

# THÈSE

## En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat

*Présenté par : M<sup>elle</sup> DJAAFAR Fatiha*

***Intitulé: Etude et Modélisation des Performances des Cellules  
Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs  
Inorganiques.***

***Faculté :*** *Génie Electrique*

***Département :*** *Electrotechnique*

***Filière :*** *Electrotechnique*

***Intitulé de la Formation :*** *Electrotechnique des Systèmes Photovoltaïques.*

Soutenue le : 30-10-2018 devant le jury composé de :

<b><i>Membres de Jury</i></b>	<b><i>Grade</i></b>	<b><i>Qualité</i></b>	<b><i>Domiciliation</i></b>
<i>Belarbi Ahmed Wahid</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>	<i>USTOMB</i>
<i>Bachir Ghalem</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadrant</i>	<i>USTOMB</i>
<i>HadriBaghdad</i>	<i>Pr</i>	<i>Co-Encadrant</i>	<i>Université de Mostaganem</i>
<i>Rizouga Mohamed</i>	<i>Pr</i>		<i>USTOMB</i>
<i>Messad Mohamed</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineurs</i>	<i>USTOMB</i>
<i>YagoubiBenabdellah</i>	<i>Pr</i>		<i>Université de Mostaganem</i>

*Année Universitaire : 2017-2018*

"وما أوتيتم من العلم إلا قليلا "

الاسراء (85)

# Résumé

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

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

# Abstract

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

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

# المخلص

تستخدم الخلايا الشمسية غير العضوية التي تعتمد على مواد أشباه النواقل من النوع III-V على نطاق واسع بسبب كفاءتها العالية. في هذا العمل ، نهدف إلى تحسين أداء الخلية الشمسية غير المتجانسة (ثنائية الوصلة) InGaP/ GaAs. ترتبط الخليتان الفرعيتان بواسطة القطب النفقي (InGaP/JT) و طبقة السطح الخلفي (BSF) بمواد InAlAsP و AlGaAs لخلية InGaP و خلية GaAs على التوالي. تتم المحاكاة بعد التحسين والنمذجة واختيار المواد المستخدمة وسمك الطبقات المختلفة التي تشكل الخلية الشمسية. إن اختيار المواد التي تتناقص طاقة فجواتها يسمح بامتصاص الطيف الشمسي بكامله تقريباً ، كما أن تحسين سماكة الطبقات (الطبقات الرقيقة) يسمح بالموازنة بين المرد ودية وتكلفة التصميم الأمثل المختار. تضاء الخلية الشمسية InGaP / GaAs مع الخصائص المثلى المنتقاة بواسطة الطيف الشمسي AM1.5 من خلال طبقة نافذة InAlAsP. يتم استخلاص تيار الدارة القصيرة ( $J_{sc}$ ) ، جهد الدارة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) ، والمر دودية ( $\eta$ ) باستخدام برنامج المحاكاة TcadSilvaco.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الشمسية ، غير المتجانسة (ثنائية الوصلة) ، القطب النفقي (JT) ، BSF ، InGaP ، GaAs ،

Tcad .Silvaco

# *Remerciement*

Je remercie ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, la volonté et la patience pour arriver à nos fins de ce travail.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude et mes remerciements les plus vifs à mon promoteur de thèse, professeur **Ghalem Bachir**.

Je veux vous remercier chaleureusement pour avoir accepté de diriger cette thèse et pour m'encadrer, ton suivi tout au long de ces années.

A mon co-promoteur, professeur **Baghdad Hadri**, j'ai eu le privilège de travailler parmi votre équipe et d'apprécier vos qualités et vos valeurs. Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir m'a énormément marqués. Veuillez trouver ici l'expression de ma respectueuse considération et ma profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines.

Je tiens à remercier avec plus grande gratitude monsieur **Belarbi Ahmed Wahid**, professeur à l'université d'USTOMB de l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je remercie également monsieur **Rizouga Mohamed**, professeur à l'université d'USTOMB pour avoir accepté de se joindre à ce jury comme examinateur.

Je tiens également à présenter mes remerciements à monsieur **Messad Mohamed**, MCA à l'université d'USTOMB, d'avoir accepté d'évaluer ce travail et d'être examinateur et membre du jury.

Je remercie également monsieur **Yagoubi Benabdellah**, professeur à l'université de Mostaganem pour avoir accepté de se joindre à ce jury comme examinateur.

Je tiens également à remercier tous les membres de laboratoire LEOG (université de Mostaganem) : Hakima pour leur soutien et encouragement et les membres de laboratoire de LDDEE (université de USTOMB) : Mohamed fares, Lotfi Atik, et Z.T Ternifi.

## *Dédicace*

*A cœur vaillant rien n'est impossible*

*A conscience impassible tout est accessible.*

*Quand on a un rêve à achever*

*Tout devient facile pour arriver.*

*Malgré les obstacles qui s'opposent*

*Avec l'aide d'Allah le tout puissant, tout est facile.*

*Je dédie cette thèse :*

*A mes chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, et l'estime que j'ai toujours pour vous. Ce travail est le fruit de tes efforts fournis pour mon éducation et mon bien être.*

*A mon Co-encadreur professeur B. Hadri qui m'est le père, le guide et le soutien moral durant la réalisation de ma thèse. Les mots ne suffisent pour exprimer le respect que je porte pour vous « mon père ».*

*A mes chers frères et sœurs que je les aime, en spécifique « Zahra » ma fidèle accompagnante dans les moments difficiles et délicates.*

*A ma chère amie « Fatima », en témoignant de l'amitié et les moments que nous avons passé ensemble.*

*A une chère personne « B.M », Veuillez trouver ici, l'expression de mon profond respect et estime de votre écoute et encouragement. Je vous souhaite une vie pleine de bonheur.*

*A vous tous, je dédie ce travail avec mes vœux de santé, de bonheur et de prospérité.*

*« Fatima »*

## Liste des symboles

### Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
$\hbar$	Constante de Planck.	eV.s
$\nu$	Fréquence du photon.	S <sup>-1</sup>
C	Vitesse de la lumière dans le vide.	m/s
T	Température ambiante	°K
q	Charge élémentaire	C
$D_n$ et $D_p$	Coefficient de diffusion des électrons et des trous	Cm <sup>2</sup> /s
$L_n$ et $L_p$	Longueurs de diffusion des porteurs minoritaires dans le matériau n et p.	µm
W	Largeur de la zone de charge d'espace	µm
$\lambda$	Longueur d'onde.	µm
$N_A$ et $N_D$	Concentration en impuretés accepteurs et ou donneurs.	cm <sup>-3</sup>
$n_i$	Concentration intrinsèque.	cm <sup>-3</sup>
$J_{SC}$	Densité de courant de court circuit.	mA/c m <sup>2</sup>
$J_P$	Densité de courant de crête de la jonction.	mA/c m <sup>2</sup>
$J_{Tun}$	Densité du courant tunnel	mA/c m <sup>2</sup>
$\tau_n$ et $\tau_p$	Durée de vie des électrons et des trous.	µs
$V_{OC}$	Tension en circuit ouvert	V
$V_d$	Tension de diffusion	V

## Liste des symboles

FF	Facteur de forme	%
$\eta$	Rendement de conversion	%
$\Delta a$	Le désaccord de maille	%
$U_{\text{Auger}}$	Taux de recombinaison indirect.	%
$C_{p0}$ et $C_{n0}$	Coefficients de capture d'Auger du trou et de l'électron.	$\text{cm}^{-3}/\text{s}$
$C_p$ et $C_n$	Taux de génération optiques des paires électrons trous	$\text{cm}^{-3}/\text{s}$
B	Coefficient de la recombinaison radiative.	$\text{cm}^{-3}/\text{s}$
$n_0$	Indice de réfraction de l'air	
$\epsilon_r$	Permittivité relative	
$\epsilon$	Permittivité diélectrique	
K	Coefficient d'extinction.	
$c(C_{A-B})$	Paramètre de Bowing	
$\phi_m$	Travail de sortie du métal	eV
$\chi$	Affinité électronique	eV
$E_i$	Niveau de Fermi intrinsèque	eV
$\Delta E_C, \Delta E_V$	Discontinuité des bandes de conduction et de valence.	eV
$E_g$	L'énergie de la bande interdite.	eV
$E_{g0}$	L'énergie de gap à (T=25°).	
$\mu_n$ et $\mu_p$	Mobilité des électrons et des trous.	$\text{Cm}^2/\text{Vs}$
$\alpha$	Coefficient d'absorption	$\text{cm}^{-1}$
$S_n$ et $S_p$	Vitesse de recombinaison en surface des électrons et des trous.	Cm/s

## Liste des symboles

a	Constante de maille	Å
$N_c, N_v$	Densité effective d'état	$1/\text{cm}^3$
$N_t$	Densité d'état	$1/\text{cm}^3$
E	Champ électrique	V/cm
$P_{\max}$	Puissance maximale	$\text{mW}/\text{cm}^2$

## Nomenclature

**Z.C.E** : zone de charge d'espace.

**AM**: Air mass.

**AM0**: spectre solaire hors atmosphère.

**AM1.5**: spectre solaire terrestre.

**Top-cell**: Cellule supérieure.

**Bottom-cell**: Cellule inférieure.

**ARC**: Anti reflective coating.

**BSF**: Back surface field.

**FEM**: Finite element method (méthode des éléments finis).

**TJ**: Tunnel junction

**SRH**: Shockley read hall

# Table de matière

---

Introduction général.....	2
---------------------------	---

## **Chapitre 1 : Notions générales sur les matériaux semi-conducteurs**

1.Introduction.....	5
2.Classification des Matériaux.....	5
3.La structure atomique .....	7
4. La bande d'énergie.....	8
5. Gap direct et gap indirect.....	10
6. Niveau de Fermi.....	11
Conclusion.....	12

## **Chapitre 2: Les modèles physiques et équations fondamentales dans les semi-conducteurs.**

1. Introduction.....	15
2. Les modèles de simulation.....	15
3. La réflexion et la transmission .....	15
4. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs.....	17
4.1. Equation de Poisson .....	17
4.2. Equations de continuité.....	17
4.3. Equations de transport.....	18
4.3.1. Diffusion.....	19
4.3.2. Dérive (migration).....	19
5. Génération optique .....	20
6. Formation de la jonction p-n .....	20
7. La recombinaison .....	22
7.1. Recombinaison par piège .....	22
7.1.1. Recombination SRH (Shockley-Read-Hall) .....	22
7.1.2. Recombinaison en surface.....	23
7.1.3. Recombinaison en volume de type Auger.....	24
7.1.4. Recombinaison Radiative.....	25
Conclusion.....	26

# Table de matière

---

## **Chapitre 3: l'état de l'art sur les photovoltaïques**

1. Introduction.....	28
2. Les technologies de cellules photovoltaïques et leurs rendements.....	28
2.1. Les cellules de première génération.....	28
2.2. Les cellules de deuxième génération.....	30
2.3. Les cellules de troisième génération.....	31
2.3.1. Les cellules nanocristallines.....	31
2.3.2. Les cellules à concentration.....	31
2.3.3. Les cellules organiques.....	31
2.4. Les cellules solaires à haut rendement de conversion.....	33
2.4.1. Les structures dites à contact localisé.....	33
2.4.2. La structure à contacts interdigités en face arrière IBC.....	33
2.4.3. La structure à hétérojonctions de silicium (Si-HJ).....	34
Conclusion.....	36

## **Chapitre 4: Le rayonnement solaire et les constituants d'une cellule solaire.**

1. Introduction.....	38
2. Le spectre solaire.....	38
3. La masse d'air.....	40
4. Le principe de l'effet photovoltaïque.....	41
4.1. Histoire de Cellules Solaires.....	41
4.2. L'Effet Photovoltaïque.....	41
4.3. Absorption du rayonnement dans le matériau (Propriétés optiques des semi-conducteurs).....	42
5. La structure de la cellule solaire.....	43
5.1. Texturisation.....	43
5.2. Les contacts.....	44
5.3. Fenêtre.....	45
5.4. Emetteur et base.....	45
5.5. BSF.....	45
5.6. Couche antireflet.....	46

# Table de matière

---

Conclusion.....	48
<b>Chapitre 5: Critères de choix et résultats de simulation.</b>	
Partie 1 : Critères de choix des différents paramètres de la cellule.....	49
1. Introduction.....	51
2. Les types de pertes.....	51
3.L'hétérojonction .....	52
4.La cellule solaire à multi-jonction.....	54
5. Le choix de la structure InGaP/ GaAs .....	54
6. La mise en tandem des cellules InGaP/GaAs .....	55
7. La jonction parasite .....	55
8. La jonction tunnel .....	57
8.1. Les types de la jonction tunnel.....	58
8.1.1.Tunnel dû au gap direct.....	58
8.1.2.Tunnel dû au gap indirect.....	58
8.2.Modélisation de la jonction tunnel.....	59
8.3.Calcul du courant tunnel .....	61
8.4. Critères de choix de la jonction tunnel.....	61
8.5. L'avantage de l'utilisation de la jonction tunnel.....	62
9. La couche fenêtre .....	62
10. Champ du Surface arrière (BSF) .....	63
11.Les propriétés de matériaux utilisés .....	63
11.1. Les critères adoptés pour faire l'alliage des matériaux semi conducteurs III-V	63
11.2.Propriétés des matériaux GaInP / GaAs.....	65
11.2.1.Propriétés de matériau InGaP.....	65
11.2.2.Propriétés de matériau GaAs.....	66
Conclusion.....	67
Partie 2 : Simulation de la cellule à hétérojonction optimisée.....	68
1. Introduction.....	69
2. Résultats de simulation.....	69
2.1. Logiciel de simulation.....	69

# Table de matière

---

2.2. La structure de la cellule .....	70
2.3. Le spectre solaire.....	71
3.Simulation de la cellule InGaP/GaAs .....	73
3.1. Simulation de la cellule InGaP .....	73
3.2. Simulation de la cellule GaAs .....	74
4. L'effet de la jonction tunnel .....	74
4.1. Comparaison entre les différentes jonctions tunnels.....	75
4.1.1. L'effet de la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel.....	75
5. L'effet de la couche fenêtre sur le rendement de la cellule .....	84
5.1. Variation de la fraction molaire de la couche fenêtre .....	85
6. L'effet de champ de la surface arrière (BSF) .....	90
7. Variation de l'épaisseur des bases .....	92
8. Variation des niveaux de dopage .....	95
8.1. Concentration de dopage des bases.....	95
8.2. Concentration de dopage des émetteurs .....	101
9. Effet de la température sur le rendement .....	106
10. Circuit équivalent de la cellule simulé InGaP/GaAs .....	111
Conclusion.....	113
Conclusion générale.....	116
Bibliographie .....	121

## Liste des figures

---

<b>Figure I-1:</b> Classification des matériaux par leur conductivité .....	05
<b>Figure I-2 :</b> Tableau périodique partielle .....	06
<b>Figure I-3 :</b> Modèle de bande .....	07
<b>Figure I-4 :</b> La structure atomique d'un silicium.....	08
<b>Figure I-5 :</b> Diagramme de bande d'énergie pour (A) : un conducteur, (B) : semi-conducteur, (C) : isolant. ....	09
<b>Figure I-6 :</b> Diagramme de bandes d'énergie : (a)semi-conducteur à gap direct, (b) semi-conducteur à gap indirect.....	10
<b>Figure I-7:</b> Distributions des porteurs et Le niveau de Fermi dans un : (a) semi conducteur intrinsèque, (b) un semi-conducteur de type n et (c) un semi-conducteur de type .....	12
<b>Figure II-1:</b> Angles d'incidence, de réflexion et de transmission.....	16
<b>Figure II-2:</b> La zone de charge d'espace .....	21
<b>Figure II-3:</b> Densité de porteurs d'une jonction p-n à l'équilibre .....	22
<b>Figure II-4:</b> Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège.....	23
<b>Figure II-5:</b> Mécanisme de recombinaison de type Auger.....	25
<b>Figure II-6:</b> Le processus de recombinaison de type radiatif.....	25
<b>Figure III-1:</b> (a) cellule mono cristalline, (b) poly cristalline.....	29
<b>Figure III-2:</b> Schéma de la structure (a) PERC (Passivated Emitter, Rear cell); (b) PERL (Passivated Emitter, Rear Locally-doped); (c) PERT (Passivated Emitter, Rear Totallydiffused); (d) PERF (Passivated Emitter, Rear Floating-junction).....	33
<b>Figure III-3:</b> À gauche : une coupe cellule (IBC), à droite : une cellule (IBC) vue d'en bas....	34
<b>Figure III-4:</b> Une cellule à hétérojonction a-Si:H/c-Si.....	34
<b>Figure III-5:</b> Schémas d'une structure d'une cellule solaire IBC Si - HJ INES .....	35
<b>Figure IV-1:</b> La répartition du spectre des ondes électromagnétiques.....	39
<b>Figure IV-2:</b> Spectre AM0, AM1 et AM1, 5.....	40
<b>Figure IV-3:</b> Création du courant électrique sous l'effet de la lumière.....	41
<b>Figure IV-4:</b> Profondeur de pénétration et coefficient d'absorption de quelques semi-conducteurs à 300 K en fonction de la longueur d'onde .....	43
<b>Figure IV-5:</b> Comparaison entre la réflexion de la lumière incidente sur une surface texturée et une surface lisse. I : intensité lumineuse incidente, R : coefficient de réflexion, T : coefficient de transmission. ....	44
<b>Figure IV-6:</b> Couche antireflet d'une cellule photovoltaïque.....	46
<b>Figure IV-7:</b> Structure d'une cellule photovoltaïque.....	47

## Liste des figures

---

<b>Figure V-1:</b> Différents pertes de la cellule solaire.....	52
<b>Figure V-2:</b> Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype :(a) avant contact, (b) après Contact.....	53
<b>Figure V-3:</b> Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotype : avant contact, (b) après contact.....	53
<b>Figure V-4:</b> La cellule solaire à hétérojonction. ....	55
<b>Figure V-5:</b> La jonction parasite. ....	56
<b>Figure V-6:</b> Cellule solaire de type tandem avec des contacts.....	56
<b>Figure V-7:</b> Cellule tandem avec une jonction tunnel.....	57
<b>Figure V-8:</b> Diagramme de bande de dopage de la jonction tunnel.....	58
<b>Figure V-9:</b> (a) Gap direct. (b) Gap indirect.....	58
<b>Figure V-10:</b> L'effet de la jonction tunnel.....	60
<b>Figure V-11:</b> Conception de la cellule InGaP/GaAs optimisée.....	71
<b>Figure V-12:</b> Le spectre solaire AM1.5 illuminant la cellule solaire. ....	71
<b>Figure V-13:</b> Conception de la structure de la cellule InGaP optimisée.....	73
<b>Figure V-14:</b> Caractéristique I-V de la cellule InGaP.....	73
<b>Figure V-15:</b> Conception de la structure de la cellule GaAs optimisée.....	74
<b>Figure V-16:</b> Caractéristique I-V de la cellule GaAs. ....	74
<b>Figure V-17:</b> Variation de $\eta$ et FF de la cellule solaire InGaP/GaAs en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel.....	76
<b>Figure V-18:</b> Le courant ( $J_{SC}$ ) de la cellule solaire InGaP/GaAs en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel .....	77
<b>Figure V-19:</b> Variation du rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs-GaAs. ....	79
<b>Figure V-20:</b> Variation du $J_{SC}$ de la cellule en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs-GaAs.....	79
<b>Figure V-21:</b> Variation de $J_{SC}$ de la cellule en fonction de l'épaisseur de la JT de type InGaP-GaAs.....	80
<b>Figure V-22:</b> Variation du rendement et FF de la cellule en fonction de l'épaisseur de la JT de type InGaP-GaAs.....	81
<b>Figure V-23:</b> Variation du rendement en fonction du type de jonction tunnel utilisée. ....	82

## Liste des figures

---

<b>Figure V-24:</b> Variation de l'intensité de courant en fonction du type de jonction tunnel utilisée.....	82
<b>Figure V-25:</b> Variation de l'intensité de courant en fonction du type de jonction tunnel utilisée. ....	83
<b>Figure V-26:</b> Simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs sans la jonction tunnel. ....	83
<b>Figure V-27:</b> Simulation de cellule solaire tandem sans la couche fenêtre.....	84
<b>Figure V-28:</b> Simulation de la cellule solaire avec la couche fenêtre.....	85
<b>Figure V-29:</b> Variation de $V_{OC}$ en fonction de la fraction molaire d'Indium.....	86
<b>Figure V-30:</b> Variation de $J_{SC}$ en fonction de la fraction molaire d'indium.....	87
<b>Figure V-31:</b> Variation de rendement en fonction de la fraction molaire d'Indium.....	87
<b>Figure V-32:</b> Variation de FF en fonction de la fraction molaire d'indium. ....	88
<b>Figure V-33:</b> Variation du $V_{OC}$ en fonction de la fraction molaire d'Arséniure. ....	88
<b>Figure V-34:</b> Variation de la $J_{SC}$ en fonction de la fraction molaire d'Arséniure.....	89
<b>Figure V-35:</b> Variation de FF en fonction de la fraction molaire d'arséniure.....	89
<b>Figure V-36:</b> Variation du rendement en fonction de la fraction molaire d'arséniure.....	90
<b>Figure V-37:</b> Caractéristique I-V sans la couche BSF de la cellule GaAs. ....	91
<b>Figure V-38:</b> Caractéristique I-V sans la couche BSF de la cellule InGaP.....	91
<b>Figure V-39:</b> Caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs avec les BSFs des deux jonctions. ....	92
<b>Figure V-40:</b> Variation du rendement, FF, $V_{OC}$ et $J_{SC}$ en fonction de l'épaisseur de la base InGaP. ....	94
<b>Figure V-41:</b> Variation de rendement, FF, $V_{OC}$ , $J_{SC}$ en fonction de l'épaisseur de la base GaAs.....	95
<b>Figure V-42:</b> Variation de $J_{SC}$ en fonction du dopage la base InGaP.....	96
<b>Figure V-43:</b> Variation de $V_{OC}$ en fonction du dopage la base InGaP.....	97
<b>Figure V-44:</b> Variation de FF en fonction du dopage la base InGaP. ....	97
<b>Figure V-45:</b> Variation du rendement en fonction du dopage la base InGaP.....	98
<b>Figure V-46:</b> Variation du $J_{SC}$ en fonction du dopage la base GaAs. ....	99

## Liste des figures

---

<b>Figure V-47:</b> Variation du $V_{OC}$ en fonction du dopage la base GaAs. ....	99
<b>Figure V-48:</b> Variation du FF en fonction du dopage la base GaAs.....	100
<b>Figure V-49:</b> Variation du rendement en fonction du dopage la base GaAs.....	100
<b>Figure V-50:</b> Variation de $J_{SC}$ en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP .....	102
<b>Figure V-51:</b> Variation de $V_{OC}$ en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP. .....	102
<b>Figure V-52:</b> Variation du rendement en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP.....	103
<b>Figure V-53:</b> Variation du FF en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP. .....	103
<b>Figure V-54:</b> Variation du $J_{SC}$ en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs.....	104
<b>Figure V-55:</b> Variation du $V_{OC}$ en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs.....	105
<b>Figure V-56:</b> Variation du $\eta$ en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs.....	105
<b>Figure V-57:</b> Variation du FF en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs. .....	106
<b>Figure V-58:</b> Variation des paramètres de mérite en fonction de la température.. ....	107
<b>Figure V-59:</b> Variation du rendement en fonction de la température.....	107
<b>Figure V-60:</b> Variation du rendement et l'énergie de gap de la cellule InGaP. ....	109
<b>Figure V-61:</b> Variation du rendement et l'énergie de gap de la cellule GaAs.....	109
<b>Figure V-62:</b> Variation d'énergie de gap et le rendement de la cellule InGaP/GaAs.....	110
<b>Figure V-63:</b> Variation du rendement et la puissance maximale en fonction de la température.....	110
<b>Figure V-64:</b> Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction (InGaP/GaAs).....	112
<b>Figure V-65:</b> Structure de la cellule InGaP/GaAs sous Silvaco.....	112
<b>Figure V-66:</b> Maillage de la cellule InGaP/GaAs.....	113

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau I-1:</b> Alliage de quelques matériaux III-V et II-VI.....	07
<b>Tableau I-2:</b> Énergie de gap des semi-conducteurs.....	10
<b>Tableau III-1:</b> La structure et le rendement de chaque génération.....	28
<b>Tableau III-2:</b> Cellules solaires de 1 <sup>ère</sup> génération (Green 2017) .....	29
<b>Tableau III-3:</b> Des cellules solaires de 2 <sup>ème</sup> génération.....	31
<b>Tableau III-4:</b> Exemples de cellules solaires de 3 <sup>ème</sup> génération.....	32
<b>Tableau IV-1:</b> Longueur d'onde de quelques semi-conducteurs utilisés en fonction de la couleur de la lumière.....	39
<b>Tableau IV-2:</b> L'indice de réfraction de quelques matériaux.....	46
<b>Tableau V-1:</b> Valeurs des paramètres de Bowing pour des matériaux ternaires utilisés .....	64
<b>Tableau V-2:</b> Valeurs des constantes de réseau de différents matériaux utilisés.....	65
<b>Tableau V-3:</b> Les propriétés de matériau $Ga_{(x)}In_{(1-x)}P$ à 300k. ....	66
<b>Tableau V-4:</b> Les propriétés de matériau GaAs à 300k.....	67
<b>Tableau V-5:</b> La comparaison entre la discrétisation avec la méthode de différences finies et la méthode des éléments finis (FEM).....	70
<b>Tableau V-6:</b> Les longueurs d'ondes des matériaux utilisés.....	72
<b>Tableau V-7:</b> Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP-InGaP.....	76
<b>Tableau V-8:</b> Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs-GaAs.....	78
<b>Tableau V-9:</b> Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP-GaAs.....	80
<b>Tableau V-10:</b> Variation du rendement, FF, $V_{OC}$ et $J_{SC}$ selon le type de la jonction tunnel utilisée. ....	81
<b>Tableau V-11:</b> Résultats des variations de FF, $J_{SC}$ , $V_{OC}$ et $\eta$ en fonction de la fraction molaire.....	86
<b>Tableau V-12:</b> Résultats de variation de l'épaisseur des bases.....	93
<b>Tableau V-13:</b> Résultats de variation de concentrations de dopage de base InGaP.....	96
<b>Tableau V-14:</b> Résultats de variation de concentrations de dopage de base GaAs.....	98
<b>Tableau V-15:</b> Résultats de variation de concentrations de dopage de l'émetteur InGaP.....	101
<b>Tableau V-16:</b> Résultats de variation de concentrations de dopage de l'émetteur GaAs.....	104
<b>Tableau V-17:</b> Variation du rendement en fonction de la température.....	106
<b>Tableau V-18:</b> Énergie de gap des matériaux $In_{0,5}Ga_{0,5}P$ et GaAs... ..	108

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau V-19:</b> Variation de l'énergie de gap en utilisant la loi de Varshni. ....	108
---	-----

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

---

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

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

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

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

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

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

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

# Introduction générale

---

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les semi-conducteurs en basant sur les matériaux III-V et leurs propriétés.

