivants : J_{cc} = 13.87 mA/cm2, V_{co} = 2.397 Volt, FF = 89,74% et un rendement de conversion allant jusqu'à 29,83%.

Après la simulation et l'optimisation de la cellule tandem GaInP/GaAs, nous avons étudié l'effet du dopage, de la base des cellules supérieure et inférieure et la couche BSF de la cellule supérieure, sur leurs performances de la cellule tandem. Nous avons trouvé que :

- Pour la cellule supérieure, le QE(λ) subit une forte dégradation pour un fort dopage de la base et pour les longueurs d'onde qui dépassent 500 nm.
- Le rendement de la cellule supérieure varie proportionnellement avec le dopage jusqu'à une valeur optimale d'environ $10^{17}cm^{-3}$.
- Pour la cellule inférieure, la condition d'égalité du courant est assurée par la cellule supérieure, quand le dopage de la cellule inférieure varie, sans dépasser 2E17 cm^{-3}.
- Nous concluons que la couche BSF doit avoir un dopage assez élevé (>10^{17}), pour créer un champ électrique capable de repousser les porteurs minoritaires loin de l'arrière de la cellule.

Nous avons également étudié l'effet de la température de fonctionnement de la cellule sur ses différents paramètres. Nous avons montré que l'augmentation de la température provoque une dégradation de la tension en circuit ouvert, du facteur de forme et du rendement de conversion de la cellule. La diminution de la tension en circuit ouvert est considérée comme importante en comparaison avec l'augmentation du courant de court-circuit. La tension se dégrade linéairement avec l'augmentation de la température.

Pour la cellule tandem, la variation de la température est remarquable dans la cellule inferieure, à cause de l'effet de la cellule supérieure qui joue le rôle d'un filtre pour la cellule inférieure. La quantité de lumière arrivant à la cellule inférieure augmente avec l'augmentation de la température, ce qui implique une augmentation du gap du matériau de la cellule supérieure.

Le coefficient de variation (Δ Tension/Δ température) dans la cellule tandem est de l'ordre de $\Delta v / \Delta T$ (tandem) = - 4 mV/°C. Cette quantité est additive, elle représente la somme des variation des cellules supérieure GaInP (- 2 mV/°C) et inférieure GaAs (- 2 mV/°C).

A partir de cette étude, nous pouvons constater que les performances de la cellule tandem deviennent dépendantes des caractéristiques de la cellule supérieure lorsque la température de la cellule augmente.

Enfin, en utilisant une approche basée sur les matériaux à conversion de photons, nous avons essayé d'améliorer les performances des cellules solaires à couche mince à hétérostructure et de la cellule tandem.

Pour la cellule à couche mince à hétérostructure, les performances de la cellule solaire GaAs sont étudiées en fonction du nombre de colorants organiques ajoutés (violet 570, 083 jaune, orange et 240) et de la couche fenêtre. Nous avons constaté que la densité courant de court-circuit et le rendement de conversion sont très sensibles aux couches LDS. Les meilleurs résultats ont été enregistrés avec des colorants mixtes pour la couche PMMA (cascade lumineuse).

Les couches fenêtres GalnP et AlInP apportent de bonnes contributions à la couche LDS en raison de leur faible QE dans la région du bleu et de l'UV. Nous avons conclu que pour améliorer un dispositif de cellules solaires avec une couche de LDS, nous devons choisir des colorants (dopants) qui absorbent la lumière à des

longueurs d'onde où le dispositif présente un faible QE et émettent cette lumière dans la région où le QE est fort, en se basant sur le principe de la cascade lumineuse.

Pour la cellule tandem, et afin de résoudre le problème d'égalité de courant dans cette cellule, tout en garantissant un meilleur rendement, nous commençons notre étude par la cellule supérieure car elle présente le courant le plus faible dans la cellule. Les résultats de simulation ont montré une augmentation de la densité de courant de court-circuit et de l'efficacité de conversion respectivement de 13,13 % et 13,48 % en utilisant une couche de LDS dopée par un mélange de trois colorants (Violet 570, 083 jaune et orange 240). Les deux colorants organiques Violet 570 et le jaune 083 ont une grande contribution à augmenter l'efficacité de la cellule solaire par rapport au colorant orange 240, ils sont donc plus adaptés aux cellules solaires GaInP avec une couche de LDS. Un rendement de conversion de plus de 20 % a été atteint.

Pour l'ensemble de la cellule tandem, l'utilisation de la cascade lumineuse, formée par les trois colorants (violet-jaune-orange), nous a permis de minimiser l'épaisseur de la base de la cellule supérieure de 0.7 µm à 0.355µm et d'augmenter le rendement de la cellule tandem de 5.86%.

Comme perspective, nous proposons d'améliorer les performances de la cellule solaire tandem dans les conditions de travail à haute température, en manipulant ces paramètres technologiques afin de minimiser le coefficient ($\Delta V/\Delta T$) ou en utilisant d'autres matériaux sur la face avant de la cellule, ce qui permettrait de minimiser leur température.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

[1] Harold J. Hovel, **"Semiconductors and semimetals",** Vol. 11, solar cells, Academic Press New York San Francisco London, 1975.

[2] S. M. Sze and M. K. Lee, **"Semiconductor Devices, Physics and Technology"**, 3rd edition john wiley & sons, 2012.

[3] Stephen J. Fonash, **" Solar cell Device Physics "**, Second Edition, Elsevier, 2010, ISBN 978-0-12-374774-7.

[4] P. Rappaport, **" The photovoltaic effect and its utilization in solar cells ",** C. E. Backus, New York: IEEE Press, p. 14, 1976.

[5] National Renewable Energy Laboratory Website- http://www.nrel.gov/ncpv/.

[6] S. W. Angrist, " **Direct Energy conversion ",** 4th ed. Boston: Allyn and Bacon, Inc, p 177. 1982.

[7] H. Mathieu, **"Physique des semiconducteurs et des composants électroniques",** 4ème édition, Masson, Paris 1998.

[8] A. Ricaud, **" Photopiles Solaires : De la physique de la conversion Photovoltaïque aux filières, Matériaux et Procédés "**, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1 ère édition 1997.

[9] A. Mc. Evoy, T. Markvart and L. Castaner, **" Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications, Second Edition "**, Elsevier Ltd, 2012, ISBN: 978-0-12-3859334-1.

[10] L. L. Kazmerski, **" Solar Photovoltaics R&D at the Tipping point: A2005 Technology Overview ",** in Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, Vol. 150, pp. 105-135, 2006.

[11] Angus R, " **The Materials Science of Semiconductors ",** Springer Science & Business Media, LLC, 2008, ISBN: 978-0-387-25653-5.

[12] R. C. Neuville**, "Solar Energy Conversion THE SOLAR CELL",** 2ème édition, ELSEVIER Science B.V, 1995, ISBN: 0444-89818-2.

[13] Soteris A. Kalogirou , **" Solar Energy Engineering Processes and Systems ",** Academic Press, Elsevier, 1er Edition, 2009.

[14] R. Pode and B. Diouf, **" Solar Lighting ",** Springer, INC, Springer-Verlag London Limited 2011.

[15] J. J. Lieu and W. W wong, **" Comparison and optimization of performance of Si and GaAs solar cells ",** Solar Enrgy Materials and Solar Cells, Vol. 28, pp.9-28, 1992.

[16] A. F. Maftah, N.Sengouga, A. M. Maftah, S. Khelifi, **" Numerical simulation of the effect of the Al molar fraction and thickness of an $Al_xGa_{1-x}As$ Window on sensitivity of a p+n-n+ GaAs solar cell to 1Mev electron irradiation ",** Renewable Energy Vol. 34, 2426-2431, 2009.

[17] Renewable Resource Data Centre, National Renewable Energy Laboratory, "Solar Spectra" [online], available: http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/. 2008.

[18] S. M. Sze, **" Physics of Semiconductors Devices",** 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2001.

[19] M. Green, **" Solar Cells: operating Principles, Technology, and System application ",** Chap.1 Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1-12, 1982.