Le deuxième chapitre est consacré aux différents modèles physiques et équations fondamentales dans les semi-conducteurs à résoudre pendant la simulation de la cellule solaire et les différents modèles de mobilité des porteurs de charges.

Dans le troisième chapitre, nous abordons une synthèse de l'état de l'art sur les photovoltaïques et l'amélioration des cellules solaires.

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

En fin, dans le cinquième chapitre, nous avons présenté dans une première partie les critères de choix des différents paramètres de la cellule. Dans une deuxième partie, nous avons effectué des simulations de la cellule à hétérojonction optimisée à base des matériaux InGaP/GaAs en variant les paramètres technologiques (fraction molaire, épaisseurs, dopages) et l'effet de la température en utilisant le logiciel TcadSilvaco.

## **Chapitre 1**

# **Notions Générales sur les Semi-Conducteurs**

# Notions Générales sur les Semi-conducteurs

## 1. Introduction

Dans le domaine photovoltaïque, l'un des buts importants des chercheurs scientifiques est d'augmenter le rendement des cellules solaires. Ce rendement est amélioré en augmentant le nombre des jonctions. Chaque jonction est capable d'exploiter une certaine partie du spectre solaire.

Les matériaux semi-conducteurs inorganiques spécifiquement les matériaux III-V ont un rôle important dans l'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques. Dans ce chapitre on va entamer les fondamentales des semi conducteurs.

## 2. Classification des Matériaux

Les matériaux peuvent être classés en trois types selon leurs propriétés électriques : conducteurs, isolants ou semi-conducteurs. Les cellules solaires sont construites à base des matériaux semi-conducteurs. Cependant, ces matériaux peuvent agir en tant qu'isolants ou conducteurs [1]. La conductivité  $\sigma$  est un paramètre très important dans l'identification de type de matériau. La capacité d'un matériau à conduire l'électricité dépend de plusieurs facteurs ; parmi lesquels la structure atomique et l'énergie de bande interdite [2].

En basant sur la conductivité électrique, la classification des matériaux est illustrée dans la figure 1. Le semi conducteur se trouve entre le conducteur et l'isolant.

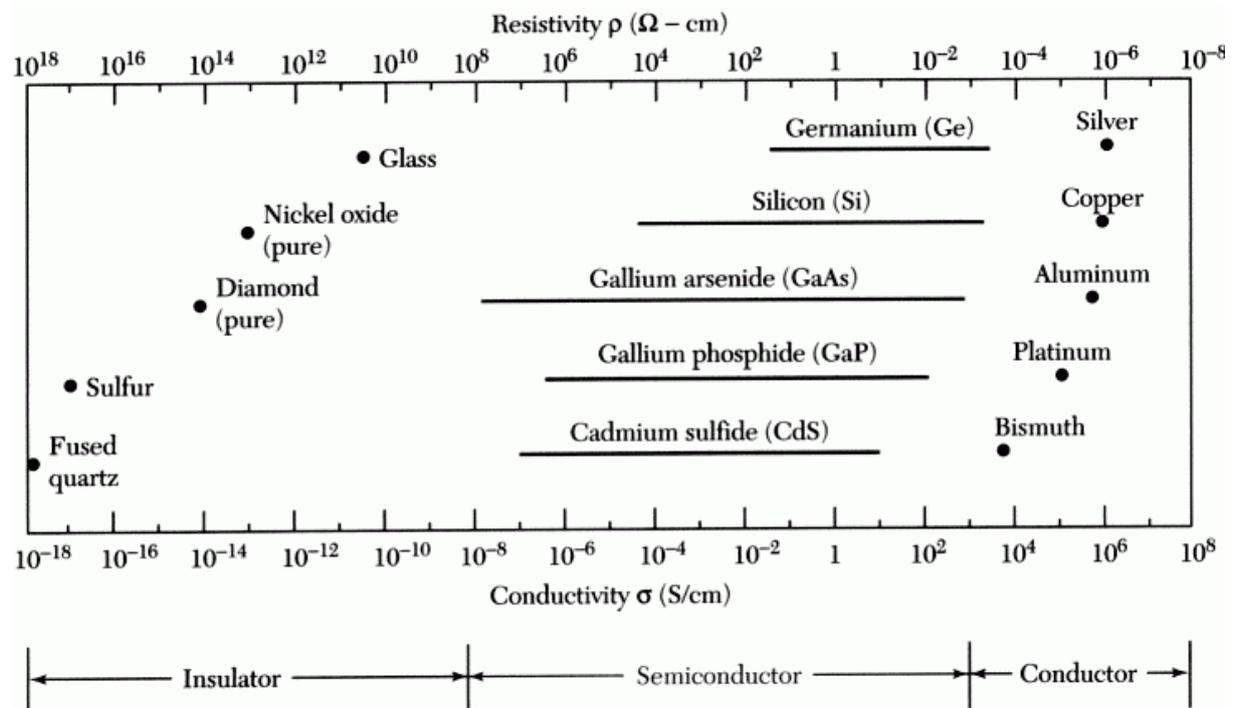


Figure I-1 : Classification des matériaux par leur conductivité [3].

## Notions Générales sur les Semi-conducteurs

Entre les métaux et les isolants se trouvent les semi-conducteurs (SC) dont la résistivité varie de  $10^{-8}$  à  $10^3 \Omega\text{cm}$  (ou plus).

Les Semi-conducteurs peuvent se trouver en deux formes simple ou composé. Le silicium (Si) et le Germanium (Ge) sont deux exemples des semi-conducteurs simples. Ces deux semi-conducteurs appartiennent au groupe IV du tableau de Mendeleïev comme le montre la figure 2.

		3A	13	4A	14	5A	15	6A	16		
		5	<b>B</b>	6	<b>C</b>	7	<b>N</b>	8	<b>O</b>		
		10.811	Boron	12.0107	Carbon	14.0067	Nitrogen	15.9994	Oxygen		
		13	<b>Al</b>	14	<b>Si</b>	15	<b>P</b>	16	<b>S</b>		
		26.9815	Aluminum	28.0855	Silicon	30.9738	Phosphorus	32.065	Sulfur		
<b>2B</b>	<b>12</b>	30	<b>Zn</b>	31	<b>Ga</b>	32	<b>Ge</b>	33	<b>As</b>	34	<b>Se</b>
		65.409	Zinc	69.723	Gallium	72.64	Germanium	74.9216	Arsenic	78.96	Selenium
		48	<b>Cd</b>	49	<b>In</b>	50	<b>Sn</b>	51	<b>Sb</b>	52	<b>Te</b>
		112.411	Cadmium	114.818	Indium	118.710	Tin	121.760	Antimony	127.60	Tellurium
		80	<b>Hg</b>	81	<b>Tl</b>	82	<b>Pb</b>	83	<b>Bi</b>	84	<b>Po</b>
		200.59	Mercury	204.383	Thallium	207.2	Lead	208.9804	Bismuth	[209]	Polonium

Figure I- 2 : Tableau périodique partielle [4].

Les semi-conducteurs composés sont un alliage entre des éléments de groupe III et V respectivement comme le phosphure d'Aluminium (AlP), Nitride de Gallium (GaN), phosphure d'Indium (InP), arsénite de Gallium (GaAs) [2].

Il est possible de faire un alliage entre plusieurs éléments de groupe III ou V avec d'autres éléments d'un groupe différent, En formant un semi-conducteur composé, comme exemple le phosphure de Gallium d'Indium ( $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ ) et arsénite nitrogène d'Indium de Gallium ( $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}_{1-y}\text{As}_y$ ). Le x et y spécifie la fraction molaire des composés [5].les fabricants des composants semi-conducteurs font un alliage entre les éléments de groupe II-V, comme Oxide de Zinc (ZnO), tellure de Cadmium (CdTe), Sulfite de Mercure (HgS) [2].

# Notions Générales sur les Semi-conducteurs

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

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

### 3. La structure atomique

Les éléments du tableau périodique sont arrangés selon leur nombre de protons, neutrons, et électrons. Basant sur la théorie de Niels Bohr, les électrons d'un atome gravitent autour de noyau. La plus proche orbite a un maximum de deux électrons, alors que toutes les autres orbites ont un maximum de huit électrons. Les orbites qui sont plus proches de noyau sont remplies premièrement. Les éléments du groupe IV, comme le germanium (Ge) par exemple a quatre électrons dans la couche extérieure, ou celle de valence de leur atome.

Dans la Figure 3, les atomes de semi-conducteurs partagent leurs quatre électrons de la bande de valence pour remplir cette couche extérieure avec le maximum nombre des électrons.

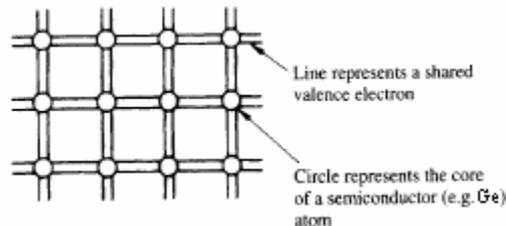


Figure I-3 : Modèle de bande [6].

## Notions Générales sur les Semi-conducteurs

Chaque atome est capable de partager leurs électrons de la couche extérieure avec quatre atomes. Chaque paire d'électrons partagée permet de former une liaison covalente. Donc les atomes tendent à remplir leurs couches de valence pour atteindre la stabilité atomique. Par exemple les éléments de groupe III du tableau périodique ont trois électrons libres dans leur couche extérieure. La combinaison de ces éléments sera avec des éléments de groupe V. Ces derniers reçoivent des électrons pour remplir leur couche extérieure. Par conséquent un semi-conducteur composé est produit à travers les liaisons covalentes [1] [5].

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

Quand les atomes de silicium sont liés, les électrons de l'orbite extérieure forment des liaisons covalentes. Par conséquent, le silicium forme des liaisons avec d'autres atomes de silicium. [1].

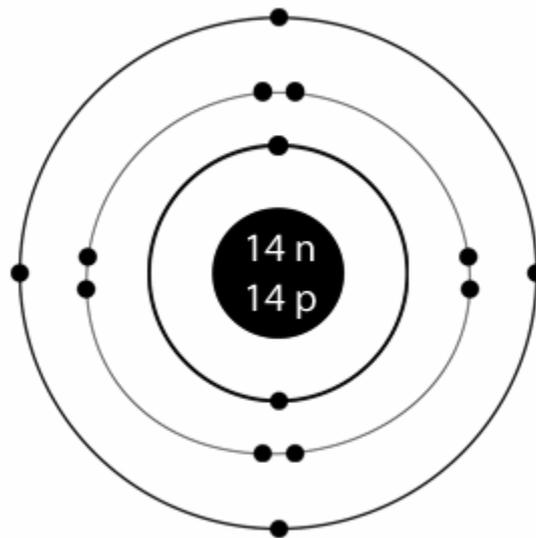


Figure I-4 : La structure atomique d'un silicium [7].

### 4. La bande d'énergie

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

## Notions Générales sur les Semi-conducteurs

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

Quand un électron est dans la bande de valence, une liaison covalente apparaît. Un électron nécessite une certaine énergie pour déplacer de la bande de valence à la bande de conduction, cette énergie doit être supérieure à l'énergie de gap. L'énergie de gap est l'énergie minimum nécessaire pour qu'un électron saute de la bande de valence vers la bande de conduction [2].

La figure 4 montre le diagramme de bande pour les conducteurs, les isolants, et les semi-conducteurs. Dans le cas de conducteur, l'énergie de gap est faible, ou non existante. Par contre, les isolants ont un gap élevé.

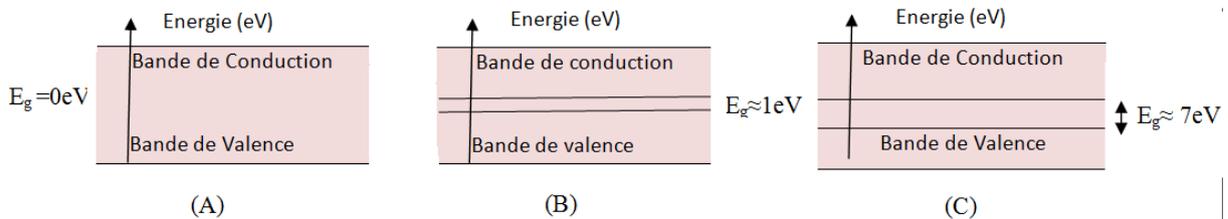


Figure I-5 : Diagramme de bande d'énergie pour (A) : un conducteur, (B) : semi-conducteur, (C) : isolant.

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

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

Où  $E_{g_{300K}}$  est l'énergie de gap du matériau à 300 K.  $\alpha$  et  $\beta$  sont des valeurs spécifiques pour chaque semi conducteur [9]. Le tableau suivant montre l'énergie de gap des quelques matériaux semi-conducteurs.

# Notions Générales sur les Semi-conducteurs

Matériau	Energie de gap (eV) à 300K
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.90
InGaP	1.42

Tableau I- 2. Énergie de gap des semi-conducteurs [10].

## 5. Gap direct et gap indirect

L'énergie de gap est l'énergie minimum nécessaire pour un électron passant de la bande de valence à la bande de conduction. Il existe deux types de semi-conducteurs, un semi-conducteur à gap direct et un semi-conducteur à gap indirect [2].

La notion de gap peut être illustrée par la relation de dispersion  $E_{c,v}(k)$  comme illustré dans la figure 6.  $E_C$  signifie le bas de la bande de conduction,  $E_V$  est le haut de la bande de valence alors que  $(k)$  est le vecteur d'onde associé à un électron [11].

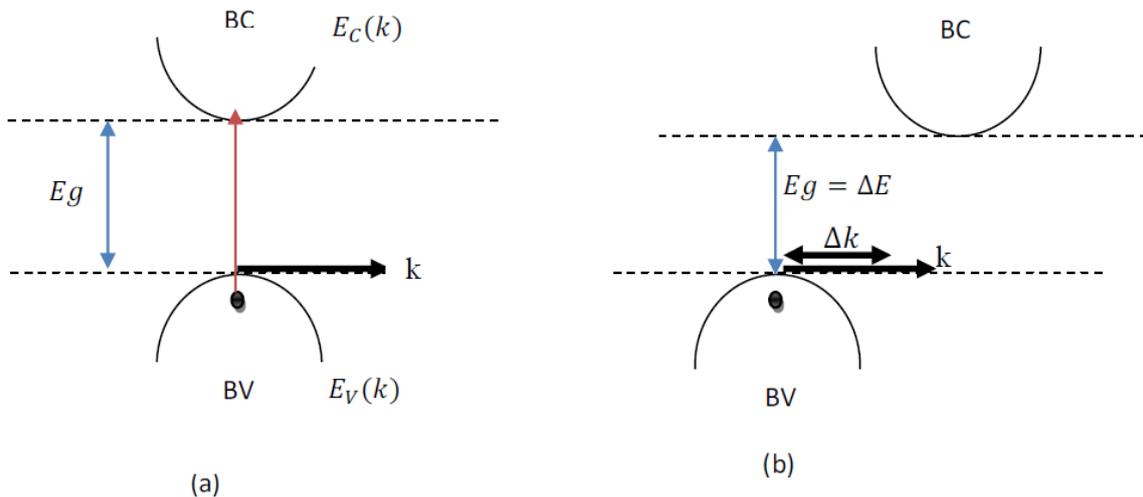


Figure I-6 : Diagramme de bandes d'énergie : (a)semi-conducteur à gap direct, (b) semi-conducteur à gap indirect.

## Notions Générales sur les Semi-conducteurs

---

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

Par contre, la bande de valence et la bande de conduction ont un vecteur d'onde  $k$  différent, dans ce cas le semi-conducteur a un gap indirect [3].

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

Généralement, les semi-conducteurs à gap direct sont mieux utilisés pour l'optoélectronique. Le silicium est un semi-conducteur à gap indirect. Par contre l'Arséniure de Gallium est un semi-conducteur à gap direct [3].

### 6. Niveau de Fermi

Le niveau de Fermi est défini comme étant la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie  $E$  par un électron à la température  $T$ . Cette probabilité est exprimée par la fonction de Fermi suivante [12] [13].

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/KT}} \quad (I-2)$$

$E$  : la fonction d'énergie d'électron

$E_f$ : le niveau de Fermi [eV].

$K$ : la constante de Boltzmann  $8.617 \times 10^{-5}$  [eV.K<sup>-1</sup>].

$T$ : la température en Kelvin.

Le niveau de Fermi dépend du dopage du semi-conducteur, la figure 6 montre la distribution des porteurs [10] [14].

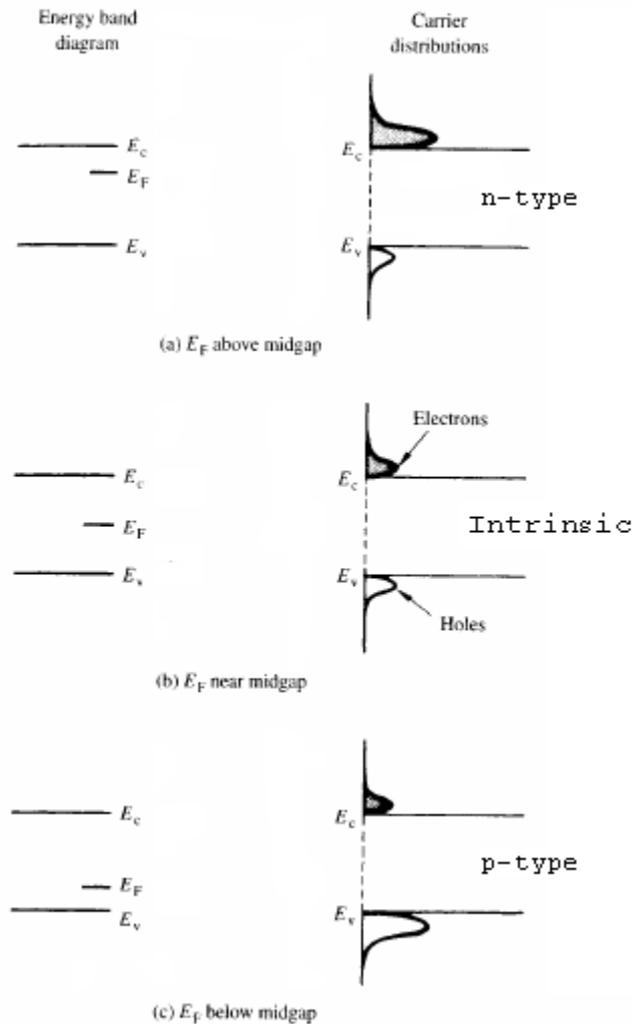


Figure I-7 : Distributions des porteurs et Le niveau de Fermi dans un : (a) semi-conducteur intrinsèque, (b) un semi-conducteur de type n et (c) un semi-conducteur de type p [2].

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

## Conclusion

Ce chapitre fournit les principes de base des semi-conducteurs. La base a été établie du point de vue physique. Nous avons présenté les différents types de semi-conducteur

## **Notions Générales sur les Semi-conducteurs**

---

(intrinsèque et extrinsèque), structures de bandes d'énergies des semi-conducteurs et leurs propriétés. Ces propriétés déterminent les caractéristiques du dispositif photovoltaïques.

# Chapitre 2

## Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-Conducteurs

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

## 1. Introduction

La simulation numérique des cellules solaires nécessite une précision du résultat. Pour cela, le choix des modèles physiques est très important. L'utilisation du logiciel SILVACO permet d'utiliser une variété de modèles physiques. L'utilisateur de ce logiciel doit choisir des modèles par rapport à d'autres. Les modèles choisis doivent être adéquats avec les mécanismes physiques et les conditions d'utilisation des cellules solaires.

Dans ce chapitre, nous allons entamer les différents types des modèles physiques ainsi que l'importance du choix de ces modèles pour la précision du résultat de simulation. Premièrement, nous présentons les équations fondamentales appliquées dans les matériaux semi-conducteurs. Nous exposons ensuite un rappel sur les modèles utilisés (optique, de recombinaison et de mobilité des porteurs considérés) afin de simuler le fonctionnement des cellules solaires à hétérojonctions.

## 2. Les modèles de simulation

En l'absence d'ionisation par impact c.-à-d. chaque photon peut générer une paire électron/trou, si  $h\nu > E_g$ . Les modèles utilisés dans la simulation de notre structure sont :

- Le modèle de recombinaisons en volume est : Radiatif, Auger, Shockley Read Hall (SRH) et recombinaison en surface,
- le modèle de rétrécissement de la bande interdite avec le dopage (band gap narrowing),

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'une cellule solaire, il est nécessaire de connaître plus sur les théories de la lumière, l'interaction de la lumière avec les matériaux, et comment un électron et un trou sont produits dans une jonction p-n, et donc la création du courant électrique. Nous avons utilisé la géométrie optique dans cette thèse. Dans la géométrie, la lumière est définie par les rayons lumineux. Chaque rayon se déplace avec une certaine énergie. Pour cela, on doit connaître les formules qui indiquent le champ électrique à n'importe quelle place. Ces formules peuvent être calculées pour chaque rayonnement transmis ou réfléchi [15].

## 3. La réflexion et la transmission

La figure ci-après montre la relation entre les angles d'incidence ( $\theta_i$ ), de réflexion ( $\theta_r$ ), et de transmission ( $\theta_t$ ) à l'interface entre les deux milieux.

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

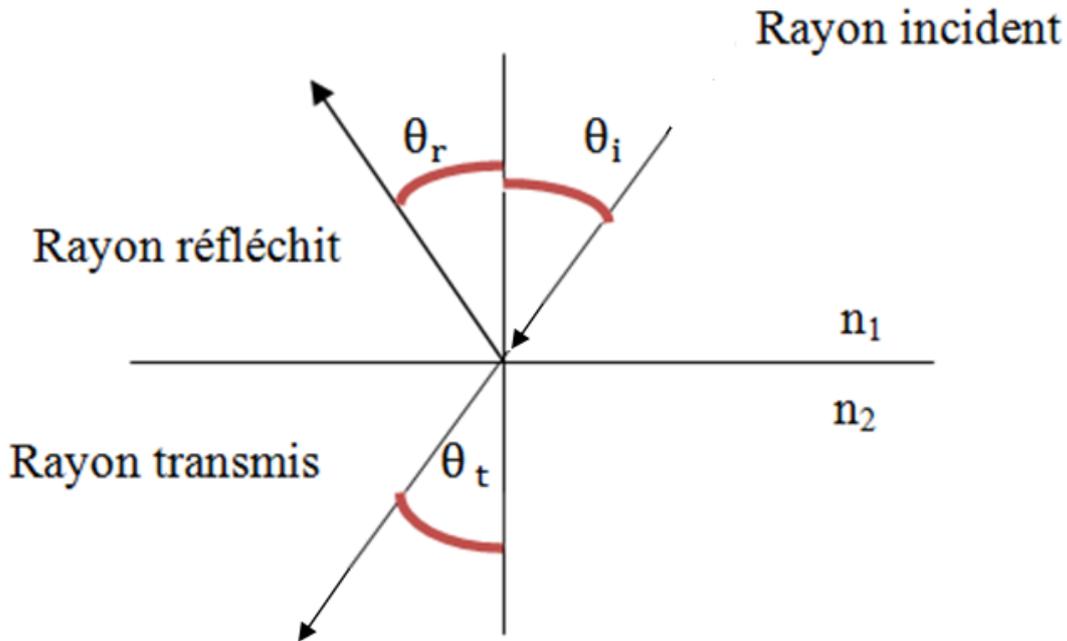


Figure II-1: Angles d'incidence, de réflexion et de transmission [15].