[20] ASTM-Standard-G173-2003el, Standard Table for Reference solar irradiances: Direct, Normal and Hemispherical on 37 degree tilted surface, Conshohocken, PA, 2003.

[21] A. Kitai, **" Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes, The role of the PN junction ",** John Wiley & Sons, Ltd, first edition. 2011.

[22] P. Wurfel, **" Physics of solar cells, from principles to new concepts "**, Wiley-vch Verlag GmbH & Co.KGaA, 2005, ISBN: 3-527-40428-7.

[23] S. Hegedus and W. N. Shafarman, **" Thin-Film Solar cells: device analysis and measurements ",** Progress in Photovoltaics: Research and Application Vol. 12, pp. 155-176, 2004.

[24] PV Education. Quantum efficiency. (Online)(visité le 06-05-2014), http:// pvcdrom.pveducation.org/ celloper /quantum.htm.

[25] A. R. Jha, **" Solar cell Technology and applications ",** Taylor & Francis Group, p.26, 2010, ISBN 978-1-4200-8177-0,

[26] B. Streetman and S. Banerjee, " **Solid State Electronic Devices** ", Vol. 2, Prentice-Hall, New Jersey, 1995.

[27] C. H. Henry, **" Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells ",** J. Appl. Phys, Vol. 51, N°.8, pp. 4494-44500, 1980.

[28] J. E. Sutherland and J. R. Hauser, **" A computer analysis of heterojunctions and graded composition solar cells ",** IEEE. Trans. Electron. Dev, ED -24, Vol. 4, pp. 363-372, 1997.

[29] M. E. Klausmeier-Brown, **" Status and prospects and economics of terrestrial single junction GaAs concentrator cells ",** in: Larry. D. Partain**, " solar cells and their Applications ",** Wiley, New York, 1995.

[30] T. J. Coutts and M. Yamaguchi, **" Indium Phosphide based solar cells: a critical review of their fabrication, performance and operation ",** in : T. J. Coutts, J. D. Meakin(Eds), current Topics in Photovoltaics, Vol. 3, p. 79, 1988.

[31] A. Cuevas, G. Giroult-Matlakowski, P. A. Basore, C. du Bois and R. King, **" Extraction of the surface recombination velocity of passivated phosphorus deped emitters ",** Proc. 1st World Conference on photovoltaic Energy conversion, Hawaii, pp. 1446-1449, 1994.

[32] A. Haug **,** " **Auger recombination in direct-gap semiconductors: band-structure effects "**, J. Phys. C: Solid State Phys. 16 4159. 1983, DOI:10.1088/0022-3719/16/21/017.

[33] F. Dimroth and S. Kurtz, **" Hight-Efficiency Multijonction Solar Cells "**, MRS bulletin, Vol. 32, March 2007, www.mrs.org/bulletin.

[34] M. Bosi and C. Pelosi, **" The Potential of III-V Semiconductors as Terrestrial Photovoltaic Devices "**, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2007; Vol. 15. pp. 51–68, DOI: 10.1002/pip.715.

[35] M. D. Archer, Robert H, **" Clean electricity from Photovoltaics, Series on Photoconversion of Solar Energy** ", Vol. 1, Imperial College Press 57 Shelton Street Covent Garden London WC2H 9HE. 2001.

[36] J. M. Olson, D. J. Friedman and S. Kurtz, **" High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells ",** Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, 2003.

[37] G. W. Masden and C. E. Backus, **" Increased photovoltaic conversion efficiency through use of spectrum splintting and multiple cells "**, Proc. 13 IEEE Photovoltaic specialist conf, pp. 853-858, 1978.

[38] A. L. Fahrenbruch and R. H. Bube, **" Fundamentals of solar cells photovoltaic Energy Conversion "**, New York: Academic Press, p. 522, 1983.

[39] E. D. Jackson, U. S. Patent 2 949 498, 1960.

[40] R. L. Moon, L.W. James, T. O. Yep H. A. Vander Plas, G. A. Antypas, and Y. Chai, **" Multigap solar cell requirements and the performance of AlGaAs and Si cells in concentrated sunlight "**, In Proc. of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 859–867, Washington, DC, 1978.