Les coefficients de réflexion et de transmission de la lumière sont calculés en fonction des indices réfractifs dans les deux milieux comme suit [15-17]:

$$E_r = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} E_i \quad (\text{Parallèle p ou polarisation TE}) \quad (\text{II-1})$$

$$E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} E_i \quad (\text{Parallèle p ou polarisation TE}) \quad (\text{II-2})$$

$$E_r = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \quad (\text{Perpendiculaire s ou polarisation TM}) \quad (\text{II-3})$$

$$E_t = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} E_i \quad (\text{Perpendiculaire s ou polarisation TM}) \quad (\text{II-4})$$

$$R = \left( \frac{E_r}{E_i} \right)^2 \quad (\text{Perpendiculaire s ou polarisation TM}) \quad (\text{II-5})$$

$$T = \frac{\left( \frac{E_r}{E_i} \right)^2 (n_2 \cos \theta_t)}{n_1 \cos \theta_i} \quad (\text{Perpendiculaire s ou polarisation TM}) \quad (\text{II-6})$$

$E_i$ ,  $E_r$  et  $E_t$  représentent le champ électrique des ondes incidentes, réfléchis et transmises respectivement.

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

R : Coefficient de réflexion.

T : Coefficient de transmission.

$\theta_i$  : Angle d'incidence.

$\theta_t$  : Angle de transmission.

$n_1$  et  $n_2$  représente l'indice de réfraction des milieux 1 et 2.

## 4. Equations fondamentales dans les semi-conducteurs

Les équations de base décrivent le comportement des porteurs de charge dans des semi-conducteurs sous l'influence d'un champ électrique et / ou de la lumière sont :

Equation de Poisson, équations de continuité, et équations de transport [18].

### 4.1. Equation de Poisson

L'équation de Poisson relie le potentiel électrostatique à la densité locale de charge. Elle est donnée par l'équation suivante [19]:

$$\Delta(\epsilon\Delta\phi) = -\rho \quad (\text{II-7})$$

$\phi$  est le potentiel électrostatique,  $\epsilon$  est la permittivité locale, et  $\rho$  est la densité locale de charge. Cette densité est la somme de contributions de toutes les charges fixes et mobiles, contenant les électrons, les trous, et les impuretés ionisés.

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

Avec :

$q=1.6 \cdot 10^{-19}$  Cb : La charge élémentaire.

$p, n$  : Densités d'électrons et de trous libres.

$N_D^+, N_A^-$  : Densités d'atomes donneurs et accepteurs ionisés.

$\sum N_t$  : La somme de pièges dans un centre profond ; elle est généralement négligeable. Donc l'équation 7 s'écrit comme :

$$\overrightarrow{\text{div}} \epsilon \overrightarrow{\text{grad}}\phi = q(n - p + N_A^- - N_D^+ + \sum N_t) \quad (\text{II-9})$$

### 4.2. Equations de continuité

Les équations de continuité donnent la variation des concentrations des porteurs à chaque instant. Cette variation des concentrations des trous ou des électrons est due à la création de paires électron-trou, les générations-recombinaisons internes, et à la présence des courants de conduction ou diffusion.

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont décrites comme suit [15] [20] [21]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 1/q \operatorname{div} \vec{j}_n + G_n - R_n \quad (\text{II-10})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -1/q \operatorname{div} \vec{j}_p + G_p - R_p \quad (\text{II-11})$$

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

### 4.3. Equations de transport

Généralement, dans les équations de la physique des semi-conducteurs, le champ magnétique extérieur est nul et la température est uniforme dans toute la structure. Un courant électrique est apparu grâce au champ électrique et est appelé courant du champ ou courant de drift qui est déterminé grâce au gradient des concentrations des porteurs de charge (courant de diffusion).

La densité de courant de dérive des électrons dans la bande de conduction est donnée par [15]:

$$\vec{j}_n = -q\mu_n n \nabla \phi_n \quad (\text{II-12})$$

$$\vec{j}_p = -q\mu_p p \nabla \phi_p \quad (\text{II-13})$$

Où  $\mu_n$  and  $\mu_p$  sont les mobilités des électrons et des trous;  $\phi_n$  et  $\phi_p$  sont les niveaux de quasi-Fermi des électrons et des trous.

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

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

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

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

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

$$J_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi + \mu_p p (kT_L \nabla (\ln n_{ie})) \quad (\text{II-17})$$

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

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

$$D_n = (KT/q) \tag{II-18}$$

$$D_p = (KT/q) \tag{II-19}$$

### 4.3.1. Diffusion

La concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semi-conducteur est la cause de création des courants de diffusion. Une charge électrique se déplace d'une zone de concentration élevée vers une zone d'une concentration moins élevée. La densité de courant de diffusion est décrite selon la loi de Fick [22] :

$$F = D \cdot \vec{\nabla}C \tag{II-20}$$

Ou  $F$  : est Le flux de particules et  $\vec{\nabla}C$  est le gradient de leur concentration.

Donc, les équations de dérive-diffusion qui sont la somme du courant de dérive des électrons et du courant de diffusion des électrons et celui qui présente la somme du courant de dérive des trous et du courant de diffusion des trous :

$$\vec{J}_{n,diff} = -q\vec{F}_n = qD_n\vec{\nabla}_n \tag{II-21}$$

$$\vec{J}_{p,diff} = q\vec{F}_p = -qD_p\vec{\nabla}_p \tag{II-22}$$

$D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous respectivement.

### 4.3.2. Dérive (migration)

Dérive est défini comme étant le mouvement des charges grâce à un champ électrique appliqué. La force, qui résulte quand un champ électrique est appliqué à un semi-conducteur, accélère les particules chargées positivement (les trous  $q+$ ) dans la direction du champ électrique et les particules chargées négativement (les électrons  $q-$ ) dans la direction opposée au champ électrique.

La mobilité des électrons  $\mu_n$  et celle des trous  $\mu_p$  sont toujours pris positives. La direction et la vitesse de migration des porteurs sont données par les relations [12]:

Pour les électrons :  $\vec{v}_n = -\mu_n\vec{E}$

Pour les trous :  $\vec{v}_p = \mu_p\vec{E}$

Donc le courant de dérive associé aux électrons et aux trous est donné par :

$$\vec{J}_{n,drift} = -qn\vec{v}_n \tag{II-23}$$

$$\vec{J}_{p,drift} = qp\vec{v}_p \tag{II-24}$$

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

## 5. Génération optique

La génération est définie comme un processus par lequel les électrons et les trous sont créés [23]. La génération des électrons et des trous comme indiquée par les équations de continuité est faite grâce au rayonnement lumineux. Cette dernière est connue comme une génération optique. Quand la lumière frappe un semi-conducteur, elle excite et génère les porteurs de charge par des transitions de la bande de valence à la bande de conduction (transition directe) dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque ou par des transitions indirectes dans le cas d'un semi-conducteur extrinsèque. Le déplacement des porteurs permet de créer des paires électrons-trous. Cette recombinaison évite la création du courant électrique. Il faut, donc séparer ces charges en réalisant la jonction p-n.

## 6. Formation de la jonction p-n

La formation de la jonction p-n permet de contrôler les caractéristiques électriques du matériau. La jonction p-n est formée par le dopage du matériau avec des impuretés. Elle comporte deux parties, l'une est dopée par des accepteurs(p) et l'autre est dopée par des donneurs (n) [5].

Lorsqu'on met en contact un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p, un état d'équilibre est établi par la diffusion des porteurs. Les porteurs majoritaires (trous) diffusent de la région de type p vers la région de type n où se recombinent avec les électrons. Les porteurs majoritaires (électrons) de la région de type n diffusent vers la région de type p. Par conséquent une région contenant des charges fixes négatives et positives nommée la zone d'espace (ZCE) d'une faible épaisseur  $W_0$ . Cela fait apparaître un champ électrique opposé à la diffusion des porteurs de charge [2] [3] [8] [23] [24].

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

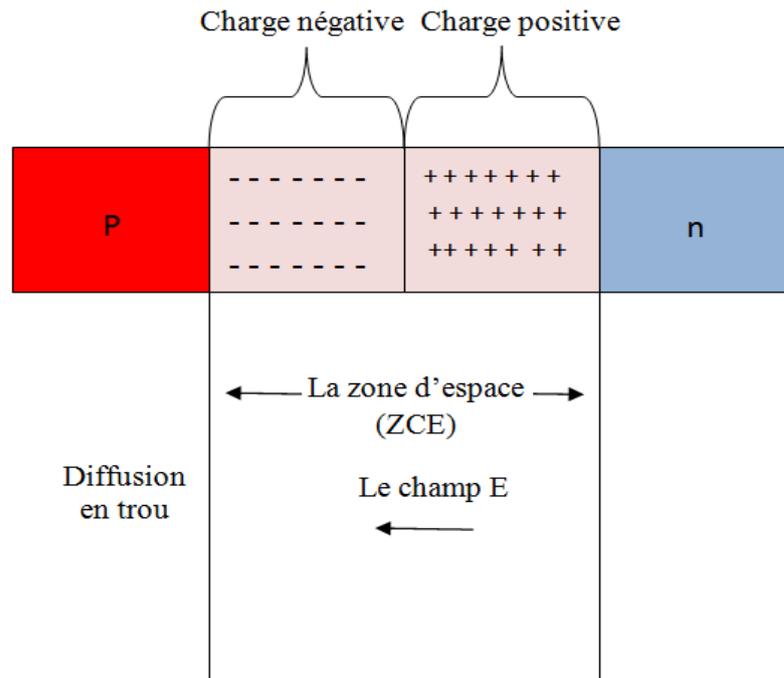


Figure II-2 : La zone de charge d'espace.

La zone de charge d'espace est caractérisée par une tension de potentiel associé au champ électrique. Cette différence de potentiel est appelée tension de diffusion  $V_D$ . Elle varie d'un potentiel  $V_p$  dans la région p à un potentiel  $V_n$  dans la région n.

$$V_D = V_n - V_p \tag{II-25}$$

$$V_D = \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q} \tag{II-26}$$

Où:

$F_n$  : niveau de Fermi dans la région n

$F_p$  : niveau Fermi dans la région p

$q$  : charge élémentaire

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

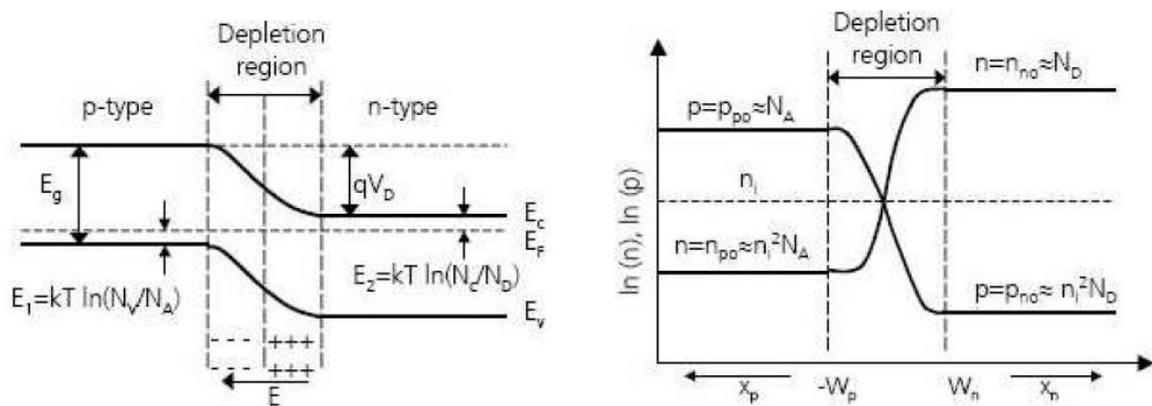


Figure II-3 : Densité de porteurs d'une jonction p-n à l'équilibre [13].

## 7. La recombinaison

Dans un semi-conducteur, la recombinaison d'une paire électron-trou se fait selon l'un des mécanismes : la recombinaison par piège SRH, la recombinaison Auger, la recombinaison radiative et la recombinaison en surface [11]. Les recombinaisons Auger et radiative existent dans tous les matériaux, par contre d'autres phénomènes sont propres pour chaque matériau dans un semi-conducteur à gap direct, la recombinaison radiative est importante. Tandis que dans un semi-conducteur à gap indirect comme le silicium (si), la recombinaison radiative est moins utilisée.

Dans un semi-conducteur à gap direct, la recombinaison se faite bande à bande sans la participation des phonons. Alors que dans un semi-conducteur à gap indirect des phonons sont nécessaires [5] [25].

### 7.1. Recombinaison par piège

Les recombinaisons radiative et non radiative dépendent du dopage, alors que la recombinaison SRH dépend des défauts situant sur des niveaux de pièges profonds [8] [12].

#### 7.1.1. Recombination SRH (Shockley-Read-Hall)

Le processus de recombinaison Schokley-Read-Hall aura lieu au niveau d'énergie proche de milieu du gap (pièges). Il est dû à la présence des impuretés ou aux défauts dans le réseau cristallin, l'électron saute de la bande de conduction à un niveau d'énergie intermédiaire, puis il saute une deuxième fois à la bande de valence où se recombine avec un trou. Le processus de SRH dépend principalement de la densité des niveaux profonds et par conséquent de la qualité du matériau. La recombinaison Schokley-Read-Hall est exprimée par [15] [26]:

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_{p0} \left[ n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT_L}\right) \right] + \tau_{n0} \left[ p + n_{ie} \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{KT_L}\right) \right]} \quad (II-27)$$

Où :

$E_t$  : position énergétique des états de piège.

$E_i$  : niveau de fermi dans le semi-conducteur intrinsèque.

$\tau_{n0}$  : duré de vie des électrons.

$\tau_{p0}$  : duré de vie des trous.

$n_{ie}$  : concentration intrinsèque.

$K$  : constante de Boltzmann.

$T_L$  : température en Kelvin.

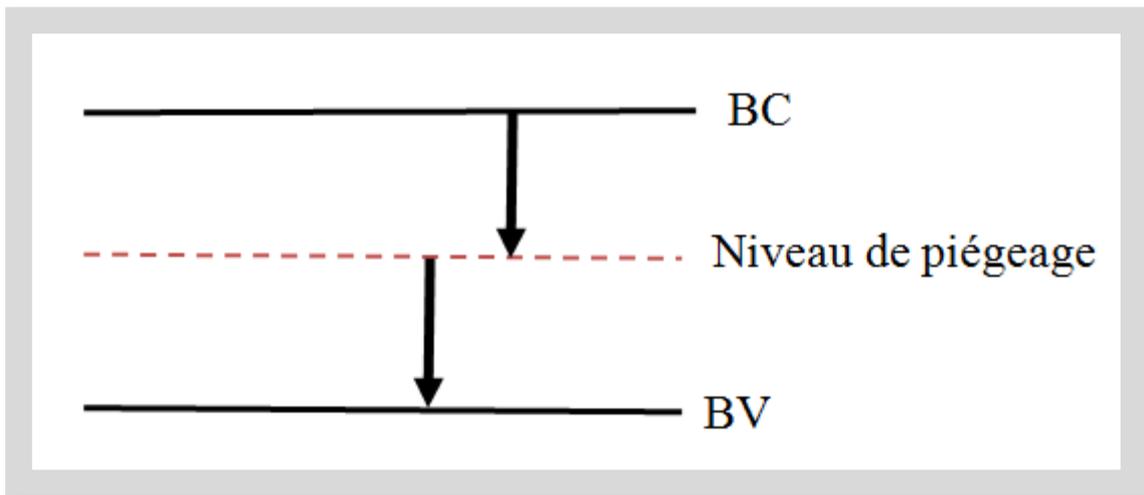


Figure II-4: Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège.

$$\tau_n = \frac{\tau_{n0}}{1 + N/N_{SRHN}} \quad (II-28)$$

$$\tau_p = \frac{\tau_{p0}}{1 + N/N_{SRHP}} \quad (II-29)$$

$N_{SRHN}$  et  $N_{SRHP}$  sont des paramètres spécifiant la concentration SRH pour les électrons et les trous.

$N$  : concentration locale (totale) d'impureté.

## 7.1.2. Recombinaison en surface

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

Les recombinaisons sur la surface d'un semi-conducteur sont nombreuses à cause des défauts. Ces recombinaisons se font en surface avant et arrière [26].

Le processus de recombinaison SRH est généralement exprimé en termes de recombinaison par unité de surface et non pas par unité de volume selon la relation suivante [12] [15]:

$$R_{\text{surf}} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_p^{\text{eff}} \left[ n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right] + \tau_n^{\text{eff}} \left[ p + n_{ie} \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{kT_L}\right) \right]} \quad (\text{II-30})$$

$$\frac{1}{\tau_n^{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_n^i} + \frac{d_i}{A_i} S_n \quad (\text{II-31})$$

$$\frac{1}{\tau_p^{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_p^i} + \frac{d_i}{A_i} S_p \quad (\text{II-32})$$

Où :

$\tau_n^{\text{eff}}$  : Durée de vie effective.

$d_i$  : Longueur de l'interface.

$A_i$  : Epaisseur de l'interface.

$S_n$  : Vitesse de recombinaison pour les électrons.

$S_p$  : Vitesse de recombinaison pour les trous.

$S_n = S_p = 0$  cm/s.

$\tau_n^i$  et  $\tau_p^i$  : durée de vie des électrons et des trous calculée à une nœud  $i$  à travers une interface.

### 7.1.3. Recombinaison en volume de type Auger

La recombinaison de type Auger consiste à un transfert de l'énergie de l'électron de la bande de valence sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. Cette énergie est libérée sous forme de phonons. Ce processus aura lieu dans les régions fortement dopées et nécessite au moins un électron et un trou [8] [6] [15].

# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

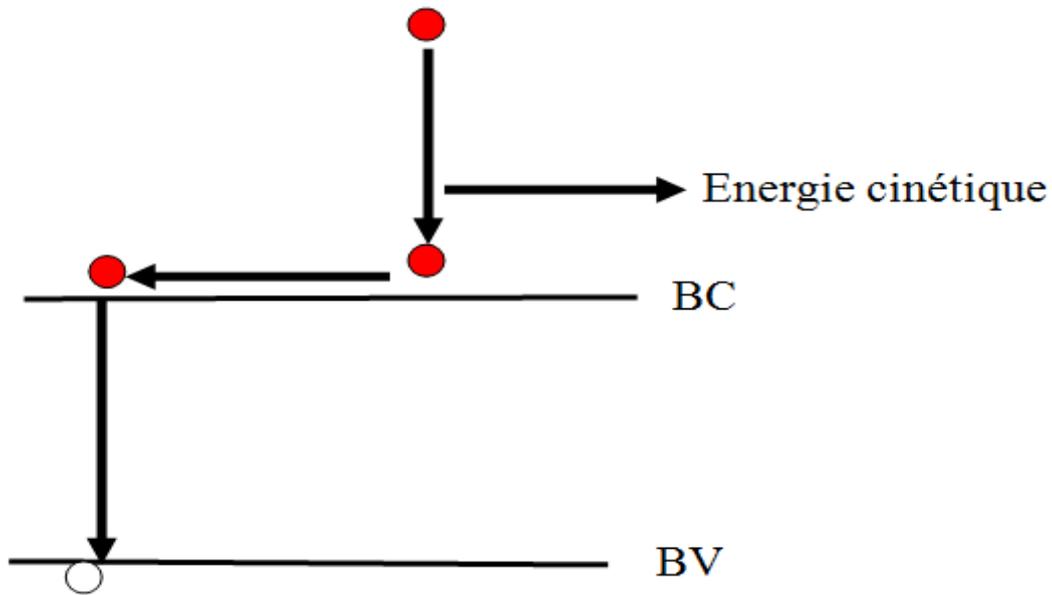


Figure II-5 : Mécanisme de recombinaison de type Auger.

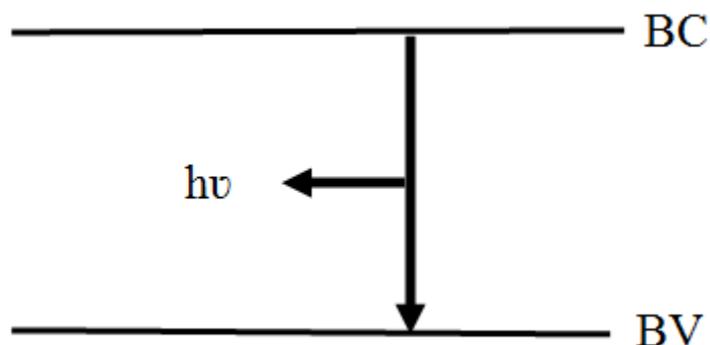
La recombinaison Auger est modélisée suivant l'expression suivante [15]:

$$R_{\text{Auger}} = \text{Aug}_n(pn^2 - nn_{ie}^2) + \text{Aug}_p(np^2 - pn_{ie}^2)$$

Où  $\text{Aug}_n$  et  $\text{Aug}_p$  : coefficients Auger pour les électrons et les trous et spécifiquement pour chaque matériau.

## 7.1.4. Recombinaison Radiative

La recombinaison radiative est définie comme étant la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence. Cette recombinaison libère un photon. Ce mécanisme est l'inverse de processus d'absorption. Elle apparaît dans les matériaux à gap directe comme le GaAs et moins utilisé par les matériaux à gap indirecte comme le Si [8] [12].



# Les Modèles Physiques et les Equations Fondamentales dans les Semi-conducteurs

---

Figure II-6 : Le processus de recombinaison de type radiatif.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différentes équations régissant dans les semi-conducteurs ainsi que les types de recombinaison en surface et en volume.

## Chapitre 3

# **L'état de L'art sur les Photovoltaïques**

# L'état de l'Art sur les Photovoltaïques

## 1. Introduction

Le développement des énergies renouvelables dans le monde est amélioré principalement dès le choc pétrolier de 1973, également pour les consommateurs. Dans ce chapitre, on va entamer les différentes technologies photovoltaïques en commençant par « la première génération », « la deuxième génération » et « la troisième génération » et les caractéristiques de chaque génération ainsi que leurs avantages et inconvénients. Aujourd'hui, plus de 90% des cellules sont à base de silicium cristallin grâce à son abondance, stabilité et non toxicité. Le prix du watt photovoltaïque a baissé de 100 Euros en 1975 à de 2 Euros en 1995[3] [25].

## 2. Les technologies de cellules photovoltaïques et leurs rendements

On distingue différents types des cellules photovoltaïques. Les cellules les plus répandues sur le marché sont les cellules en silicium cristallin et les cellules en couches minces. Ces cellules sont regroupées dans trois grandes familles dites de génération. La comparaison entre ces générations se fait en fonction de [3] [18]:

- ✚ Structure.
- ✚ Dimensions.
- ✚ Cout de production.
- ✚ Rendement électrique et quantique.

Le tableau ci-dessous illustre le rendement de chaque génération [3] [18].

La génération	Structure	Le cout	Rendement
1 <sup>ère</sup> génération	cristaux simples de silice	très chères	$\eta \approx 12\%$ à $20\%$
2 <sup>ème</sup> génération	la miniaturisation par les lois de Moore	plus faible	$\eta \approx 17\%$
3 <sup>ème</sup> génération	miniaturisation optimale	cout élevé	$\eta \geq 40\%$

Tableau III-1 : La structure et le rendement de chaque génération.

### 2.1. Les cellules de première génération

Il existe deux types de cellules solaires classiques à base de silicium monocristallin (c-Si) et multi cristallin (mc-Si) (figure.1) [22] [27] [28]. Ce type de cellules sont fabriqués à partir des purifications et solidification (processus Czochralski (Cz) FZ, Bridgman,... etc. et

## L'état de l'Art sur les Photovoltaïques

processus Siemens) des lingots de silicium pour obtenir un matériau contenant de 99.99% de Silicium [3] [29]. La différence entre les cellules monocristallines et cellules poly-cristallines est: les premières ont des coins cassés et l'aspect uniforme. Alors que les deuxièmes ont un aspect irisé. L'épaisseur de son substrat est supérieure à 100  $\mu\text{m}$  [3] [22].



Figure III-1 : (a) cellule mono cristalline, (b) poly cristalline [3].

La technologie de la première génération permet d'obtenir un rendement variant de 14% à 25% pour les cellules monocristallines et de 12% à 20% pour les cellules poly cristallines [23]. Alors que les cellules amorphes sont caractérisées par un rendement variant de 8 à 10%. En 2012, Le rendement de cellule à base de silicium ainsi que la production mondiale de cette technologie est de 84 % du marché PV (37% monocristallin et 45% multi cristallin) est amélioré. Le tableau ci-après montre le rendement de cette filière [22].

Le cout et les procédures de fabrication des cellules photovoltaïques sont très importants. La méthode de fabrication des cellules cristallines est difficile et trop chère car elle nécessite un cristal pur donc très chère. Alors que le cout de fabrication des cellules poly-cristallines est moins cher par rapport aux cellules amorphes [23]. Mais les cellules à base de silicium amorphe sont les plus utilisées dans notre vie quotidienne.

Cellule solaire	Surface ( $\text{cm}^2$ )	Rendement(%)	Centre de test
Silicium monocristallin	180.43	26.3 $\pm$ 0.5	FhG-ISE <sup>a</sup> (07/2016)
Silicium multicristallin	242.74	21.3 $\pm$ 0.4	FhG-ISE(11/2015)

Tableau III-2 : Cellules solaires de 1<sup>ère</sup> génération (Green 2017) [22].

a :FhG-ISE: Fraunhofer-Institut für Solare Energie system.

## 2.2. Les cellules de deuxième génération

Les cellules de 2<sup>ème</sup> génération « couches minces ». Il existe deux types de cellule : à base de tellure de cadmium (CdTe) et de silicium amorphe (a-Si). La couche de semi-conducteur est déposée sur un substrat (par exemple du verre).

La fabrication des cellules solaires de deuxième génération est basée sur la technologie de couches minces en utilisant des méthodes PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition). Ces cellules solaires sont des cellules dont l'épaisseur est inférieure à 50  $\mu\text{m}$  (couches minces) [22]. Cette technologie utilise le silicium amorphe ou des matériaux de composés II-VI et III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe), et le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) [22]. Leur coût de production est moins élevé. L'épaisseur de matériau semi-conducteur est mince [22] [27]. Le rendement des cellules de deuxième génération est moins élevé. Il varie de 6 à 7%. La deuxième génération présente beaucoup d'avantages (faibles illuminations et flexibilité des modules), mais leur inconvénient réside dans la toxicité de certains éléments (Cadmium). L'installation des modules à base des cellules 2<sup>ème</sup> génération se fait en Allemagne et en Asie [27].

✚ Les cellules à base de CIS (Cuivre-Indium-Sélénium) et CIGS (Cuivre-Indium-Gallium-Selenium) sont composées essentiellement de diséléniure et de gallium respectivement [23].

✚ Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) : Ce type de cellule composé de tellure de cadmium permettant une absorption importante des rayons lumineux. La bande interdite de CdTe est de 1.45 eV. Le CdTe est caractérisé par un grand coefficient d'absorption qui le permet d'absorber le spectre dans sa quasi-totalité sur une profondeur de 2  $\mu\text{m}$  [30]. Mais le (CdTe) est un matériau non conseillé pour l'environnement car il est toxique et interdit d'être utilisé que pour la fabrication des cellules solaires. Leur rendement est de l'ordre de 17% [23].

✚ Silicium en couche mince : microcristallin ( $\mu\text{c-Si}$ ) et silicium amorphe (a-Si) dont le rendement est de 6%.

✚ silicium amorphe/silicium microcristallin (a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ ) [28].

L'utilisation de ces cellules est plus variée grâce à sa flexibilité mais leur utilisation exige une haute température et plus d'énergie. Le tableau ci-dessous illustre le rendement de différents types de cellules de deuxième génération (Tableau 3) [22].

## L'état de l'Art sur les Photovoltaïques

Cellule solaire	Surface (cm <sup>2</sup> )	Rendement(%)	Centre de test
GaAs	0.9927	28.8±0.9	NREL(05/2012) <sup>b</sup>
CIGS	0.9927	21.0±0.6	FhG-ISE(04/2014) <sup>a</sup>
CdTe	1.0623	21.0±0.4	Newport(08/2014)
Silicium amorphe	1.001	10.2± 0.3	AIST(07/2014) <sup>c</sup>

Tableau III-3 : Des cellules solaires de 2<sup>ème</sup> génération.

<sup>b</sup>NREL: National Renewable Energy Laboratory.

<sup>c</sup>AIST: Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

### 2.3. Les cellules de troisième génération

Des cellules multi couches à base de semi-conducteurs inorganiques sont réalisées en tandem (sandwich). L'énergie de gap des semi-conducteurs est descendante. Ce type de cellule permet d'absorber le spectre solaire dans sa quasi-totalité. L'avantage de cette génération est le rendement qui peut dépasser 30%. Elle est basée sur l'utilisation de nouveaux matériaux, des concentrateurs, des nanotubes, des fils de silicium, des cellules nanocristallines, des colorants organiques et des polymères, des cellules à encre sensibilisé (Dye-sensitized solar cell, DSSC). Le coût de production des cellules de 3<sup>ème</sup> génération est élevé et sa réalisation reste au laboratoire (Tableau 4) [22].

#### 2.3.1. Les cellules nanocristallines

Les cellules nanocristallines sont l'un des dernières générations de cellules solaires. Son rendement au laboratoire est de 10,4 %. Leur coût de production est moins élevé.

#### 2.3.2. Les cellules à concentration

Les cellules à concentration sont placées sur un support mobile et doivent être toujours placés dans une position face au soleil. Leur rendement varie de 20 à 30 % [3].

#### 2.3.3. Les cellules organiques

Au début de XXI<sup>e</sup> siècle, le rendement de cette filière a été amélioré suite aux travaux de Shaheen (2.5%) et celui de Peumans (3.6%) sous un éclairement d'AM1.5 ; et par

## L'état de l'Art sur les Photovoltaïques

la suite un rendement de 4,2% a été atteint pour des cellules organiques à base de C<sub>60</sub>. Enfin, Heeger et son équipe a atteint un rendement de 6.7% en mettant des cellules en tandem. Malgré, les avantages de cette technologie : la facilité de la mise en forme des matériaux, la faible quantité des matériaux utilisée ; leur rendement reste assez faible si on le compare avec d'autres technologies dont leur rendement dépasse les 30% [30].

Les cellules photovoltaïques organiques sont constituées de molécules organiques. Elles sont placées sur un substrat de verre ou de plastique.

On peut distinguer plusieurs types de cellules organiques [23] :

- ✚ Les cellules de type Schottky : cette cellule utilise un semi-conducteur de type p (ou n) met en tandem entre deux électrodes de métal.
- ✚ Les cellules hétérojonction de type bicouche: elle est basée sur l'utilisation de deux semi-conducteurs l'un est de type p et l'autre est de type n [23].
- ✚ Les cellules hétérojonction de type réseaux interpénétrés [23].
- ✚ Les cellules hybrides sensibilisées par un colorant : ils sont appelés DSSC (Dye-SensitizedSolarCells) ou cellules Graetze [28].
- ✚ Les cellules multi jonctions III-V : Actuellement ; les cellules à multi-jonction sont limitées aux applications spatiales. Elles sont basées sur l'utilisation des différents matériaux semi-conducteurs en épitaxie dont l'énergie de gap est décroissante. Ce processus est appelé aussi tandem. Le composant principal est l'arséniure de gallium dont le rendement des cellules à mono jonction varie de 18 à 25%. Des rendements élevés sont atteints en utilisant cette technologie « plus de 32% » avec des cellules de double jonction InGaP/GaAs ; par la suite l'apparition des concentrateurs augmente le rendement de ces cellules qui dépasse 40% [23].

Cellule solaire	Surface (cm <sup>2</sup> )	Rendement (%)	Centre de test
Colorante (Dye-sensitised)	1.005	11.9±0.4	AIST(09/2012)
Organique	0.992	11.2±0.30	AIST(10/2015)
InGaP/GaAs/InGaAs(tandem)	1.047	37.9±1.2	AIST(02/2013)
InGaP/GaAs : GaInAsP/GaInAs (à concentration)	0.0520	46.0±2.2	AIST(10/2014)

Tableau III-4: Exemples de cellules solaires de 3<sup>ème</sup> génération [22]

## 2.4. Les cellules solaires à haut rendement de conversion

Il existe trois types de ces cellules :

### 2.4.1. Les structures dites à contact localisé

La figure 2 montre les différentes structures de ce type de cellule, la PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused), la PERT (Passivated Emitter, Rear Totally diffused), et la PERC (Passivated Emitter, Rear Cell) [31]. Ces structures permettent de diminuer les pertes optiques et résistives et de réduire la recombinaison en surface. Leur rendement dépasse les 20% [32].

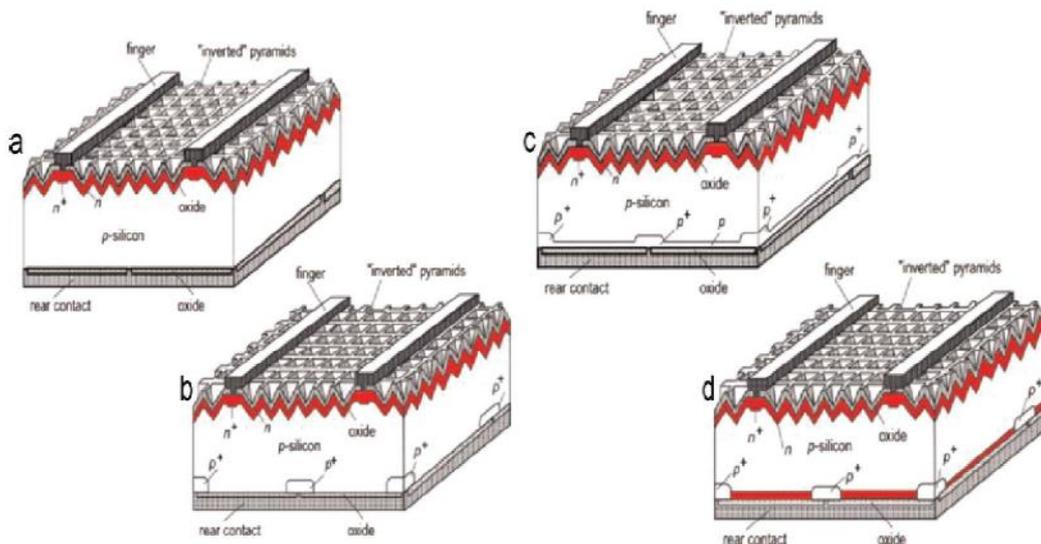


Figure III-2: Schéma de la structure (a) PERC (Passivated Emitter, Rear cell); (b) PERL (Passivated Emitter, Rear Locally-doped); (c) PERT (Passivated Emitter, Rear Totally diffused); (d) PERC (Passivated Emitter, Rear Floating-junction) [26].

### 2.4.2. La structure à contacts interdigités en face arrière IBC

La structure à contacts interdigités en face arrière IBC (Interdigitated Back Contact) est illustrée dans la figure 3. Le rendement d'une cellule IBC de surface 155cm<sup>2</sup> obtenu industriellement est de 24.2% [32]. Les cellules à contacts interdigités en face arrière (IBC) peuvent atteindre des rendements plus élevés avec des cellules en BSF (Back Surface Field). Le BSF est met en face arrière afin d'éviter l'ombrage de la métallisation. Mais leur cout et ses étapes de fabrication sont très chers.

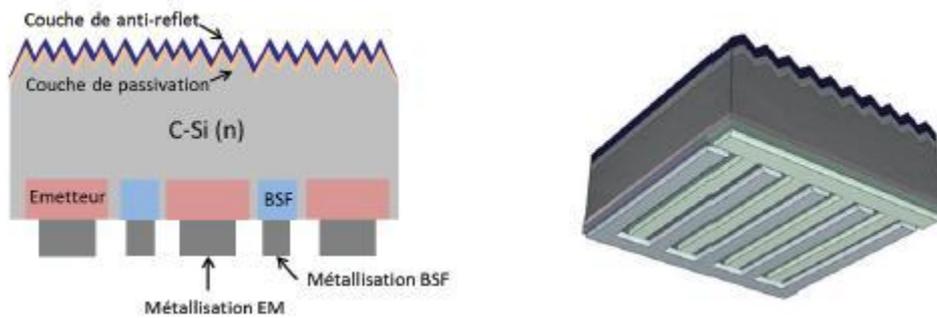


Figure III-3. À gauche : une coupe cellule (IBC), à droite : une cellule (IBC) vue d'en bas [3].

### 2.4.3. La structure à hétérojonctions de silicium (Si-HJ)

Elle a apparue en 1974[34], elle utilise le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H). Elle présente des rendements élevés grâce aux faibles recombinaisons en surface.

Grace à ses caractéristiques importantes, le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est utilisé pour réaliser la jonction avec le silicium cristallin (c-Si) (figure 4). Alors que les cellules à homojonction sont réalisées en déposant quelques nanomètres de silicium amorphe hydrogéné. Le (Si-HJ) a un gap de 1,8 eV élevé par rapport au silicium cristallin. En plus, cette cellule produit une tension de circuit ouvert élevée ( $V_{OC}=730$  mV) [34] grâce à l'utilisation de l'hétérojonction.

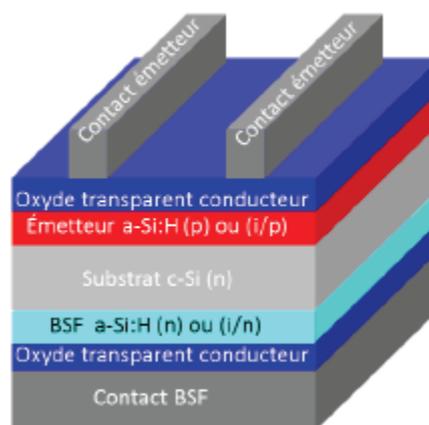


Figure III-4 : Une cellule à hétérojonction a-Si:H/c-Si [3].

## L'état de l'Art sur les Photovoltaïques

Une autre structure solaire a été réalisée en assurant les avantages optiques et électriques de la structure IBC et les faibles recombinaisons de surface de la structure Si- HJ. Elle combine entre la structure Si-HJ et la structure IBC (Si-HJ IBC). Son rendement dépasse les 26% [35].

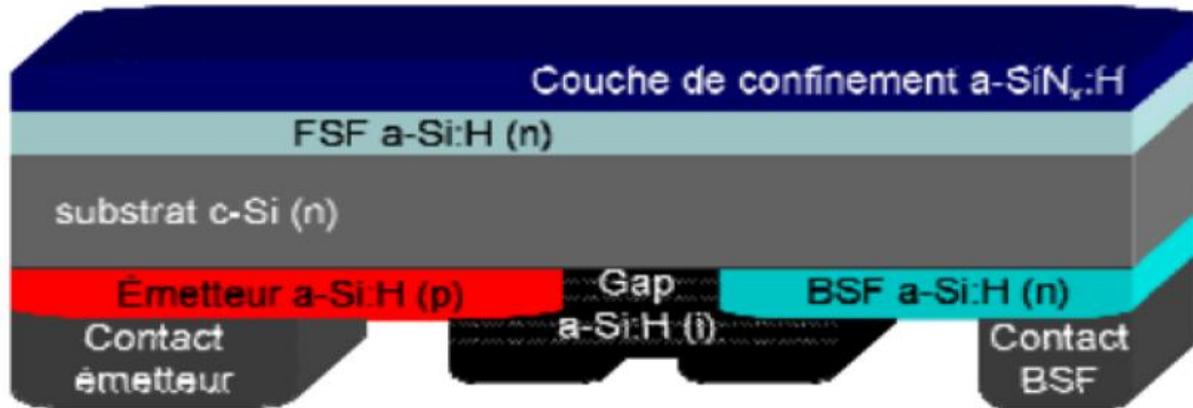


Figure III-5 : Schémas d'une structure d'une cellule solaire IBC Si - HJ INES (36)

Théoriquement, le rendement de la structure (IBC-SI-HJ) de surface ( $143,7\text{cm}^2$ ) dépasse les 25%.

Parmi les différentes technologies et les caractéristiques de chaque génération photovoltaïque, les cellules solaires à base de silicium reste les plus répandues grâce à son faible cout de production et son abondance dans la nature. Elles constituent plus de 90% des panneaux installées dans le monde [37].

Le faible rendement de ces cellules (qui ne dépasse pas les 20%) entraine à l'apparence de la deuxième génération « couches minces » qui utilisent la méthode de PE-CVD. Mais leur inconvénient est la toxicité de certains matériaux utilisés. Leur rendement ne dépasse pas les 28% [22].

Donc, dans le but d'améliorer le rendement et réduire les inconvénients des générations précédentes, la troisième génération est apparue. Leur rendement est de 40% [23] en utilisant des concentrateurs et de la conversion multi spectrales.

Afin d'améliorer le rendement des cellules solaires à base des matériaux inorganiques III-V, ce qui représente le travail de la thèse. En inspirant des technologies précédentes, nous tentons de réaliser par simulation une cellule à multi couches à base d'InGaP/GaAs afin d'atteindre un rendement maximal.

## L'état de l'Art sur les Photovoltaïques

---

Les travaux de thèse consistent à introduire plusieurs paramètres caractérisant la cellule multi couches en particulier l'épaisseur (technologie couches minces) de la jonction tunnel ( $0.008\mu\text{m}$ ) et le type des matériaux y utilisés qui donne un rendement meilleur ainsi que le type de matériau utilisé et l'épaisseur de la couche BSF. Ce BSF a un rôle important dans la recombinaison des porteurs.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes technologies photovoltaïques (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération), leur historique ainsi que les rendements atteints par chaque génération. Les performances des cellules solaires sont réalisées par l'exploitation du maximum de l'énergie solaire, par des contributions et des modifications faites à chaque génération et ceci de point de vue structurelle, dimensionnelle, cout et méthodes de production ainsi que la durée de vie.

## **Chapitre 4**

# **Les Constitutions d'une Cellule Solaire**

# Les Constitutions d'une Cellule Solaire

---

## 1. Introduction

La modélisation et la simulation des cellules solaires exigent une étude de différents constituants de base de la cellule telle que les contacts, la couche antireflet, la texturation et le BSF (Back Surface Field). Le principe de l'effet PV et le spectre utilisé est très important pour une bonne modélisation de la cellule. Dans ce chapitre, on va entamer le rôle de chaque constituant dans la création du courant électrique.

## 2. Le spectre solaire

Le soleil est une source principale de la lumière qui représente une onde électromagnétique qui se propage dans le vide avec une vitesse de  $c \approx 3.10^8 \text{ m/s}$ . Ces ondes électromagnétiques sont composées essentiellement de trois parties: le visible, l'infrarouge et l'ultraviolet. Nommée le spectre solaire [8].

Le spectre électromagnétique peut être décrit en utilisant la théorie ondulatoire et la théorie des corpusculaire. La théorie ondulatoire décrit l'énergie en termes de longueur d'onde et de fréquence; par contre, le processus d'effet photoélectrique dans les cellules solaires est utilisé pour décrire l'aspect corpusculaire. L'énergie de photon est donnée par [1]:

$$E = h\nu \quad \text{(IV-1)}$$

$\nu$  = fréquence de l'onde électromagnétique (Hz)

$h$  = constante de Planck,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ eV.s}$

La figure suivante montre la partie visible du spectre électromagnétique. Les longueurs d'ondes visibles s'étendent de 390 nm (violet) à 780 nm (rouge) [2] [12].

## Les Constitutions d'une Cellule Solaire

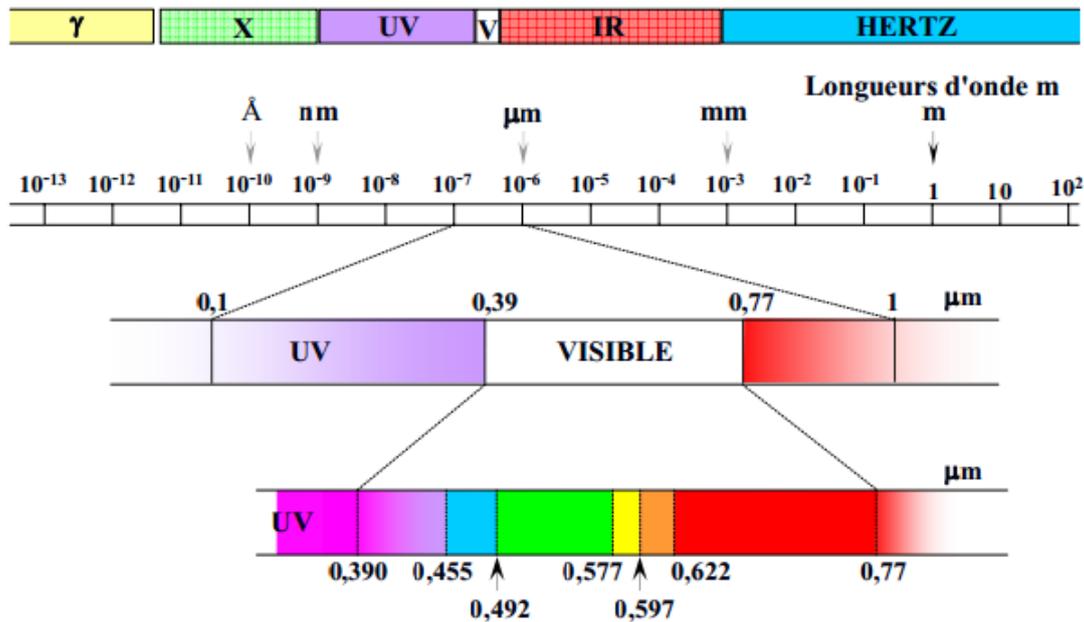


Figure IV-1: La répartition du spectre des ondes électromagnétiques [3].

Pour que les cellules solaires donnent un rendement idéal, il faut que les matériaux semi-conducteurs doivent absorber une grande partie des longueurs d'ondes du spectre AM1.5. Le tableau ci dessous représente l'absorption de certains matériaux semi-conducteurs à 300 K [38].

Zone du spectre électromagnétique	Longueur d'onde (nm)	Semi-conducteur
Infrarouge	$\lambda > 780$	(AlGaAs), (GaAs)
Rouge	$610 < \lambda < 780$	(AlGaAs)
Orange	$590 < \lambda < 610$	(AlGaInP)
Jaune	$570 < \lambda < 590$	(AlGaInP)
Vert	$500 < \lambda < 570$	(InGaN), (AlGaInP)
Bleu	$450 < \lambda < 500$	(InGaN)
Violet	$380 < \lambda < 450$	(InGaN)
Ultraviolet	$\lambda < 380$	(AlGaN)

Tableau IV-1 : Longueur d'onde de quelques semi-conducteurs utilisés en fonction de la couleur de la lumière.

## Les Constitutions d'une Cellule Solaire

### 3. La masse d'air

La puissance de l'énergie reçue par la terre est de  $1.4 \text{ kW/m}^2$ . 44% de cette énergie se trouve dans la bande des infrarouges, tandis que 9% est dans la région des ultraviolets et 47% d'énergie se trouve dans la bande de visible. Seulement cette dernière énergie (visible) est transformée en électricité [12] [25] [39].

La valeur du spectre dépend principalement des conditions climatiques. Pour mieux étudier et comparer entre la performance des cellules solaires, il faut connaître les différents spectres solaires : la masse atmosphérique (ou la masse d'air).

Il existe trois types de masse d'air [25]:

AM0 : Hors atmosphère dont la puissance est  $P \approx 1.36 \text{ kW.m}^{-2}$

AM1 : Le soleil est à la position verticale.

AM1.5G : le soleil se trouve à  $45^\circ$ . Dont la puissance  $P \approx 1 \text{ kW.m}^{-2}$

Les différentes masses d'air sont approuvées par l'Organisation Internationale de Standardisation et la Société Américaine de Test et Matériaux sont illustrés ci-dessous :

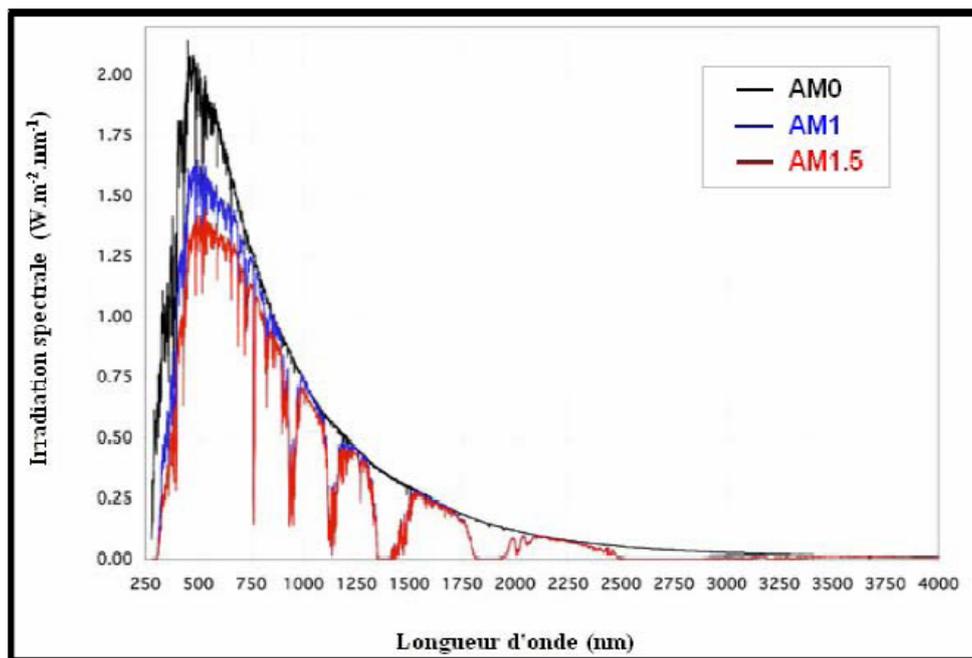


Figure IV-2: Spectre AM0, AM1 et AM1, 5 [12].