[41] J. Yang, R. Ross, R. Mohr and J. Fournier, " **High efficiency solar cells using amorphous silicon and amorphous silicon- geramamium based alloys "**, Proc. 18th IEEE Photovoltaics Specialists' Conf., Las Vegas, NV, October 21-25, 1985, IEEE, New York,1986.

[42] A. Luque and S.Hegedus, " **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering "**, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2003.

[43] P.T. Landsber and V. Badescu, " **Solar energy conversion: list of efficiencies and some theoretical considerations. I Theoretical considerations, II Results "**, Progress in Quantum Electronics, Vol. 22(4), pp. 231-255. 1998.

[44] G. Writing, **" Global Energy Assessment, Toward a sustainable future ",** First Edition, Cambridge University Press, August 2012, ISBN: 9780521182935.

[45] W. Shockley and HJ. Queisser, **" Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells"**, Journal of Applied Physics, Vol. 32, p. 510. 1961.

[46] M. Green, **" Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications",** University of New South Wales, 1998.

[47] Brozel MR, Stillman GE, **" Properties fo Gallium Arsenides "**, 3rd edition, Institution of Electrical Engineers, 1996.

[48] F. Dimroth, C. Baur, Bett AW, M. Meusel, G. Strobl, **" 3-6 junction photovoltaic cells for space and terrestrial concentrator applications "**, Conference Record of the Thirty First IEEE Photovoltaic Specialist Conference IEEE 525, 2005.

[49] S.R. Kurtz, P. Faine and J.M. Olson, **" Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter "**, Journal of Applied Physics, Vol. 68, p. 1890, 1990.

[50] M. Green, Emery K, King DL, Igari S, Warta W. Solar cell efficiency tables (version 27). Progress in Photovoltaics: Research and Applications,Vol.14, p. 45, 2006.

[51] S. Adachi, **" Properties of Group-IV, III–V and II–VI Semiconductors "**, John Wiley & Sons Ltd, Wiley series in materials for electronic and optoelectronic applications, 2005.

[52] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, L. R. Ram–Mohan, **" Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys "**, Applied Physics Review, Journal of Applied Physics, Vol. 89, N°11, pp. 5815–5875, 2001.

[53] Peter S. Zory Jr., Paul F. Liao, Paul K, **" Quantum Well Lasers ",** Academic Press. 1993.

[54] Y. A. Goldberg, **" Handbook Series on Semiconductor Parameters "**, Vol. 2, World Scientific, London (1999).

[55] L. Esaki, **" New phenomenon in narrow Germanium p-n junction ",** Phys. Rev, Vol. 109, pp.603-604, 1958.

[56] H. Sugiura, C. Amano, A.Yamamoto, M.Yamaguchi, **" Double heterostructure GaAs tunnel junction for a AlGaAs/GaAs tandem solar cell ",** Japanese Journal of Applied Physics; Vol.27,pp. 269-272, 1988.

[57] W. Li, J. Lammasniemi, AB. Kazantsev, R. Jaakkola, T. Makela, M. Pessa, **" GaInP/AlInP tunnel junction for GaInP/GaAs tandem solar cells "**, Electronics Letters, Vol. 34, pp. 406.1998.

[58] R. E. Hayes et al, " **A stability criterion for tunnel diode interconnect junction in cascade solar cells ", Solar Cells,** Vol. 15,pp. 213-238, 1985.

[59] P. Basmaji et al, **" GaAs tunnel junction grown by metalorganic vapor-phase epitaxy for multigap cascade Solar cells ",** J. Appl. Phys., Vol. 62, pp. 2103-2106, 1987.

[60] D. L. Miller, S. W. Zehr, andJ. S. Harris, Jr, **" GaAs-AlGaAs tunnel junction for multigap cascade solar cells "**, J. Appl. Phys., Vol. 53, pp. 744-748, 1982.

[61] S. K. Ghandhi, R. T. Huang, and J. M. Borrego, **"Fabrication of GaAs Tunnel junction by a rapid thermal diffusion process",** App. Phys. Lett., Vol 48, 415-416, 1986.