# Les Constitutions d'une Cellule Solaire

## 4. Le principe de l'effet photovoltaïque

### 4.2. Histoire de Cellules Solaires

Edmund Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque en 1839. Il a remarqué que certains matériaux exposés à la lumière ont donné des étincelles. Il a prouvé que ces étincelles sont qu'une conversion de la lumière en un courant électrique [8] [40] [6].

### 4.2. L'Effet Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque c'est un processus qui permet de convertir la lumière (photons) en énergie électrique. L'énergie des photons dépend de la longueur d'onde. Quand un matériau comme le silicium absorbe la lumière ; Les photons transfèrent leurs énergie aux électrons qui leur permettent de sauter à un état d'énergie plus élevé. Les électrons excités reviennent à leurs états initiaux en émettant de la lumière.

La production de l'énergie électrique se fait par les processus suivants : absorption, conversion et la collecte [12] [30] [40] [41].

- ✚ Les rayons lumineux frappent la surface de la cellule solaire.
- ✚ Le matériau semi-conducteur absorbe les photons dont l'énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de matériaux.
- ✚ L'énergie du photon est transférée aux électrons en créant des paires électrons-trous.
- ✚ Les particules sont collectées aux électrodes de la cellule solaire et un courant électrique continu apparait.

Quand un rayon lumineux frappe la cellule solaire, une partie de ce rayon sera réfléchi et l'autre est absorbé par le réseau cristallin de semi-conducteur et converti directement en courant électrique. Cela est fait par la création des paires électrons- trous [12] [23].

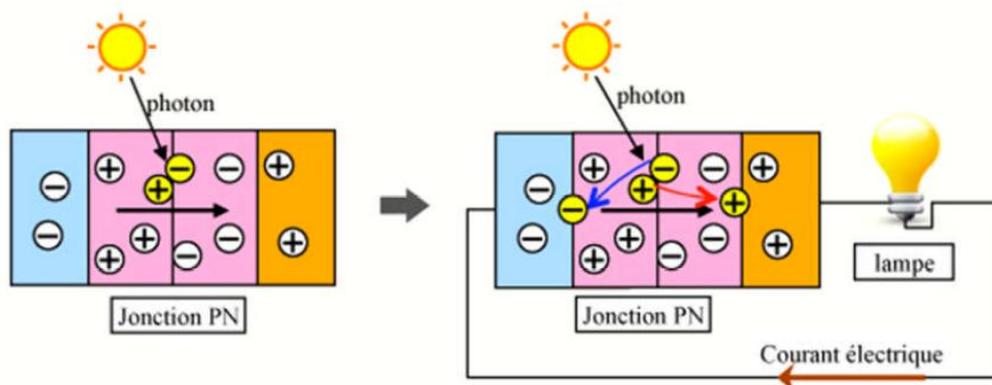


Figure IV-3 : Création du courant électrique sous l'effet de la lumière [3] [27].

## Les Constitutions d'une Cellule Solaire

---

### 4.3. Absorption du rayonnement dans le matériau (Propriétés optiques des semi-conducteurs)

L'absorption et l'interaction des photons avec un semi-conducteur dépendent principalement du coefficient d'absorption. Ce coefficient est le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du semi-conducteur. Il dépend aussi de la longueur d'onde.

Pour un matériau semi-conducteur (le silicium) dont l'énergie de gap est de 1,12 eV et  $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$ ), la plupart des photons reçus est absorbée dans les 10 premiers nanomètres du matériau.

L'intensité du rayon solaire frappant le matériau est donné par la loi de Beer-Lambert. Elle dépend de la profondeur de pénétration et des propriétés du milieu qu'elle traverse [3] [42]:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{IV-2})$$

$I_0$ : l'intensité de rayonnement lumineux incident.

$\alpha$  [ $\text{cm}^{-1}$ ]: le coefficient d'absorption.

$x$  [cm]: la profondeur de pénétration.

$I(x)$  : l'intensité de rayonnement lumineux pour une distance de pénétration  $x$ .

Les photons dont la longueur d'onde est faible sont absorbés près de la surface de semi-conducteur et ils sont responsables de la création des paires électrons trous. Tandis que les photons dont la longueur d'onde est plus grande sont un peu loin de la surface. La loi de Beer-Lambert est résumée par la figure ci-après.

## Les Constitutions d'une Cellule Solaire

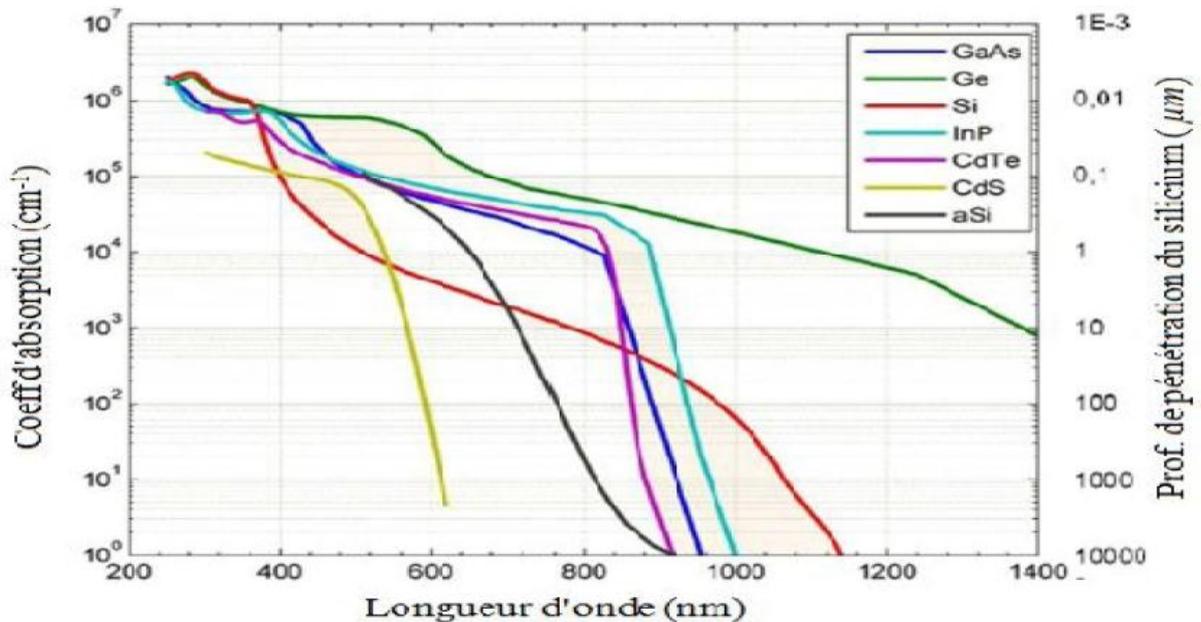


Figure IV-4: Profondeur de pénétration et coefficient d'absorption de quelques semi-conducteurs à 300 K en fonction de la longueur d'onde [3].

### 5. La structure de la cellule solaire

#### 5.1. Texturisation

Pour avoir un meilleur rendement, il est préférable d'utiliser une surface dont la forme est rugosité « triangulée ». Ce qui va entraîner une diminution de l'intensité de lumière réfléchi et une amélioration de l'intensité de lumière absorbée par le matériau semi conducteur. La texturisation est réalisée juste à la face arrière de la cellule en mettant un relief micrométrique (5-10μm). Quand un rayon lumineux frappe la face avant de la cellule photovoltaïque en incidence normale, il est réfléchi par la pyramide adjacente. Il sera réfléchi une autre fois par la deuxième pyramide résultant à une diminution de coefficient de réflexion de  $R$  à  $R^2$ . Quand le rayon lumineux pénètre à l'intérieur de la cellule avec un angle différent de  $0^\circ$ , l'absorption de la lumière est donc améliorée [1] [8].

## Les Constitutions d'une Cellule Solaire

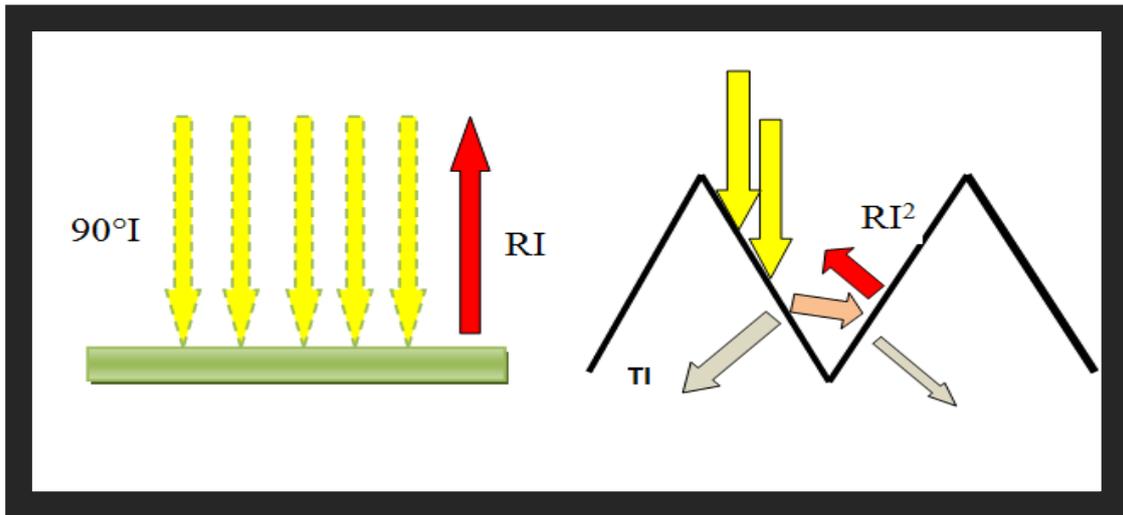


Figure IV-5 : Comparaison entre la réflexion de la lumière incidente sur une surface texturée et une surface lisse. I : intensité lumineuse incidente, R : coefficient de réflexion, T : coefficient de transmission.

### 5.2. Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur la face avant et sur la face arrière de la cellule solaire. Ils créent une barrière de potentiel « barrière de Schottky » [43]. Le contact supérieur couvre la surface de cellule solaire d'un pourcentage de 2–8%. Ce contact a un rôle de minimiser l'ombrage et éviter la recombinaison. Alors que le contact inférieur couvre la partie inférieure de la surface de la cellule.

Les contacts ont un rôle de collecter des porteurs majoritaires et minoritaires et de prévenir la recombinaison et permettre aux rayons lumineux de pénétrer à l'intérieur de la cellule solaire. [1]

Le choix de type de métal a un rôle important dans la collecte de maximum de courant. En plus les contacts métalliques donnant des contacts ohmiques, sont choisis afin d'avoir des résistances de contact plus faibles [3] car la forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement [12] [41]. Parmi les métaux utilisés pour les contacts ohmiques des cellules solaires sont : Li, Na, K, Fe, Ni, Al, Cu, Ag, Au, Pt [13].

Les doigts de métallisation doivent être moins larges pour diminuer le taux d'ombrage. Cela entraîne à un courant élevé mais des résistances série seront augmentées [3].

# Les Constitutions d'une Cellule Solaire

---

## 5.3. Fenêtre

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

Pour que les rayons lumineux peuvent être pénétrer dans les couches de la cellule solaire photovoltaïque, il faut utiliser des matériaux semi-conducteurs dont l'énergie de gap est importante pour être transparent à la lumière [44]. La couche fenêtre doit avoir une fraction molaire moins élevée pour diminuer le problème d'oxydation. [1]

## 5.4. Emetteur et base

Les couches émetteur et base sont des couches fines à base de semi-conducteur. La région de type n dans une cellule n-p est nommé émetteur. La région de type p- est nommée la base" (Bates 7) [1]. Pour minimiser l'absorption dans l'émetteur, Il faut que leur épaisseur doive être très fine par rapport à l'épaisseur de la base pour assurer la collecte des porteurs. [3]. Le dopage de l'émetteur doit être de l'ordre de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  alors que celui de la base doit être plus faible [3]. Le dopage de la base a un rôle important dans l'augmentation du rendement de la cellule solaire. Le faible dopage augmente la durée de la vie des porteurs minoritaires, par contre il augmente le courant de l'obscurité et donc diminue la performance de la cellule.

## 5.5. BSF

Le champ électrique à surface arrière BSF (Back Surface Field) est une couche mince fortement dopée. Elle est localisée sur la face arrière de la cellule solaire et permet de passiver la face arrière de la cellule. Elle est dopé (p+ou n+) avec le même type de dopage que le substrat [12]. Et donc une barrière de potentiel est créée à cause de la différence de la concentration de dopage entre le BSF et le substrat [3] [41].

Le BSF a deux contributions à la structure de la cellule. D'une part, l'ajout de la couche BSF permet de partager la tension entre les jonctions n-p et p-p+, cela diminue le courant de l'obscurité dans la cellule. D'autre part le champ électrique intégré dans la jonction p-p+ reflète les porteurs minoritaires, par conséquent elle permet d'augmenter la tension de court-circuit de la cellule solaire, de minimiser les recombinaisons et donc collecter des porteurs majoritaires. Plusieurs travaux de recherches se sont intéressés à l'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche BSF pour des raisons commerciales [1] [3] [41].

# Les Constitutions d'une Cellule Solaire

## 5.6. Couche antireflet

Pour réduire la réflexion de la lumière à moins de 5% sur la face avant de la surface de la cellule solaire, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti-Reflective Coating CAR) [12]. Le rôle de la couche anti-réfléchissante est basé sur le principe de l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces [8].

Il est préférable d'utiliser une double couche antireflet (avec deux diélectriques différents) pour les cellules photovoltaïques à haut rendement [41]

Donc, sans la couche antireflet, la cellule solaire reflète jusqu'à 33 de la lumière incidente arrivant sur la surface de cellule solaire. [12]

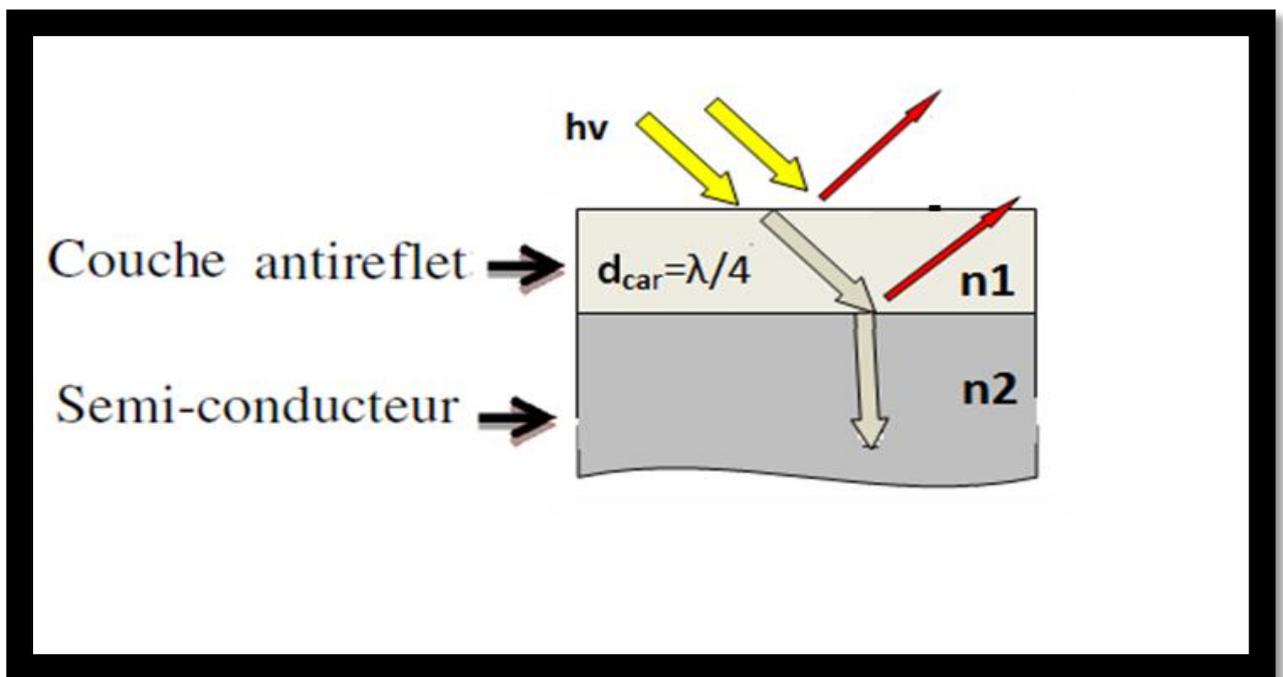


Figure IV-6: Couche antireflet d'une cellule photovoltaïque [45]

Ou  $d_{car}$  est l'épaisseur de la couche antireflet, pour un angle d'incidence  $\theta=90^\circ$  [43]. La réflexion (R) est minimale pour une  $d_{car}=\lambda/4$  et  $n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$

Ou  $n_0$  : l'indice de réfraction de l'air

$n_1$  : l'indice de réfraction de la CAR

$n_2$  : l'indice de réfraction du semi-conducteur

$$R_{\min} = \left[ \frac{(n_1^2 - n_0 n_2)}{(n_1^2 + n_0 n_2)} \right]^2 \tag{IV-3}$$

$R_{\min}$  : coefficient de réflexion minimale.

## Les Constitutions d'une Cellule Solaire

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

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

Le tableau ci-après montre les matériaux utilisés comme des couches antireflets et leurs indices de réfraction [45].

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

Tableau IV-2 : L'indice de réfraction de quelques matériaux.

La figure suivante résume la composition d'une cellule solaire

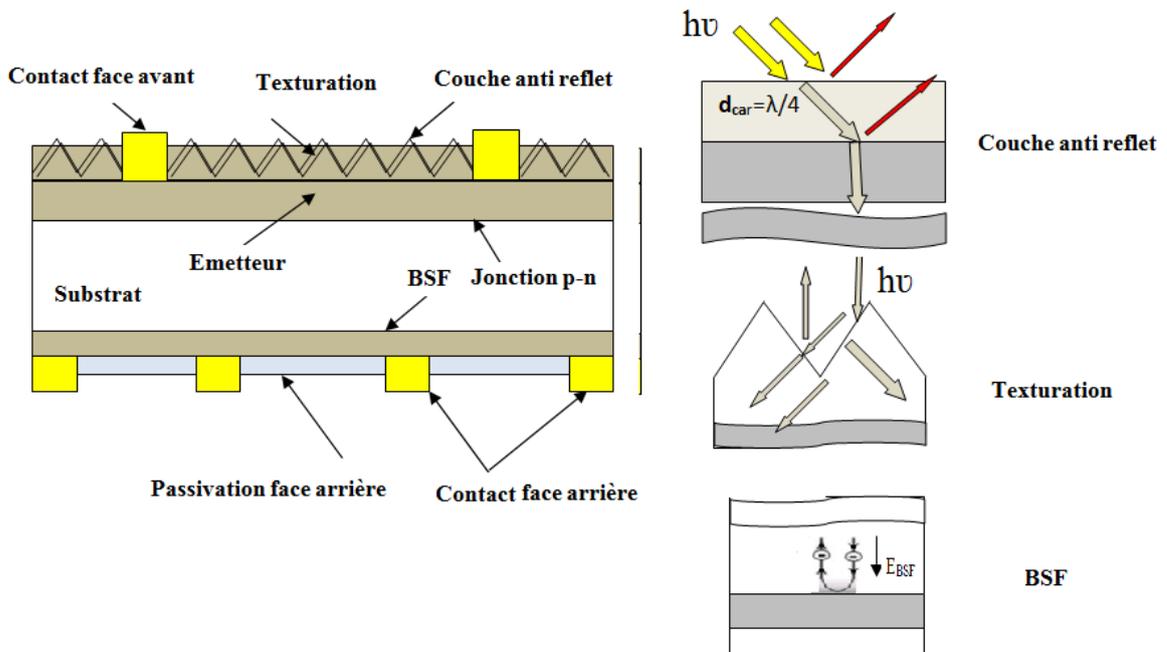


Figure IV-7 : Structure d'une cellule photovoltaïque [46].

# Les Constitutions d'une Cellule Solaire

---

## Conclusion

Dans ce chapitre, on a entamé le principe de l'effet photovoltaïque ainsi que la forme de spectre utilisé. La cellule solaire est constituée principalement des contacts aux faces avant et arrière, une couche anti reflet, une texturation de surface et un champ de surface arrière(BSF).

## Chapitre 5

# Critères de Choix et Résultats de Simulation

# Partie 1

## **Critères de choix des différents paramètres**

# Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

---

## 1. Introduction

L'énergie solaire est devenue l'un des sources les plus importantes qui remplace l'énergie fossile grâce à son abondance. Des efforts sont faites pour augmenter le rendement des cellules solaires et de réduire le cout de production. La modélisation et le choix des matériaux semi-conducteurs constituant les cellules solaires sont très importantes pour améliorer leur rendement.

Le rendement d'une cellule solaire est limité aussi par différents types de pertes : pertes intrinsèques et ou pertes extrinsèques. Donc, on essaye de réduire ces pertes par la modélisation, l'optimisation des différentes couches de la cellule à hétérojonction InGaP/GaAs tels que : la jonction tunnel, la couche fenêtre et le BSF pour atteindre un rendement optimale.

## 2. Les types de pertes

✚ **Les pertes extrinsèques** : sont des pertes que l'on peut éliminer. Elles sont dues à la réflexion, l'ombrage due aux contacts, la résistance série, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison.

✚ **Les pertes intrinsèques** : sont des pertes qui ont lieu au niveau des cellules à mono jonction. Cette cellule est incapable de répondre à toutes les longueurs d'onde du spectre solaire. Elle est transparente pour les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie de gap ( $E_{ph} < E_g$ ). Si, les photons ont une énergie supérieure à l'énergie de gap ( $E_{ph} > E_g$ ), leurs énergie sera dissipé sous forme de chaleur. La recombinaison radiative peut aussi causer ce type de pertes.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

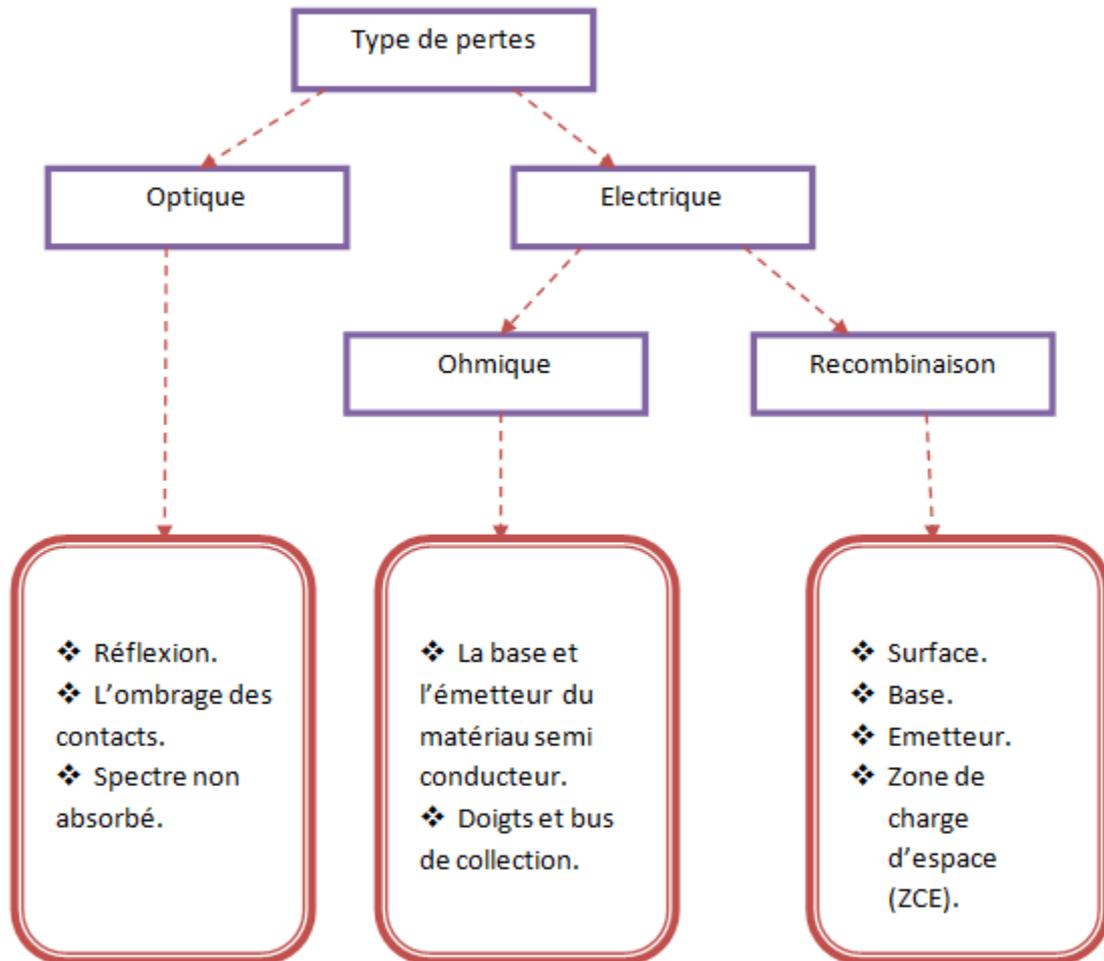


Figure V-1: Différents pertes de la cellule solaire [47].

### 3. L'hétérojonction

L'hétérojonction est la jonction formée entre deux semi-conducteurs (l'un de type n et l'autre de type p) de gaps différents. Elle s'effectue par une croissance cristalline d'un matériau sur un autre. On peut distinguer deux types de l'hétérojonction : isotype et anisotype. Cette croissance exige que les constantes de réseaux des semi-conducteurs doivent être très proches pour éviter les défauts de dislocation [23] [11].

✚ Isotype : les deux semi-conducteurs met en contact (épitaxie) sont de même type de dopage.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

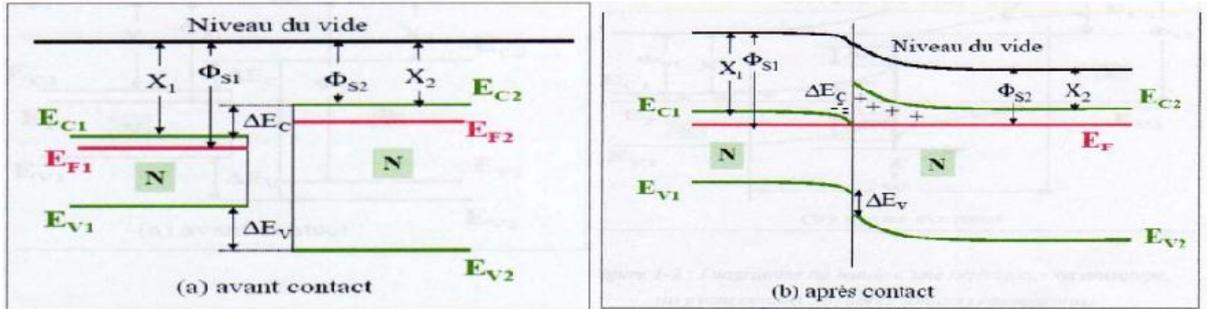


Figure V-2: Diagramme de bande d'une hétérojonction isotype :

(a) avant contact, (b) après Contact [48].

- Anisotype : les deux semi-conducteurs met en contact (épitaxie) sont de différents type de dopage.

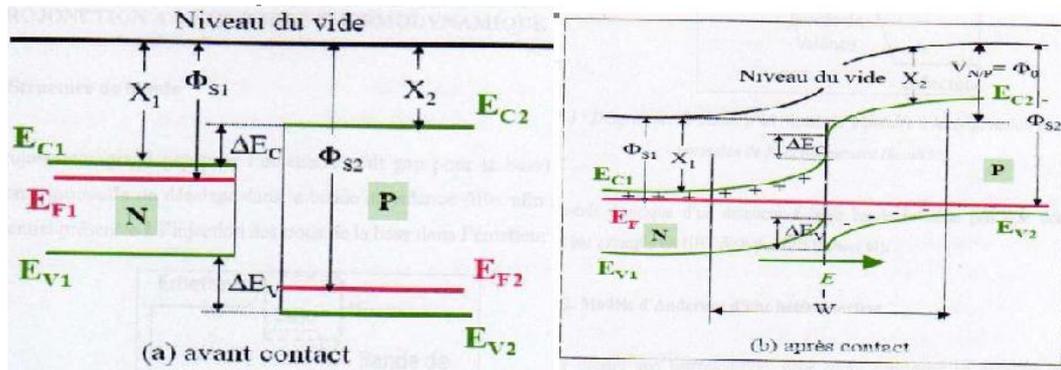


Figure V-3 : Diagramme de bande d'une hétérojonction anisotype :

(a) avant contact, (b) après contact [48].

Lorsque, les deux semi-conducteurs sont mis en contact, une diffusion de charge résulte. Les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie de gap ( $E_{g1}$ ) et supérieure à l'énergie de gap ( $E_{g2}$ ) pénètrent dans le premier semi-conducteur et seront absorbés par le deuxième semi-conducteur.

La figure ci-dessus montre une discontinuité au niveau des bandes de conduction et celle de valence. Cette discontinuité peut être calculée comme suit [43]:

$$\Delta E_c = E_{c2} - E_{c1} = \chi_2 - \chi_1 \quad (V-1)$$

$$\Delta E_v = \Delta \chi + \Delta E_g \quad (V-2)$$

Ou  $\Delta E_c$  est la différence de l'énergie de la bande de conduction.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

---

$\Delta E_v$  est la différence de l'énergie de la bande de valence.

$\chi_1$  et  $\chi_2$  est l'affinité électronique des semi conducteurs.

### 4. La cellule solaire à multi-jonction

La cellule solaire à mono jonction permet d'absorber une certaine partie du spectre solaire, alors que les photons solaires émis par le soleil possèdent une énergie variant de 0 à 4eV [29]. Quand un rayon lumineux frappe une cellule solaire à mono jonction, seulement les photons ayons une énergie de gap ( $E_g$ ) inférieure à celle d'un matériau semi-conducteur sont absorbés. Les photons dont l'énergie de gap est supérieure sont reflétés ou sont transmis sous forme de chaleur. Pour cela, et pour une utilisation optimale du spectre solaire, les cellules solaires à multi couches (hétérojonction) sont apparues. Les cellules solaires tandem (multi couches) sont constituées de plusieurs couches à base des matériaux semi-conducteurs. Ces dernières possèdent des gaps d'énergies descendants permettant ainsi l'absorption d'une grande partie du spectre solaire (la quasi-totalité) et donc la diminution des pertes par thermalisation et par transmission.

La cellule solaire tandem (dite monolithique) est constituée de plusieurs cellules solaires (deux et plus). Ces cellules sont interconnectées par des diodes (jonctions tunnels). Dans cette thèse, on va étudier la cellule InGaP/GaAs. La cellule supérieure InGaP doit posséder une énergie de gap supérieure à celle de la cellule inférieure GaAs pour permettre l'absorption d'une grande partie des photons lumineux. Alors que la cellule inférieure permet l'absorption des photons dont l'énergie est faible [49].

### 5. Le choix de la structure InGaP/ GaAs

Sous un spectre solaire AM1.5, le choix des matériaux semi-conducteurs utilisés dans notre travail joue un rôle très important pour obtenir des meilleurs rendements. Ce choix dépend principalement du gap d'énergie. Le gap d'énergie optimal des cellules solaires à mono jonction et qui donne un meilleur rendement ne doit pas dépasser 1.4 eV comme le GaAs [50] [51]. La société américaine Alta Devices atteint un rendement de 28.8% pour une cellule mono jonction GaAs [52]. L'empilement d'une autre jonction augmente la performance de la cellule (dans notre travail InGaP). Les jonctions utilisées en tandem doit posséder des gaps descendants (1.75 à 1.8 eV pour la cellule supérieur et 1.1eV pour la cellule inférieur). Le rendement est amélioré à plus de 30% [53] en utilisant une cellule à double jonction à base de matériau InGaP/GaAs sans concentration. Par l'utilisation des

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

hétérojonctions, une grande partie de spectre est absorbée et donc plus de courant électrique est généré.

### 6. La mise en tandem des cellules InGaP/GaAs

Pour augmenter le rendement, plusieurs jonctions sont mises en tandem. Quand un rayon lumineux frappe une cellule solaire à multi jonction, il sera absorbé par la cellule supérieure (InGaP). Alors une partie sera pénétrée dans la deuxième cellule (GaAs). La tension générée par la cellule tandem est la somme des tensions de chaque cellule.

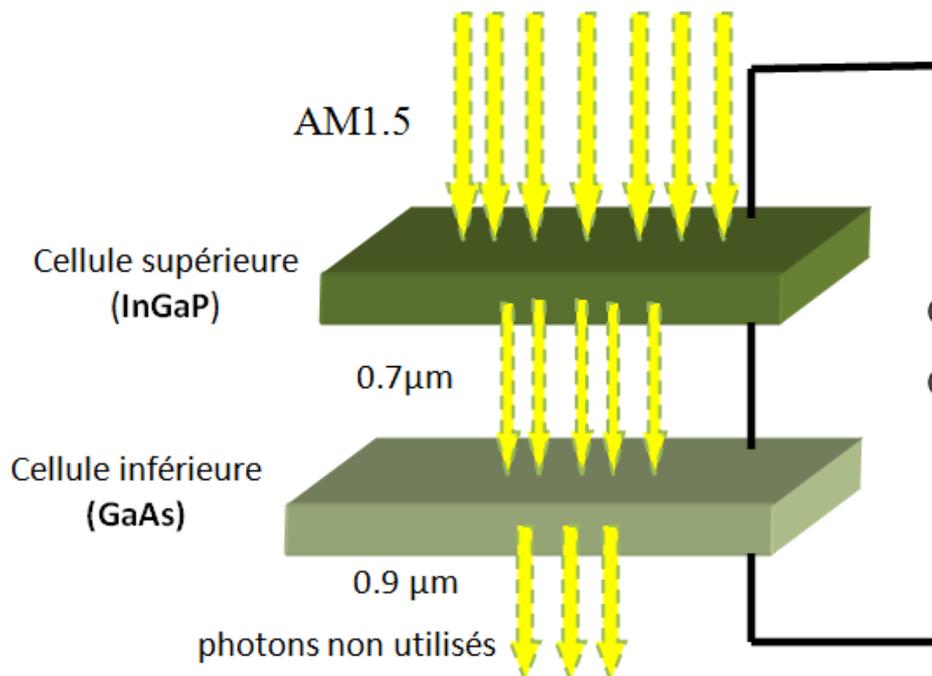


Figure V-4 : La cellule solaire à hétérojonction.

### 7. La jonction parasite

La mise de plusieurs cellules en tandem crée une jonction parasite à cause deux différentes jonctions (cellules). Donc, il faut séparer ces jonctions pour permettre la circulation du courant.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

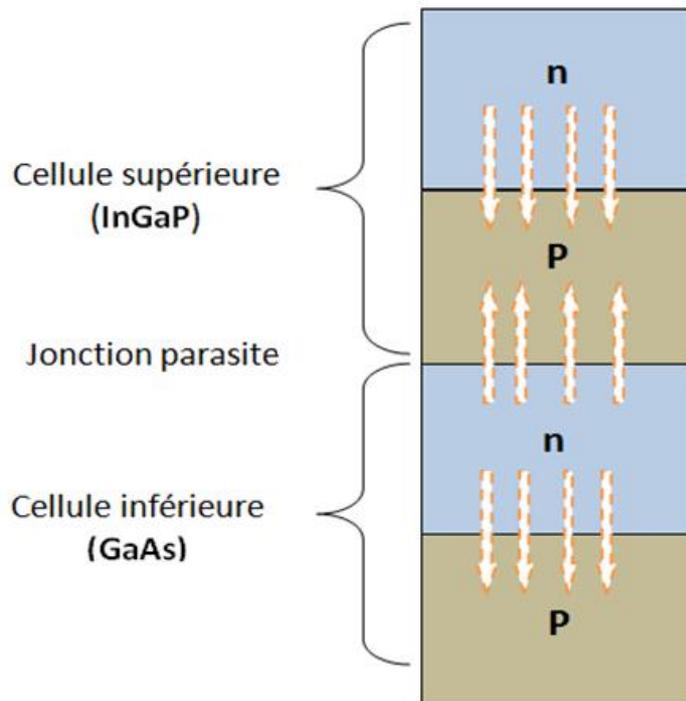


Figure V-5 : La jonction parasite.

Il existe deux solutions pour éviter cette jonction parasite soit [14]:

✚ L'utilisation d'un contact d'oxyde (conducteur). Mais cela a un inconvénient dû à l'ombrage sur les sous cellules des photons inutiles par la cellule supérieure et donc le rendement sera limité.

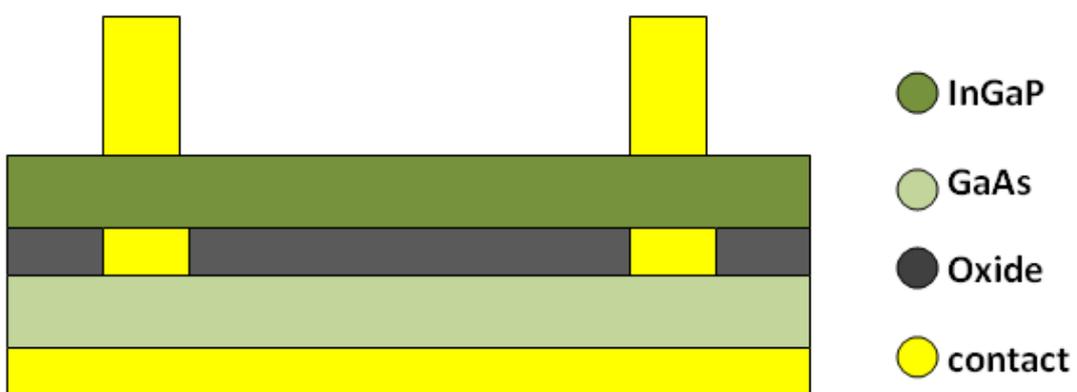


Figure V-6 : Cellule solaire de type tandem avec des contacts.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

✚ Une autre solution est l'utilisation de la jonction tunnel entre les cellules solaires. Les rayons lumineux et le courant peuvent passer à travers la jonction tunnel.

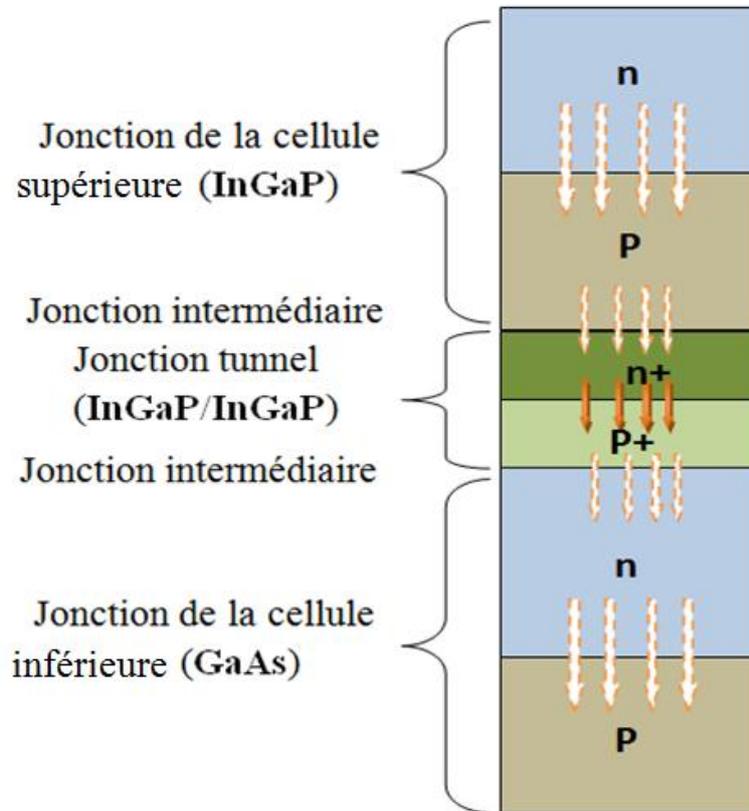


Figure V-7 : Cellule tandem avec une jonction tunnel.

### 8. La jonction tunnel

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

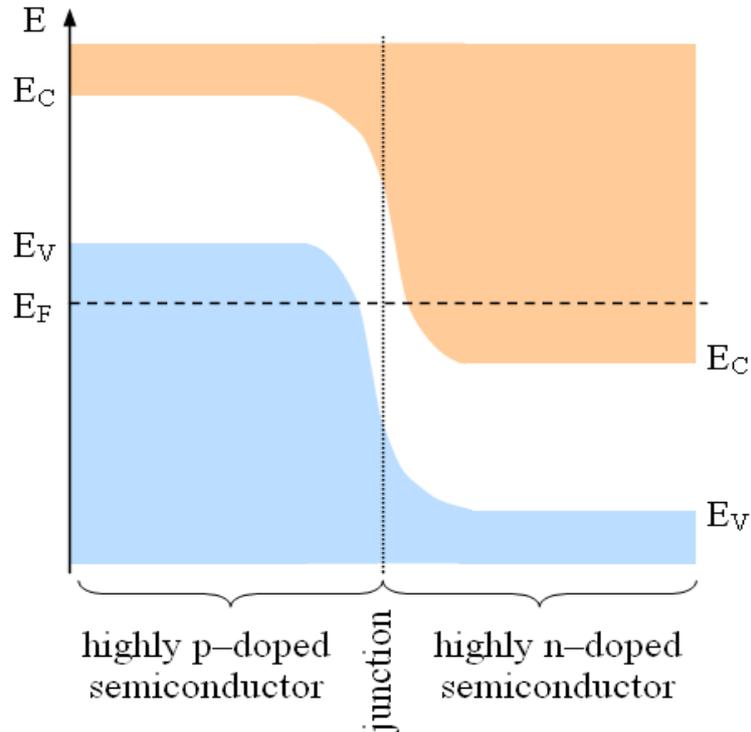


Figure V-8 : Diagramme de bande de dopage de la jonction tunnel [14]

### 8.1. Les types de la jonction tunnel

**8.1.1. Tunnel dû au gap direct:** le maximum de bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont sur le même « axe vertical ». Exemples de matériaux semi-conducteurs dont le gap est direct sont GaAs et InGaP [38].

**8.1.2. Tunnel dû au gap indirect:** le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence n'appartiennent pas à la même « axe vertical ».

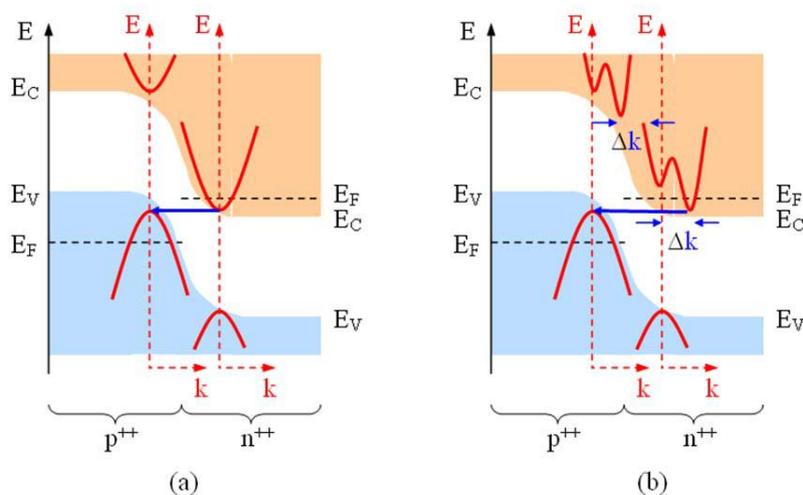


Figure V-9 : (a) Gap direct. (b) Gap indirect [14].

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

### 8.2. Modélisation de la jonction tunnel

La jonction tunnel dans une cellule à multi jonction peut être défini comme le phénomène de la vitesse de porteurs à travers la barrière de potentiel. La caractéristique I-V de la jonction tunnel est illustrée dans la figure V-10. Elle est modélisée par les équations ci-dessous [54]:

$$J_{TOTAL} = \frac{V(t)}{V_p} J_T + J_X + J_{TH} \quad (V-3)$$

$$J_T = J_p e^{1 - \frac{V(t)}{V(p)}} \quad (V-4)$$

$$J_X = J_V e^{A_2(V(t) - V_V)} \quad (V-5)$$

$$J_{TH} = J_S (e^{\frac{q(V(t))}{kT}} - 1) \quad (V-6)$$

Où

$J_{TOTAL}$  : densité de courant total de la jonction tunnel.

$J_T$ : densité de courant spécifique pour la diode tunnel.

$J_X$ : l'excès de densité de courant tunnel.

$J_{TH}$ : densité de courant caractérisant la diode.

$J_p$ : densité maximum (pic) du courant

$V_p$ : la tension maximum correspondant (pic).

$J_V$  : densité du courant maximale (pic)

$V_V$  : la tension maximale correspondant (pic).

$A_2$ : préfacteur d'excès de courant

$J_S$ : densité de courant de Saturation

$q$ : charge d'électron,

$k$  : constante de Boltzmann.

$T$ : température en Kelvin.

La concentration de dopage de matériaux influe sur la valeur de  $J_p$  et  $V_p$ [55]. Il existe deux cas de la jonction tunnel pour modéliser leur effet sur la cellule solaire.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

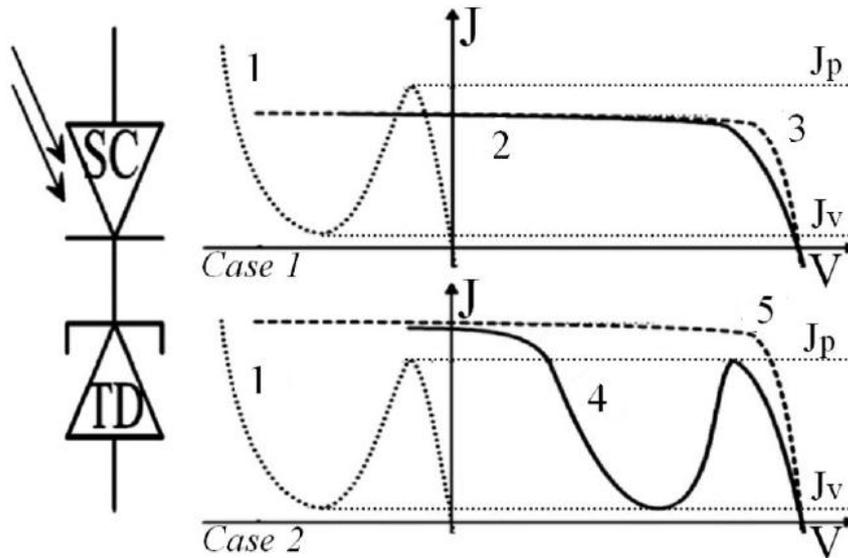


Figure V-10 : L'effet de la jonction tunnel [54].

✚ 1<sup>er</sup> cas: si le photon génère une densité du courant  $J$  (moins de la valeur maximale (pic) du courant tunnel  $J_p$ ). Par conséquent, la jonction tunnel possède une résistance ohmique faible connectant les cellules en tandem.

✚ 2<sup>ème</sup> cas: Avec l'augmentation d'irradiation,  $J$  dépasse le maximum (pic) de l'intensité de courant tunnel  $J_p$ .

La figure V-10 montre la caractéristique I-V. On distingue trois modes de fonctionnement de la jonction tunnel. La courbe 1 montre la caractéristique I-V de la diode tunnel. Les courbes 3 et 5 montrent la caractéristique I-V sous différentes irradiations, alors que les courbes 2 et 4 montrent la caractéristique IV résultante.

Le courant de la jonction tunnel  $J_p$  (courant de crête) de l'énergie de gap fonction, est donné par l'équation suivante.

$$J_p \propto \frac{-E_g^{3/2}}{\sqrt{N^*}} \quad (V-7)$$

$E_g$  : énergie de gap de matériau.

$N_A$  : concentration en impuretés ionisées de type accepteur.

$N_D$  : concentration en impuretés ionisées de type accepteur.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

$N^*$  : concentration effective de dopage. Elle est donnée par  $N^* = \frac{N_A \times N_D}{N_A + N_D}$

La valeur de  $J_p$  doit être supérieure à la photo courant de la cellule tandem. Si  $J_p < J_{SC}$ , la tension à travers la jonction tunnel augmente par rapport à une jonction p-n typique. Pour obtenir un rendement meilleur des cellules solaires, il faut que la jonction tunnel ne contienne pas des défauts. Le dopage excessif ou les défauts permettent la compensation des donneurs et des accepteurs dans la jonction. Par conséquent ces défauts augmentent la largeur de la zone de déplétion et donc diminuent le courant de la jonction tunnel. Ils réduisent aussi la stabilité thermique de la jonction tunnel et donc le rendement de la cellule en tandem [29].