[62] M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, N. Ekins-Daukes, **" Multi-junction III–V solar cells: current status and future potential ",** Solar Energy Vol.79, 78–85. 2005.

[63] Bremner, S.P., Levy, M.Y. and Honsberg, C.B, **" Analysis of Tandem Solar Cell EfficienciesUnderAM1.5G Spectrum Using a Rapid Flux Calculation Method ",** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.16, 225, 2008.

[64] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/antiref.html#c2.

[65] S. Youn Han, B. Cho and N. Takeuchi, **" Effects of the optical energy bandgap and metal work function on the contact esistivity in a-SiGe :H "**, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 47, 075104 (7pp) 2014, DOI:10.1088/0022-3727/47/7/075104.

[66] K. Lal Chopra, S. Ranjan Das,**" Thin film Solar Cells "**, Springer Science+Business media, LLC, 1983.

[67] K. Jolson Singh, S.Kumar Sarkar,**" Highly efficient ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell numerical modeling using optimized InAlGaP BSF layers "**, Opt Quant Electron, Springer Science & Business Media, , Vol. 43 , Issue 1-5, pp. 1-21 February 2012

[68] Fossum, J.G., Nasby, R.D., Shing Chong Pao**, " Physics underlying the performance of back-surface-field solar cells ",** Electron Devices, IEEE Transactions Vol. 27, Issue: 4, pp.785 – 791, 2005.

[69] S. Adachi, **" Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors- Numerical Data And Graphical Information "**, Springer, NewYork, NY,USA, 1999.

[70] P. Michalopoulos, **" a novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using silvaco ",** master of science in electrical engineering and master of science in computer science, Naval postgraduate school Monterey, California, 2002.

[71] S. Adachi, **" GaAs, AlAs, and $Al_xGa_{1-x}As$: Material parameters for use in research and devise applications ",** J. Appl. Phys, Vol. 58(3): R1-R29, 1985.

[72] A. Ryan, **" Modeling Solutions and Simulations for Advanced III-V Photovoltaics Based on Nanostructures ",** Master of Science thesis, Rochester Institute of Technology Rochester, NY, December 2008.

[73] D. Ahmari, M. Fresina, Q. Hartmann, P. Barlage, M. Feng, G. Stillman, **" InGaP/GaAs Heterojunctions bipolar transistor grown on a semi-insulating InGaP buffer layer "**, IEEE Electron Device Letters, Vol. 18, N°.11,pp.559-561, 1997.

[74] W. Lour, J. Tsai, L. Laih, W. Liu**, " Influence of channel doping-profile on camel-gate field-effect transistor "**, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.43, pp. 871-876, 1996.

[75] A. Haas, J. Wilcox, J. Gray, and R. Schwartz **, " Design of A GaInP/GaAs tandem solar cell for maximum daily, monthly, and yearly energy output ",** Journal of Photonics for Energy Vol. 1, 2011, [DOI: 10.1117/1.3633244].

[76] S. R. Kurtz, J. M. Olson, D. J. Friedman, J. F. Geisz, K. A. Bertness, and A. E. Kibbler , **" Passivation of Interfaces in High-Efficiency Photovoltaic Devices ",** conference paper Materials Research Society's Spring Meeting San Francisco, California April 5-9, 1999.

[77] P. J. Faine, Sarah R. Kurtz, J. M. Olson, **" Modeling of two-junction, series-connected Tandem solar cells using Top –cell and coating thicknesses as adjustable parameters** ", Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty First IEEE, Kissimmee, FL, Vol.1, pp. 339 – 344, 21-25 May 1990.

[78] SILVACO International, **" ATLAS User's Manual device simulation software-Volume I** ", February 2000.

[79] B. Equier, **" Energie solaire photovoltaïque ",** Volume 1, physique et technique de la conversion photovoltaique, Ellipses Editions 1993.

[80] H. J. Hovel, R.T. Hodgson, J.M. Woodall, Solar Energy Materials, 2, 19, 1979.