### 8.3. Calcul du courant tunnel

La simulation par Tcad Silvaco tient en compte le profil des bandes d'énergie et la séparation entre les électrons générés dans la bande de conduction et les trous générés dans la bande de valence. Le courant tunnel est calculé en faisant un maillage de la structure de cellule en utilisant les instructions qty et qtx après le maillage principal de la cellule.

Le courant tunnel est calculé comme suit [27] :

$$J(E) = \frac{qkTm^*}{2\pi^2 \hbar^3} T(E) \ln \left\{ \frac{1 + \exp[E_{F1} - E]/KT}{1 + \exp[E_{F2} - E]/KT} \right\} \Delta E \quad (V-8)$$

$T(E)$ : la probabilité de tunnel.

$m^*$ : masse effective de l'électron.

$K$ : constante de Boltzmann

$q$  : charge électrique

$T$ : température en Kelvin

$\hbar$  : constante de Planck réduite

$E$ : l'énergie d'électron.

### 8.4. Critères de choix de la jonction tunnel

En 1958, l'auteur L. Esaki a découvert que la concentration de dopage des impuretés peut être augmentée de 1 à 1000 pour  $10^7$  atomes de semi-conducteurs [55]. Ce dopage crée une résistance négative. La zone de déplétion se rétrécit à cause de la concentration élevée du semi-conducteur. Ce qui va pousser les électrons à percer un tunnel à travers la barrière sans changer leur énergie.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

---

Le choix de la jonction tunnel et leur utilisation entre les cellules (supérieure et inférieure) doit satisfaire les critères suivants :

- ✚ Les matériaux semi-conducteurs doit posséder les mêmes constantes de réseau (maille).
- ✚ L'épitaxie de la cellule supérieure exige que la cellule inférieure doive supporter une température élevée. Mais l'augmentation de la température entraîne une diffusion du dopants et donc la diminution du courant de crête de la JT (courant de pic).
- ✚ La JT doit assurer un contact ohmique entre les deux cellules en tandem.
- ✚ Il faut qu'elle assure un passage des photons vers la cellule inférieure.
- ✚ Leur épaisseur ne doit pas dépasser 10nm pour minimiser l'absorption par cette jonction tunnel [29].
- ✚ Il faut que l'énergie de gap du tunnel doive être supérieure à celle de la cellule supérieure. Mais le courant tunnel va diminuer avec l'augmentation du gap.

### 8.5. L'avantage de l'utilisation de la jonction tunnel

Pour permettre la conduction électrique dans les deux sens entre les deux cellules InGaP et GaAs, on introduit une jonction tunnel. Elle assure la circulation du courant électrique dans la cellule en tandem et une résistance de connexion faible entre le BSF de la cellule supérieur (InGaP) et la fenêtre de la cellule inférieur (GaAs) [14] [54]. Par conséquent, si un rayon lumineux frappe une cellule solaire, la tension fournie par la cellule supérieure sera inversé [30]. L'épaisseur de la base et l'émetteur de jonction tunnel utilisé est de 8nm.

### 9. La couche fenêtre

Le rôle de la fenêtre est la minimisation de la recombinaison et la passivation de la surface des pièges des porteurs minoritaires. Leur effet est caractérisé par la vitesse de recombinaison de surface des porteurs minoritaires. La valeur élevée de cette vitesse diminue la réponse spectrale de la cellule InGaP/GaAs [29].

Il ya plusieurs critères à prendre en considération pour le choix de la fenêtre.

- ✚ La fenêtre utilisée est InAlAsP [56].
- ✚ La constante de réseau est proche de celle d'InGaP (5.65Å).
- ✚ L'énergie de gap de la fenêtre doit être supérieure à l'énergie de gap de l'émetteur (InGaP) ( $E_g=2.30\text{eV}$ ).
- ✚ Une concentration de dopage élevée plus de  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  [43] [53].
- ✚ Des matériaux qui produisent une vitesse de recombinaison de surface faible.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

### 10. Champ de la surface arrière (BSF)

Le BSF est utilisé pour passiver l'interface entre la base de la cellule supérieure et la jonction tunnel (JT) et réduire la diffusion des dopants de la jonction tunnel [29]. En effet, la vitesse de recombinaison est élevée au niveau de cette interface, influe sur la réponse spectrale (RS) et la tension à circuit ouvert ( $V_{OC}$ ).

Nous avons utilisé deux BSFs (InAlAsP pour la cellule supérieure et AlGaAs pour la cellule inférieure). Ce choix est fait en respectant les caractéristiques de la sous couche de BSF.

✚ les constantes de réseau de InAlAsP et de AlGaAs sont proches de celle de GaAs (5.65 Å et 5.64 Å respectivement).

✚ L'énergie de gap est supérieure à l'énergie de gap de GaAs ( $E_{g(InAlAsP)} = 2.30\text{eV}$ ,  $E_{g(AlGaAs)} = 1.80\text{eV}$ ).

✚ La concentration de dopage (est de l'ordre de  $10^{20}/\text{cm}^3$ ) [56].

### 11. Les propriétés de matériaux utilisés

La simulation d'une cellule solaire à hétérojonction nécessite une bonne optimisation et un bon choix de matériaux semi-conducteurs. Les matériaux semi-conducteurs peuvent être composé d'un seul élément ou un alliage de plusieurs éléments (ternaire, quaternaire....etc). L'alliage des matériaux semi-conducteurs comme InGaP dépend des propriétés physiques et électroniques de chaque semi-conducteur.

La modélisation mathématique joue un rôle important dans l'optimisation effective de la cellule à réaliser. Elle permet un choix approximative et proche de celle de l'expérimentation.

L'alliage des semi-conducteurs est l'étape principale pour simuler et réaliser une cellule solaire à hétérojonction. Dans notre cas, on a tenu en compte les propriétés des semi-conducteurs: InGaP et GaAs.

#### 11.1. Les critères adoptés pour faire l'alliage des matériaux semi-conducteurs III-V

Dans ce travail, nous avons utilisé des alliages des semi-conducteurs III-V comme le  $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_{(x)}\text{P}/\text{GaAs}$  car ils assurent un rendement élevé. Le calcul de certains paramètres dans un alliage ternaire  $\text{A}_{(x)}\text{B}_{(1-x)}\text{C}$  est donné par l'équation linéaire suivante (dite la loi de Vegard) [ 15] :

$$T_{ABC}(x) = xB_{AC} + (1-x)B_{BC} = a + bx \quad (\text{V-9})$$

Ou:  $a = B_{BC}$  et  $b = B_{AC} - B_{BC}$

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

Alors que d'autres paramètres des matériaux ternaires est donnée par la relation non linéaire suivante :

$$T_{abc} = xT_{ac} + (1-x)T_{bc} - x(1-x)c_{abc} \quad (V-10)$$

Ou

$T_{abc}$  : énergie de gap ternaire.

$T_{ac}$  et  $T_{bc}$  : énergie de gap binaire.

$X$  : la fraction molaire.

$c_{abc}$  : le facteur de Bowing.

Le tableau ci-après résume le paramètre de Bowing pour quelque matériaux ternaires.

Matériaux	InGaP	AlGaP	GaInAs	InAsN
Paramètre de Bowing	0.65	0	0.477	4.22

Tableau V-1: Valeurs des paramètres de Bowing pour des matériaux ternaires utilisés [15].

✚ Énergie de gap : la valeur de l'énergie de gap qui permet l'absorption du spectre AM1.5 varie de 1.75 à 1.8 eV pour la cellule supérieure (top) et de 1.1 eV pour la cellule inférieure (bottom) [50]. Dans notre thèse les deux cellules mises en tandem sont InGaP et GaAs dont l'énergie de gap est 1.90eV et 1.42 eV respectivement [56].

✚ La constante de réseau : l'épitaxie (hétérojonction) des deux semi-conducteurs différents ne peut se faire que si les semi-conducteurs ont des constantes de réseaux très proches pour éviter le désaccord de maille entre le substrat et le matériau semi-conducteur. La constante de réseau de  $In_{(1-x)}Ga_{(x)}P$  (un alliage ternaire) est calculée selon la loi de Vegard comme suit [6] [43] [51]:

$$\alpha_{In_{(1-x)}Ga_{(x)}P} = x\alpha_{GaP} + (1 - x)\alpha_{InP} \quad (V-11)$$

Ou  $\alpha$  est la constante de réseau et  $x$  est la fraction molaire.

Alors que le désaccord de réseau entre les matériaux semi-conducteur du substrat et celle du matériau des couches supérieures est donné par [43]:

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha(\text{epit})-\alpha(\text{sub})}{\alpha(\text{epit})} \quad (\text{V-12})$$

Le tableau ci-après résume les constantes de réseau des matériaux utilisées

Matériau	InGaP	GaAs	InAlAsP	AlGaAs
constante de maille (Å)	5.65	5.65	5.65	5.64

Tableau V-2: Valeurs des constantes de réseau de différents matériaux utilisés [56].

### 11.2. Propriétés des matériaux GaInP / GaAs

La construction des cellules solaires à hétérojonction dépend principalement du choix des matériaux semi-conducteurs et la compatibilité entre les propriétés physiques et électriques des matériaux des couches juxtaposées. La simulation et l'optimisation des matériaux semi-conducteurs utilisées dans la conception des cellules solaires ne sont pas assez simples. Ils sont limités par plusieurs paramètres optoélectroniques des matériaux tels que la durée de vie, la mobilité, la recombinaison, et la réfraction.

#### 11.2.1. Propriétés de matériau InGaP

Le  $\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$  est un composé ternaire. Il possède un gap direct pour une fraction molaire inférieure à 0.74 et un gap indirect pour une fraction molaire supérieure à 0.74. Il est caractérisé par une faible vitesse de recombinaison à la surface. Le tableau ci-après présente les propriétés de matériau  $\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$  à 300k.

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

Paramètre	$\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$	$\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	référence
Energie de gap (eV)	$E_g(x)=1.35+0.73x+0.7x^2$ (atlas)	1.89	[15]
Permittivité diélectrique $\epsilon$	12.5-1.4x	11.8	[15]
Affinité électronique $\chi$ (eV)	$\chi(x)=4.38-0.58x$	4.09	[15]
Constante de réseau ( $\text{Å}^\circ$ )		5.65	[53]
Coefficient d'Auger ( $\text{cm}^6/\text{s}$ )	$A(x) = -8.2 \times 10^{-30}x^2 + 8.3 \times 10^{-30}x + 9 \times 10^{-31}$	$3 \times 10^{-30}$	[43]
Recombinaison radiative $A_0$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$A_0(Eg) = (1 \pm 0.3)10^{-10}$		[43]
Recombinaison en surface	InGaP/GaAs : 1.5cm/s		[43]
Masse effective des électrons et des trous $m_{e(x)}^*$ et $m_{h(x)}^*$	$\frac{m_e^*(x)}{m_0} = 0.0254x^2 - 0.114x + 0.08$ $\frac{m_h^*(x)}{m_0} = 0.19x + 0.6$	$\frac{m_e^*(x)}{m_0} = 0.029$ $\frac{m_h^*(x)}{m_0} = 0.695$	[15]

Tableau V-3: Les propriétés de matériau  $\text{Ga}_{(x)}\text{In}_{(1-x)}\text{P}$  à 300k.

### 11.2.2. Propriétés de matériau GaAs

L'arséniure de gallium est un composé de gap direct. Il est caractérisé par une forte mobilité des électrons et une stabilité à une température élevée. Les propriétés du matériau GaAs sont illustrées dans le tableau ci-après [15] [43]:

## Partie1: Critères de Choix des Différents Paramètres

Paramètre	GaAs
Energie de gap (eV)	1.42
Permittivité diélectrique $\epsilon$	13.2
Affinité électronique $\chi$ (eV)	4.07
Constante de réseau (Å)	5.65
Coefficient d'Auger (cm <sup>6</sup> /s)	Dopé (n) : $1.9 \times 10^{-31}$ Dopé (p) : $12 \times 10^{-31}$
Recombinaison radiative $A_0$ (cm <sup>3</sup> /s)	$10^{-10}$
Masse effective des électrons et des trous $m_{e(x)}^*$ et $m_{h(x)}^*$	$\frac{m_e^*(x)}{m_0} = 0.067$ $\frac{m_h^*(x)}{m_0} = 0.642$

Tableau V-4 : Les propriétés de matériau GaAs à 300k.

### Conclusion

Dans ce chapitre ; nous avons basé sur le critère de choix de la cellule solaire à hétérojonction à base des matériaux InGaP/GaAs ainsi que les propriétés des couches nécessaires pour construire une cellule solaire en tandem. Le choix est fait dans le but d'améliorer la performance de cellule et diminuer les pertes.

## **Partie 2**

# **Simulation de la Cellule à Hétérojonction Optimisée**

## Partie 2: Résultats de Simulation

---

### 1. Introduction

Afin d'augmenter la performance de cellule solaire à hétérojonction, nous avons simulé la cellule tandem InGaP/GaAs en faisant varier les différents paramètres. Nous allons présenter les résultats obtenues sous forme de graphes avec interprétations de ces résultats.

### 2. Résultats de simulation

Nous avons utilisé comme paramètres technologiques et géométriques, ceux des jonctions d'InGaP et de GaAs et nous sommes intéressés aux émetteurs et aux bases de ces deux jonctions. Les paramètres utilisés sont : l'épaisseur, la fraction molaire et le dopage. Pour une meilleure solution optimisée, un des paramètres est fixe tandis que les autres sont variables sur une plage de valeurs afin d'obtenir un rendement optimale.

Les deux cellules sont interconnectées par une jonction tunnel. L'épaisseur de la celle-ci ainsi que les types de matériaux utilisés pour l'émetteur et la base, sont variés et choisis afin d'obtenir des meilleurs performances de la cellule InGaP/GaAs optimisé.

Les résultats de simulation nous a permis d'obtenir une structure à multi jonctions qui donne un rendement optimale à une température 300K. Les tableaux ci-après montrent les meilleurs résultats de chaque essai.

#### 2.1. Logiciel de simulation

La simulation d'une cellule solaire est nécessaire pour l'optimisation de son fonctionnement sans faire l'expérimentation. La simulation numérique permet un gain de temps et de l'argent.

Les différents simulateurs utilisés pour simuler le fonctionnement des cellules solaires sont : le logiciel PC1D, Afors-Het, Atlas silvaco...etc

Nous avons utilisé le logiciel TcadSilvaco car il permet de simuler des cellules solaires à multi couches et d'obtenir des résultats proches des résultats expérimentaux. Il permet aussi une simulation des paramètres électro-optiques telles que : la caractéristique I-V et la réponse spectrale.

La modélisation numérique (simulation) est basée sur la résolution des équations fondamentales : de Poisson, de continuité et celles des électrons et des trous.

La résolution numérique des équations exige une discrétisation du dispositif à simuler en déterminant leur géométrie et les conditions initiales ainsi que les conditions aux limites.

Il existe trois méthodes utilisées pour faire la discrétisation d'une structure à semi-conducteur telle que la cellule solaire : la méthode des éléments finis (FEM), la méthode de

## Partie 2: Résultats de Simulation

différences finies et la méthode de volumes finis. Le tableau ci-après résume la différence entre les deux méthodes (éléments finis et différences finies) [39] [49] :

Méthode des éléments finis (FEM)	Méthode de différences finies
<ul style="list-style-type: none"><li>- Difficile à réaliser.</li><li>- Plus précise.</li><li>- La flexibilité de varier plusieurs paramètres au même temps tel que la concentration de dopage, l'épaisseur, la température,...etc</li><li>- Le maillage est triangulaire ou carré.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Plus simple.</li><li>- Moins précis.</li><li>- Moins flexible.</li><li>- Conduit à un système d'équation non linéaire.</li><li>- Le maillage est rectangulaire.</li></ul>

Tableau V-5 : La comparaison entre la discrétisation avec la méthode de différences finies et la méthode des éléments finis (FEM).

La modélisation et l'optimisation des paramètres des cellules solaires sont nécessaires pour assurer une précision de simulation et par conséquent des rendements élevés. Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats de simulation de la structure de la cellule solaire en tandem à optimiser (InGaP/GaAs).

Nous interprétons aussi les résultats de simulation obtenus ainsi que les effets de différents paramètres géométriques et électriques sur la performance de la cellule optimisée tels que : l'épaisseur, la concentration de dopage, la fraction molaire, la couche fenêtre, le BSF et la jonction tunnel sur le rendement de cellule solaire.

L'objectif de la simulation est aussi d'extraire les caractéristiques électriques de la cellule tandem tels que : le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), facteur de forme (FF) et le rendement ( $\eta$ ).

### 2.2. La structure de la cellule

La cellule solaire à hétérojonction InGaP/GaAs est constituées de deux cellules : une cellule supérieure dite « top » et une cellule inférieure dite « bottom ». Les deux cellules sont

## Partie 2: Résultats de Simulation

interconnectées par une jonction tunnel. Les paramètres de la cellule optimisée sont illustrés dans la figure suivante :

Contact Anode			
30nm	Fenêtre	n+ InAlAsP	accept=1e19cm-3
55nm	Emetteur	n+InGaP	accept=15e18cm-3
550nm	Base	p+InGaP	donnors=11e18cm-3
30nm	BSF	P+ InAlAsP	donnors=10e19cm-3
Epaisseur ajustable	Emetteur tunnel	P+InGaP	donnors=9e19cm-3
	Base tunnel	n+InGaP	accept=9e19cm-3
40nm	Fenêtre	n+InGaP	accept=5e20cm-3
550nm	Emetteur	n+ GaAs	accept=1e18cm-3
3µm	Base	p+ GaAs	donnors=1e17cm-3
10nm	BSF	p+AlGaAs	donnors=10e19cm-3
150nm	Substrat	P+GaAs	donnors=1e18cm-3
Contact cathode			

Figure V-11 : Conception de la cellule InGaP/GaAs optimisée.

### 2.3. Le spectre solaire

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

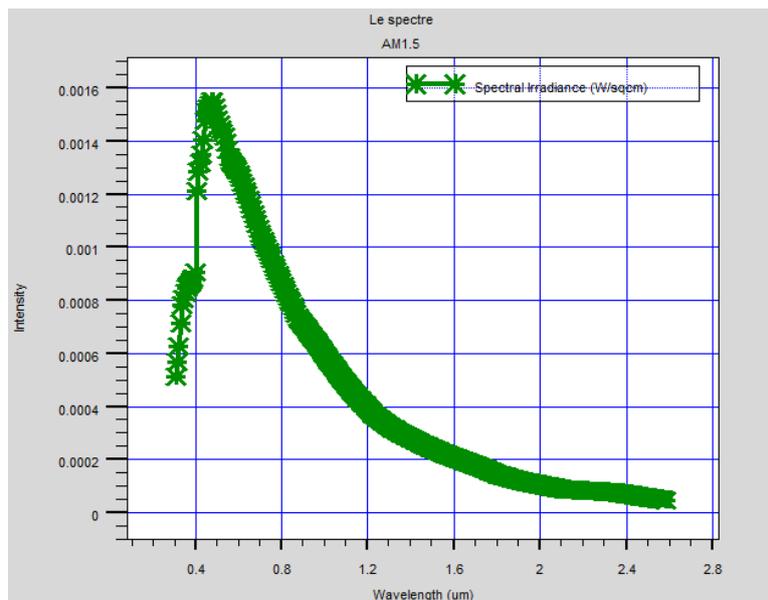


Figure V-12 : Le spectre solaire AM1.5 illuminant la cellule solaire

## Partie 2: Résultats de Simulation

Les longueurs d'ondes des photons absorbés s'étendent de 539nm à 0.873 nm. Le tableau V-6 suivant montre les longueurs d'ondes des matériaux utilisés.

✚ Pour le Gallium d'indium (InGaP), la bande interdite  $E_g$  est égale à 1,42 eV.

La longueur d'onde du photon d'énergie  $\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{1.42} = 0.873$  .

Matériaux	InGaP	GaAs	InAlAsP	AlGaAs
Longueurs d'ondes (nm)	873	652	539	688

Tableau V-6: Les longueurs d'ondes des matériaux utilisés.

✚  $\lambda < \lambda_0$  : matériau peut être utilisé comme photorécepteur.

✚  $\lambda > \lambda_0$  : milieu optiquement transparent (isolant).

✚  $\lambda \approx \lambda_0$  : il peut être utilisé comme émetteur de lumière.

Où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde d'émission.

Pour simuler la cellule solaire à hétérojonction, nous avons simulé chaque cellule isolée. Dans une première étape la cellule InGaP est simulée puis la cellule GaAs. Les deux cellules sont interconnectées par une jonction tunnel pour obtenir les caractéristiques (courant ( $J_{SC}$ ), tension ( $V_{OC}$ ), facteur de forme(FF) et rendement( $\eta$ ) de la cellule tandem InGaP/GaAs. La densité du courant de court-circuit de la cellule InGaP/GaAs ( $J_{SC}$ -tandem) est la plus faible densité de courant des deux cellules (supérieure ou inférieure). Alors que pour toute valeur de courant, la tension de circuit ouvert de la cellule en tandem doit satisfaire ( $V_{OC}$ -tandem= $V_{OC}$ -sup+  $V_{OC}$ -inf)[29].

Le rendement de la cellule solaire est donné par la relation suivante [13]:

$$\eta = \frac{FF \times J_{SC} \times V_{OC}}{P_{in}} \tag{V-13}$$

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

FF : est le facteur de forme. Il est donné par l'équation suivante :

$$FF = \frac{I_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \tag{V-14}$$

## Partie 2: Résultats de Simulation

### 3. Simulation de la cellule InGaP/GaAs

#### 3.1. Simulation de la cellule InGaP

La cellule solaire InGaP est simulée avec les caractéristiques mentionnée dans la figure V-11. Les résultats de simulation obtenus sont:

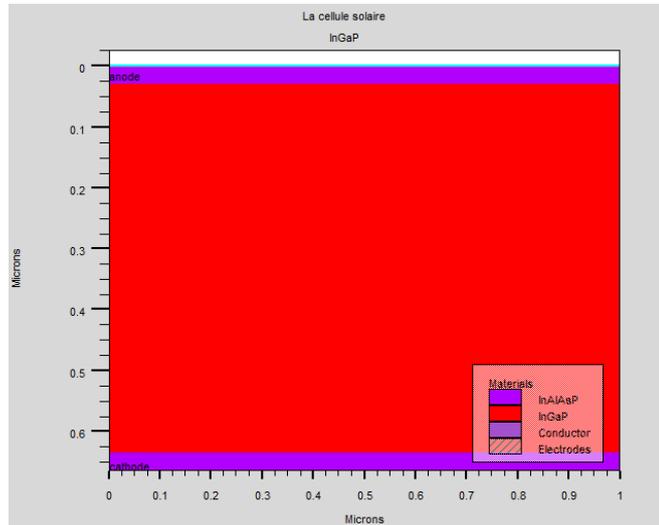


Figure V-13: Conception de la structure de la cellule InGaP optimisée.

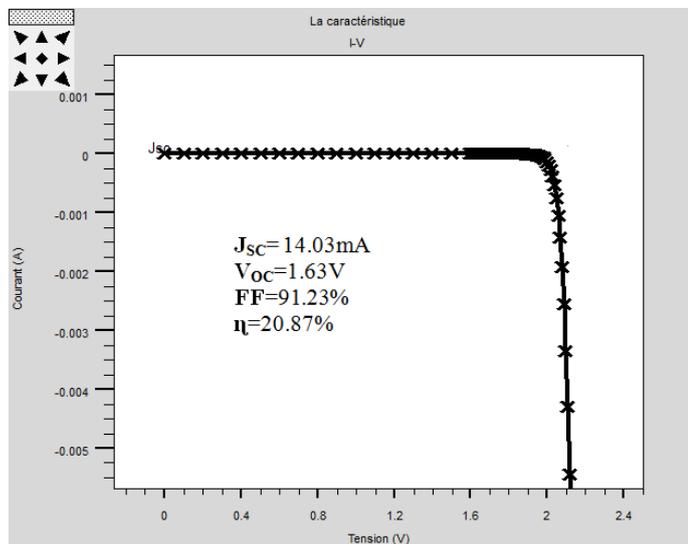


Figure V-14 : Caractéristique I-V de la cellule InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

### 3.2. Simulation de la cellule GaAs

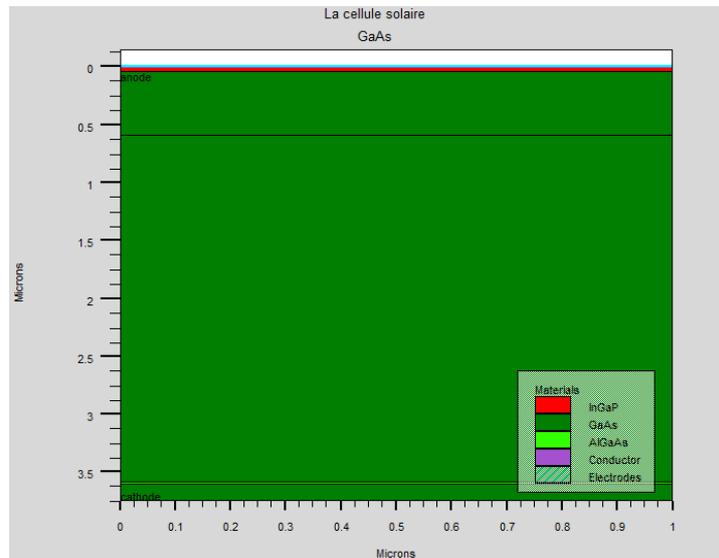


Figure V-15: Conception de la structure de la cellule GaAs optimisée.