[81] W.G.J.H.M. van Sark, A. Meijerink and R.E.I. Schropp, **" Solar Spectrum Conversion for Photovoltaics using nanoparticles "**, Third Generation Photovoltaics, CIER-E-2012.

[82] L. Danos, T. Parel, T. Markvart, V. Barrioz, W.S.M. BOOKS, S.J.C. Irvine, **" Increased efficiencies on CdTe solar cell via luminescence down-shifting with exicitation energy transfer between dyes "**, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 98, pp.486-490, 2012.

[83] J.R. Lakowicz, **" Principles of fluorescence spectroscopy "**. Plenum Press, 1983.

[84] C.P Thomas, A.B. Wedding, S.O. Martin, **" Theoretical enhancement of solar cell efficiency by the application of an ideal down-shifting thin film "**, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 98, pp. 455-464. 2012.

[85] A. Goetzberger, **" Fluorescent solar energy collectors: Operating conditions with diffuse light"**, Appl. Phys, Vol.16, pp. 399-404, 1978.

[86] B.S. Richards, A. Shalav, Synthetic Met. 2005, 154, 61.

[87] A. Vesselinka Petrova-Koch, Rudolf Hezel Adolf Goetzberger, **" High-Efficient Low-Cost Photovoltaics Recent Developments",** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[88] Keith R. McIntosh, Gay Lau, James N. Cotsell, Katherine Hanton, Derk L. Ba¨tzner, Fabian Bettiol and Bryce S. Richards, Progress in photovoltaics, 2009, Vol. 17, pp. 191.

[89] BASF Lumogen F datasheets, /http://www2.basf.us/additives/pdfs/lum vio570.pdfS,/http://www2.basf.usadditives/pdfs/lumyel083.pdfS, last accessed: 10 Mars 2013.

[90] B. S. Richards, and K. R. McIntosh, IEEE 4th world conference on photovoltaic energy conversion, Waikoloa, Hawaii, , 213, 07 May -12 May 2006

[91] Wilfried G. J. H. M. van Sark et al, **" Luminescent solar concentrators: a Review of Recent Result, Optics Express "**, Vol. 16, pp. 21773-21792, 2008.

[92] A. Goetzberger, J. Knobloch, B. Vob, **" Crystalline Silicon Solar Cells"**, John Wiley & Sons 1998, ISBN 0 47 I 97 144 8.

[93] M. Orgeret, **" Les piles solaires le composant et ses applications "**, Masson, Paris, 1985, ISBN : 2-225-80482-6.

[94] H. J. Hovel, J.M. Woodall, 10th IEEE Photovoltaïque Specialists Conference, pp. 25, 1973.

[95] Fossom, J. G., Sandia Laboratories, Energy Report, SLA-74-0273, June 1974.

[96] J. KrčMarko Topič, **" Optical modeling and simulation of thin-film photovoltaic Devices "**, CRC PressTaylor & Francis Group, 2013.

[97] Elliot J. Chikofsky, James H. Cross II, **" Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy "**, IEEE Software, Vol. 7, pp. 13-17. January 1990.

[98] M. Burgelman, J. Verschraegen, S. Degrave, P. Nollet, **" Modeling Thin- film PV Devices " ,** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 12, pp.143-153, 2004.

[99] C. Mattiussi, **" The Finite Volume, Finite Element, and Finite Difference Methods as Numerical Methods for Physical Field Problems ",** Advances in Imaging and Electron Physics, Vol. 113:1-146, 2000.

[100] PC1D User Manuel, PC1D Version 5: 9.

[101] SCAPS-1D User Manuel, SCAPS Version 2. 3.

[102] P. Basore, **"Numerical modeling of textured silicon solar cells using PC-1D",** IEEE Transactions on Electron Devices; Vol. 37(2), pp. 337, 1990.

[103] P. Basore, **" PC-1D Installation Manual and User's Guide Version 3.1 "**, Sandia report sand 91-0516 .UC-274 Unlimited Release Printed May 1991.

[104] T. Soga , **"Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion"**, First edition 2006, Elsevier.

[105] M. W. Wanlass and D. S. Albin**, " A Rigorous Analysis of Series-Connected, Multi-Bandgap,Tandem Thermophotovoltaic (TPV) Energy Converter",** AIP Conf. Proc. 738, 462, 2004, http://dx.doi.org/10.1063/1.1841925.

[106] S. M. Sze, ed, **" Modern Semiconductor Device Physics ",** New York, NY: John Wiley and Sons, Inc,1998.

[107] T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita and M. Ohmor, **" High efficiency InGaP solar cells for InGaP/GaAs Tandem cell application "**, in Proceedings of the First world conference on photovoltaic energy conversion, p. 1729, Hawaii, Dec. 5-9, 1994.

[108] Sarah R. Kurtz, J. M. Olson, and A. Kibbler. (1990), **" high efficiency GaAs solar cells using GaInP, window layers "**, Photovoltaic Specialists Conference, , Conference Record of the Twenty First IEEE, Kissimmee, FL, Vol. 1, pp.138-140, 21 May 1990-25 May 1990.

[109] C.D. Thurmond**, " The standard thermodynamic functions for the formation of electrons and holes in Ge, Si, GaAs and GaP ",** J. Electrochem. Soc. Vol. 122(8), pp. 1133-1141, 1975.

[110] L. Fraas, L. Partain, **" Solar cells and their applications "**, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2010, ISBN 978-0-470-44633-1 (cloth).

[111] M. Green, **" General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modeling "** , in Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 11, pp. 333-340.Lklkm, 2003.

[112] B.S. Richards and K.R. McIntosh, **" Ray-tracing simulations of luminescent solar concentrators containing multiple luminescent species ",** In Proceedings of the 21st EU PVSEC, Dresden, pp. 185-188, 2006.

[113] Niemegeers, A., and Burgelman, M., 1997, **" Effects of the Au/CdTe Back Contact on I(V) and C(V) Characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO Solar Cells",** J. Appl. Phys., Vol**.** 81(6), pp. 2881–2886.

[114] Van Sark, W. G. J. H. M.**,“ Simulating Performance of Solar Cells With Spectral Downshifting Layers ” ,** Thin solid films, Vol. 516(20), pp. 6808–6812, 2008.

[115] W. G. J. H. M. Van Sark, A. Meijerink, R. E. I. Schropp, J. A. M. Van Roosmalen, and E. H. Lysen**, “ Enhancing solar cell efficiency by using spectral converters ”,** Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 87, pp. 395–409, 2005.

[116] K. R. McIntosh and B. S. Richards, **“ Increased mc-si module efficiency using fluorescent organic dyes: a ray-tracing study ”,** Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Vol. 2, pp.2108 – 2111,Waikoloa, HI,IEEE, May 2006.

[117] A. W. Bett, F. Dimroth, G. Stollwerck, and O. V. Sulima, 1999, **“III-V compounds for solar cell applications”,** Appl.Phys.Materials.Science & Processing, A69, pp.119-129.6808-6812.

[118] S. Khelifi et A. Belghachi, **“Le Rôle de la couche fenêtre dans les lerformances d’une cellule solaire GaAs”,** Rev. Energ. Ren. Vol. 7, pp.13-21, 2004.

[119] P.J. Faine, Sarah R. Kurtz, J.M. Olson, Proc. 21st IEEE, PVSC, Kissimmee Florida USA, , 1. 339, 1990.

ملخص

بما أن الخلايا الضوئية ذات كفاءة التحويل العالية تعتمد غالبا على تكنولوجية أشباه النواقل من نوع زرنيخ الغاليوم (GaAs) و المواد III-V، نهدف في هذا العمل لتحسين أداء الخلايا الضوئية باستخدام مواد ومفاهيم جديدة. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تقليل تكلفة التصنيع و/ أو زيادة كفاءة التحويل لهذه الخلايا الضوئية. ان استخدام الخلايا ثنائية الوصلة، والتي تستند إلى مفهوم التحويل المتعدد الأطياف، يؤدي إلى استغلال أفضل للطيف الشمسي، من خلال توسيع نطاق الطيف المستعمل. في البداية قمنا بمحاكاة وتحسين الخلايا الضوئية ثنائية الوصلة GaInP /GaAs ، وذلك باستخدام محاك الخلايا الضوئية أحادي البعد SCAPS-1D.

لتقليل الخسائر الحرارية وتحسين أداء الخلايا الضوئية، قمنا باستبدال طبقة الزجاج، و التي تمثل مادة التغليف في الخلايا الضوئية، بطبقة من PMMA مطعمة بأصباغ نشطة ضوئيا. هذه الاخيرة تسمح بتحويل الفوتونات ذات الطاقة العالية والتي تقع في المنطقة الزرقاء وفوق البنفسجية (حيث كفاءة الكم للخلايا الضوئية منخفضة) الى منطقة الأشعة تحت الحمراء والمرئية (حيث كفاءة الكم للخلايا الضوئية مرتفعة). هذا ما يسمح من تقليل الخسائر الحرارية وتحسين أداء الخلايا الضوئية. هذا المفهوم تم تطبيقه على الخلايا الضوئية ثنائية الوصلة GaInP/GaAs و التركيب غير المتجانس N/P GaAs مع طبقة نافذة GaInP.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الضوئية، التحويل متعدد الأطياف، الخلايا ثنائية الوصلة,GaInP، GaAs، PMMA , SCAPS-1D .

Résumé

Les cellules solaires à haut rendement étant souvent basées sur la technologie des semi-conducteurs GaAs et III-V, on vise dans ce travail à améliorer les performances des cellules solaires en utilisant de nouveaux matériaux et de nouveaux concepts. L'objectif principal de ces recherches est de minimiser le coût de fabrication et/ou d'augmenter le rendement de ces photopiles. L'utilisation des cellules multijonction (Tandem), qui repose sur le concept de conversion multispectrale, conduit à une meilleure exploitation du spectre solaire, en élargissant la gamme utile du spectre. Dans un premier temps, nous simulons et optimisons la cellule tandem monolithique GaInP/GaAs, en utilisant le simulateur solaire unidimensionnel SCAPS-1D.

Afin de minimiser les pertes par thermalisation et améliorer les performances des cellules solaires, nous remplaçons la couche de verre, qui représente le matériau encapsulant dans une cellule solaire, par une couche en PMMA dopé avec des colorants optiquement actifs. Ces derniers permettent de convertir les photons de forte énergie situés dans les régions du bleu et de l'ultra-violet (où le rendement quantique *QE* de la cellule solaire est faible), vers la zone infrarouge et visible (où ce rendement *QE* est fort). Ceci permet de minimiser les pertes par thermalisation et d'améliorer les performances de la cellule solaire. Ce concept est appliqué à la cellule tandem GaInP/GaAs et à l'hétérostructure N/P GaAs avec couche fenêtre GaInP.

Mots clés : Cellules Solaires, Conversion Multispectrale, Tandem, GaInP, GaAs, PMMA, SCAPS-1D,

Abstract

Since high efficiency solar cells are often based on gallium arsenide GaAs and III-V semiconductor technology, we aim in this work at enhancing solar cell performances by using new materials and new concepts. The main objective of the present research is to minimize the manufacturing cost and/or increase the efficiency of these solar cells. The use of multi-junction cell (Tandem), which is based on the concept of multispectral conversion, leads to better utilization of the solar spectrum by widening the useful range of this spectrum. In a first step, monolithic tandem cells (GaInP/GaAs) are optimized and simulated using the one-dimensional solar simulator SCAPS-1D.

In order to minimize thermalization losses and enhance the solar cell performances, the glass layer which represents the encapsulating material in a solar cell, is substituted by a PMMA layer doped with optically active colorants. These colorants allow to convert photons of high energy, located in the blue and ultraviolet regions (where the quantum efficiency QE of the solar cell is low), towards infrared and visible region (where the quantum efficiency QE is high). This allows to minimize the thermalization losses and to improve the solar cell performances. This concept is applied to the tandem solar cell GaInP/GaAs and to the hetero-structure N/P GaAs with a GaInP window layer.

Key words: Solar cells, multispectral conversion, Tandem, GaInP, GaAs, PMMA, SCAPS-1D.