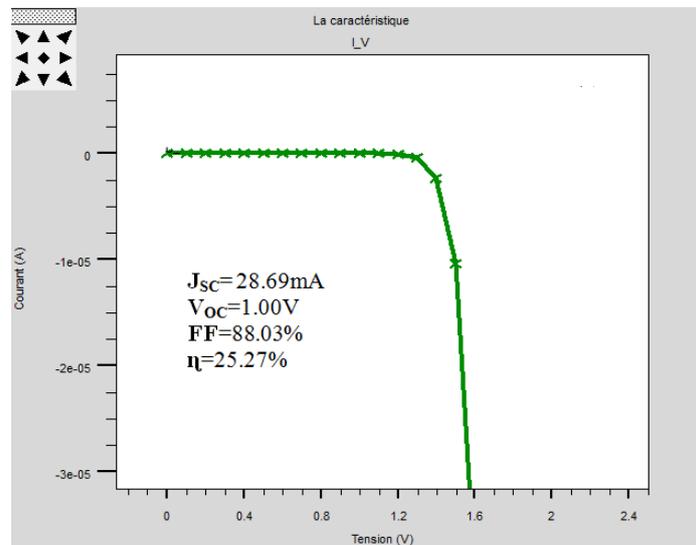


Figure V-16: Caractéristique I-V de la cellule GaAs.

#### 4. L'effet de la jonction tunnel

La jonction tunnel est utilisée entre les deux cellules InGaP/GaAs pour assurer une connexion d'une faible résistance entre le BSF (type p) de la cellule InGaP et la fenêtre (type n) de la cellule GaAs [29].

## Partie 2: Résultats de Simulation

---

La concentration élevée de dopage peut compenser les donneurs et accepteurs dans la jonction ce qui augmente la largeur de la zone de déplétion et diminue le courant tunnel.

### 4.1. Comparaison entre les différentes jonctions tunnels

Les jonctions tunnel les plus utilisés dans les cellules à multi couches sont les jonctions tunnel à base des matériaux GaAs/GaAs, InGaP/GaAs, InAlAsP/InGaP et InGaP/InGaP. Pour obtenir un meilleur rendement, nous avons simulé notre cellule solaire InGaP/GaAs en variant le type de la jonction tunnel en tenant compte de la concentration de chaque couche. Les différents résultats de simulation sont indiqués dans les tableaux et les figures ci-dessous. La jonction tunnel est non linéaire c.-à-d. le courant de la cellule dépend de la tension et de la température. La jonction tunnel de type InGaP/InGaP ne présente pas une résistance négative alors que celle de type GaAs/GaAs possède une résistance négative. Donc; le mouvement des porteurs est plus rapide dans la jonction de type InGaP [54].

#### 4.1.1. L'effet de la variation de l'épaisseur de la jonction tunnel

La cellule solaire InGaP/GaAs simulé dans ce travail avec une jonction tunnel de type InGaP/InGaP. La caractéristique I-V est obtenue uniquement pour une variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de 0.006 à 0.025  $\mu\text{m}$ . Les tableau V-7, V-8 et V-9 montrent la variation du rendement ( $\eta$ ), le facteur de forme (FF), le courant de court-circuit ( $J_{SC}$ ) et la tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ). Les figures montrent la courbe du rendement en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel.

## Partie 2: Résultats de Simulation

### La jonction tunnel InGaP/InGaP

Type de jonction (InGaP/InGaP)				
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Rendement $\eta(\%)$	FF (%)	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA)$
0.008/0.008	34.53	90.61	2.62	14.54
0.010/0.010	34.49	90.62	2.62	14.53
0.015/0.015	34.43	90.66	2.62	14.50
0.017/0.017	34.40	90.66	2.62	14.48
0.019/0.019	34.39	90.71	2.62	14.47
0.021/0.021	34.35	90.70	2.62	14.46
0.023/0.023	34.32	90.68	2.62	14.44
0.025/0.025	24.40	64.71	2.62	14.40

Tableau V-7 : Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP-InGaP

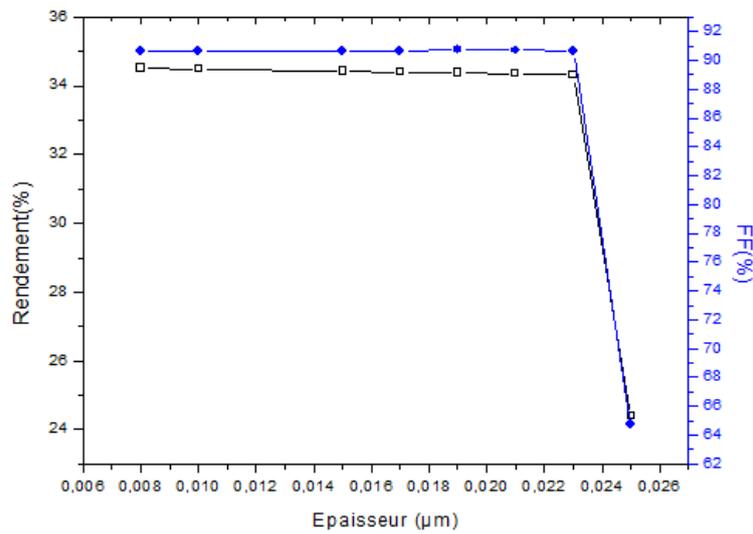


Figure V-17 : Variation de  $\eta$  et FF de la cellule solaire InGaP/GaAs en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel.

Le rendement de la cellule atteint une valeur maximale de 34.53% pour une épaisseur de 0.008  $\mu\text{m}$ . Il diminue avec l'augmentation de l'épaisseur et atteint une valeur minimale de 24.40% pour une épaisseur de 0.025  $\mu\text{m}$ . au-delà de 0.025  $\mu\text{m}$ , la solution ne converge pas.

## Partie 2: Résultats de Simulation

On remarque que le FF varie en fonction de l'épaisseur et atteint une valeur optimale de 90.71% pour une épaisseur de 0.019 $\mu\text{m}$  et une valeur minimale de 64.71% pour une épaisseur de 0.025 $\mu\text{m}$ .

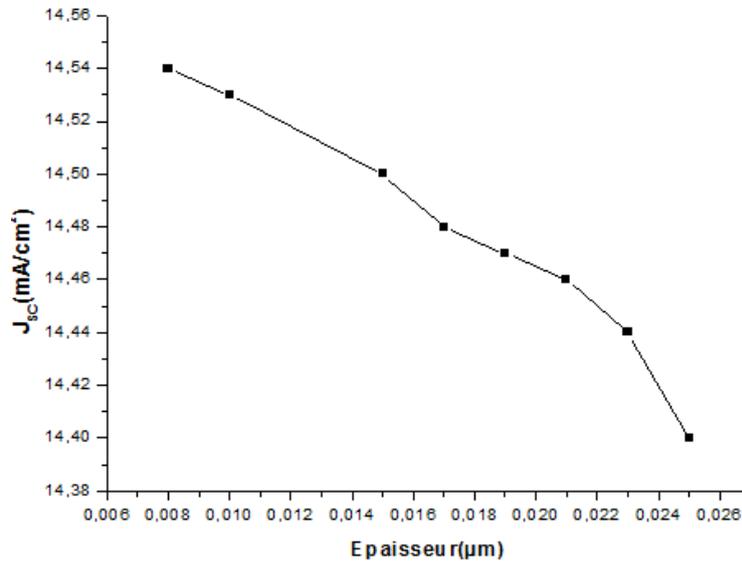


Figure V-18 : Le courant ( $J_{sc}$ ) de la cellule solaire InGaP/GaAs en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel.

Le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) maximale est de 14.55mA qui correspond à une épaisseur de 0.008  $\mu\text{m}$  car la génération du courant dépend de l'épaisseur des couches de la cellule.

Au fur et à mesure que l'épaisseur diminue, le rayon lumineux peut pénétrer à travers les différentes couches et donc causer une excitation des électrons et par conséquent la génération du courant. En dehors de la plage de l'épaisseur utilisée [0.008-0.025 $\mu\text{m}$ ] aucun résultat de simulation (caractéristique I-V) n'a été obtenu (aucune convergence). Si l'épaisseur dépasse 10nm, l'absorption des rayons lumineux par la jonction tunnel est diminuée ce qui influe sur le rendement de la cellule. L'énergie absorbée est régie par la loi suivante [57]:

$$E_{\text{abs}} = E_{\text{inc}} [1 - e^{(-\alpha d)}] \quad (\text{V-15})$$

Où  $E_{\text{inc}}$  est l'énergie incidente.  $d$  est l'épaisseur de la couche exprimée en cm.  $\alpha$  est le coefficient d'absorption. Il s'exprime en  $\text{cm}^{-1}$ . Il est calculé par l'équation suivante :

## Partie 2: Résultats de Simulation

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda}k \quad (V-16)$$

Où  $k$  est le coefficient d'extinction.

Plus  $\alpha$  est grand plus l'absorption se fait en surface, Plus  $\alpha$  est faible plus l'absorption se fait en volume.

✚ La jonction tunnel GaAs/GaAs

Le type de jonction (GaAs/GaAs)				
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Rendement(%)	FF (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA)
0.015/0.015	32.53	91.48	2.62	13.58
0.010/0.010	33.16	91.31	2.62	13.58
0.008/0.008	33.41	91.23	2.62	13.98
0.006/0.006	33.66	91.13	2.62	14.10
0.017/0.017	32.28	91.54	2.62	13.47
0.019/0.019	32.02	91.61	2.62	13.36
0.021/0.021	31.79	91.66	2.62	13.25
0.023/0.023	31.51	91.61	2.62	13.14
0.025/0.025	25.93	77.66	2.56	13.02

Tableau V-8: Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs-GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

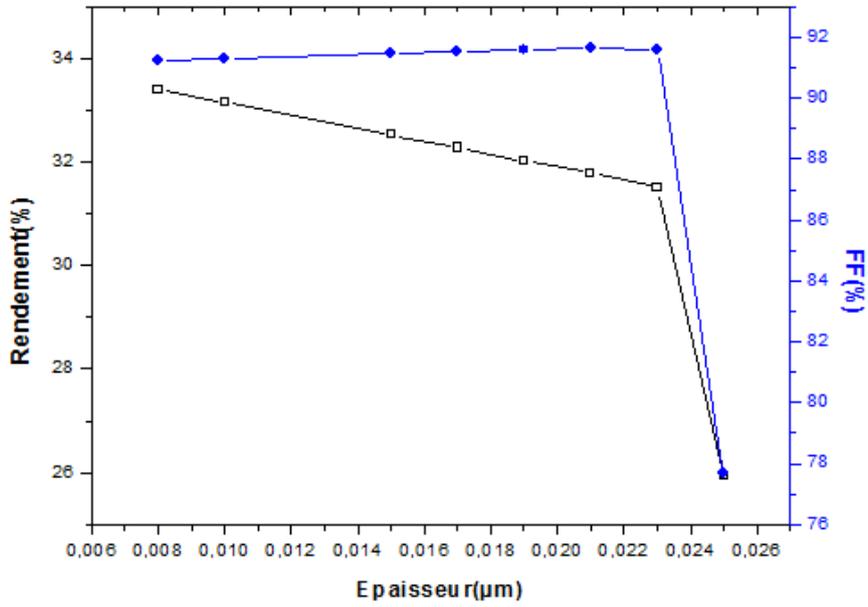


Figure V-19: Variation du rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs-GaAs.

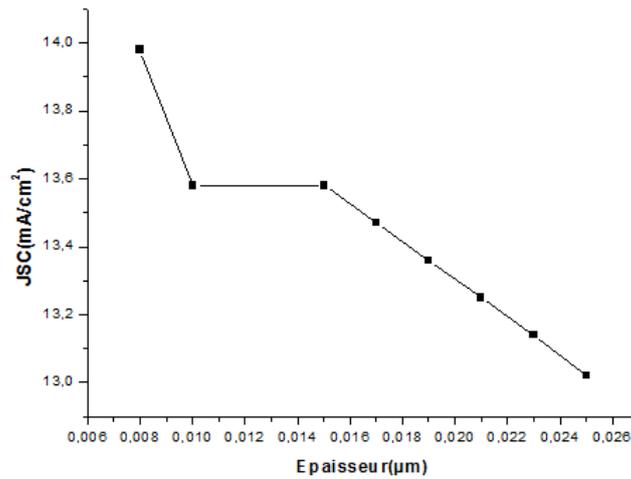


Figure V-20 : Variation du J<sub>SC</sub> de la cellule en fonction de l'épaisseur de la jonction tunnel de type GaAs-GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

### La jonction tunnel InGaP/GaAs

Le type de jonction (InGaP/GaAs)				
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Rendement(%)	FF (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA)
0.015/0.015	33.48	91.14	2.62	14.02
0.010/0.010	33.81	90.99	2.62	14.19
0.008/0.008	33.95	90.94	2.62	14.25
0.006/0.006	34.07	90.83	2.43	14.32
0.017/0.017	33.35	91.20	2.62	13.96
0.019/0.019	33.22	91.26	2.62	13.90
0.021/0.021	33.07	91.28	2.62	13.83
0.023/0.023	32.93	91.31	2.62	13.77
0.025/0.025	29.72	91.30	2.61	13.77

Tableau V-9: Variation de l'épaisseur de la jonction tunnel de type InGaP-GaAs

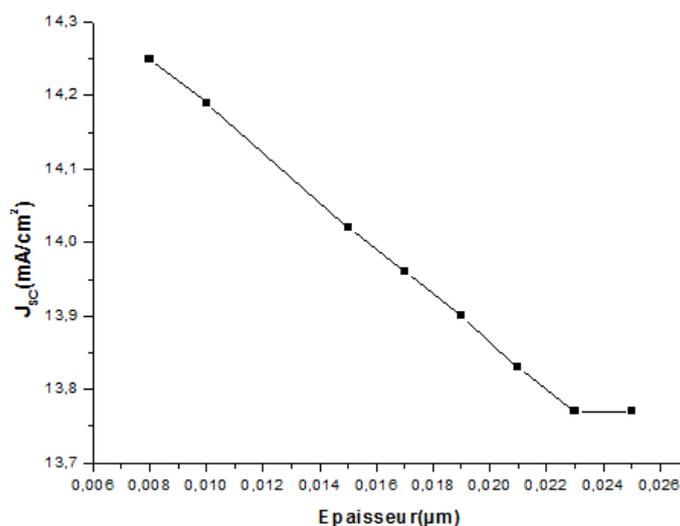


Figure V-21: Variation de  $J_{sc}$  de la cellule en fonction de l'épaisseur de la JT de type InGaP-GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

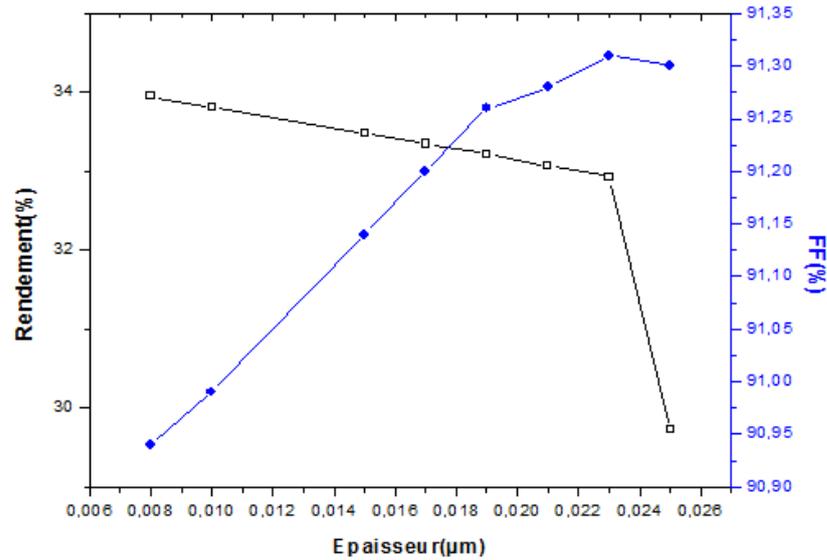


Figure V-22 : Variation du rendement et FF de la cellule en fonction de l'épaisseur de la JT de type InGaP-GaAs.

On constate que le rendement de la cellule diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la cellule. Il atteint un rendement maximal 34.07% pour une épaisseur de 0.006μm. Alors que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la jonction tunnel, il atteint une valeur maximale de 90.31% pour une épaisseur de 0.023μm. D'autre part l'intensité de courant diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la jonction tunnel car l'absorption des rayons se fait au niveau de la surface et donc la génération du courant.

Pour ces différentes épaisseurs de la jonction tunnel, nous avons varié le type de la jonction tunnel pour avoir un rendement meilleur. Le tableau 10 montre la variation de la jonction tunnel pour une épaisseur optimale de 0.008μm, ainsi que le rendement ( $\eta$ ), le facteur de forme (FF), la tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), le courant de court-circuit ( $J_{SC}$ ).

Le type de jonction	Rendement (%)	FF (%)	$V_{OC}$ (V)	$J_{SC}$ (mA)
InGaP/InGaP	34.53	90.61	2.62	14.54
InGaP/GaAs	33.95	90.94	2.62	14.25
GaAs/GaAs	33.41	91.23	2.62	13.98

Tableau V-10: Variation du rendement, FF,  $V_{OC}$  et  $J_{SC}$  selon le type de la jonction tunnel utilisée.

## Partie 2: Résultats de Simulation

On remarque que la cellule solaire ayant un rendement maximal est celle où nous avons utilisé la jonction tunnel de type InGaP/InGaP (34.53%). Les figures 23,24 et 25 montrent la variation du rendement, de FF et  $J_{SC}$  respectivement en fonction de type de la jonction tunnel.

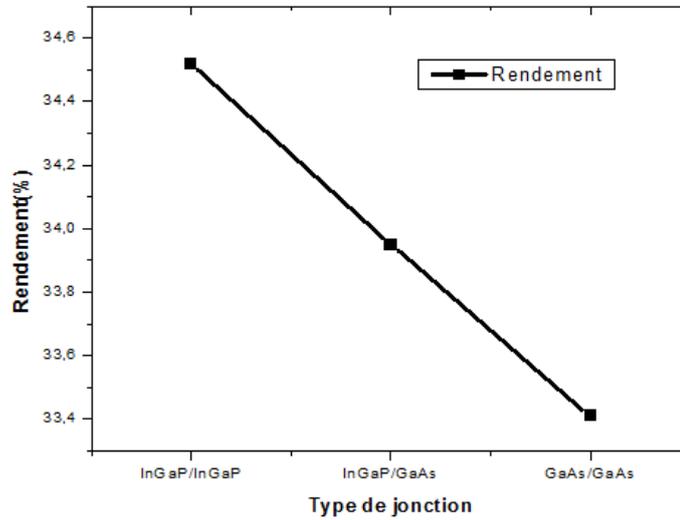


Figure V-23 : Variation du rendement en fonction du type de jonction tunnel utilisée.

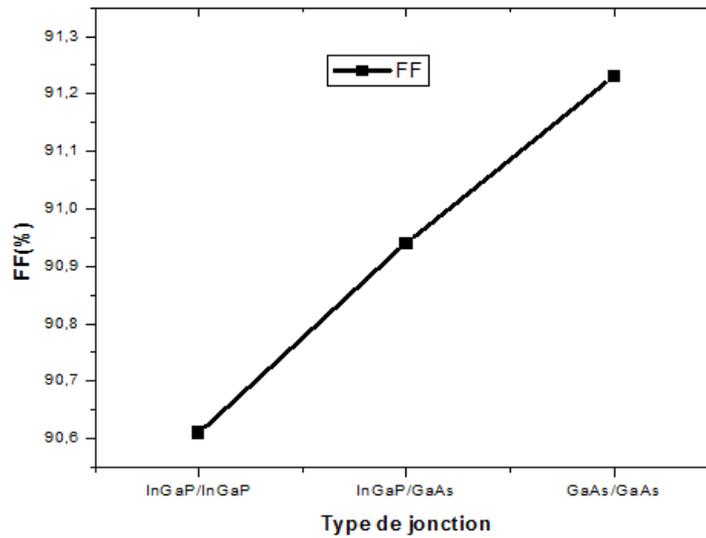


Figure V-24: Variation de l'intensité de courant en fonction du type de jonction tunnel utilisée.

## Partie 2: Résultats de Simulation

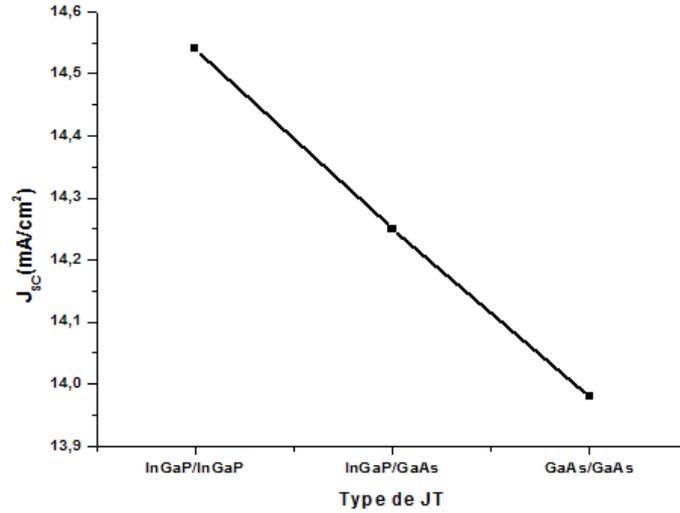


Figure V-25 : Variation de l'intensité de courant en fonction du type de jonction tunnel utilisée.

Après, nous avons simulée la cellule solaire sans la jonction tunnel, nous avons remarqué une diminution importante du rendement de 34.53 % à 10.98%. Donc, la jonction tunnel a un rôle important dans l'amélioration du rendement de la cellule solaire.

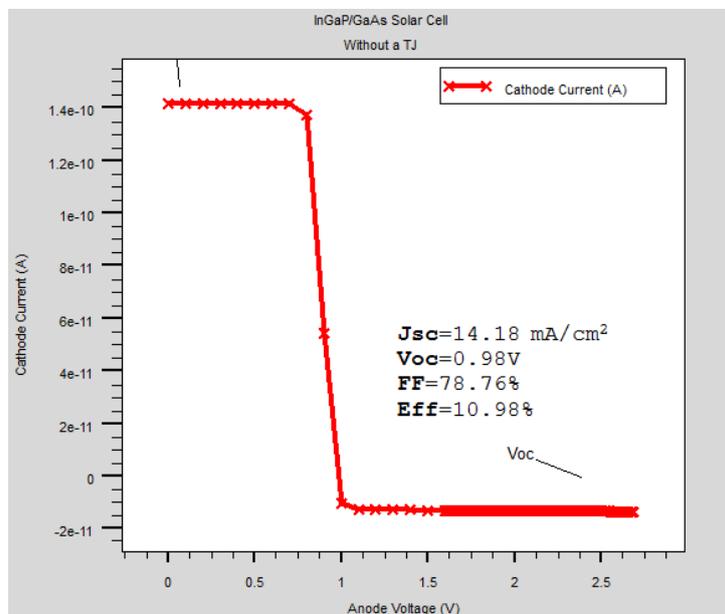


Figure V-26: Simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs sans la jonction tunnel.

## Partie 2: Résultats de Simulation

### 5. L'effet de la couche fenêtre sur le rendement de la cellule

Le choix de la couche fenêtre mince et fortement dopée ( $10^{19}\text{cm}^{-3}$ ) « InAlAsP » est choisi en prenant en considération certains critères comme l'énergie de gap qui doit être supérieure à celle de l'émetteur InGaP et il doit produire une vitesse de recombinaison de surface faible.

En premier temps, la cellule solaire InGaP/GaAs est simulée sans la couche fenêtre, la caractéristique I-V est illustré dans la figure (V-27). Les valeurs du courant de court circuit ( $J_{SC}$ ), tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement ( $\eta$ ) sont respectivement :  $J_{SC}= 13.07\text{mA}$ ,  $V_{OC}= 1.52\text{V}$ ,  $FF= 73.97\%$ , et  $\eta=14.70\%$ .

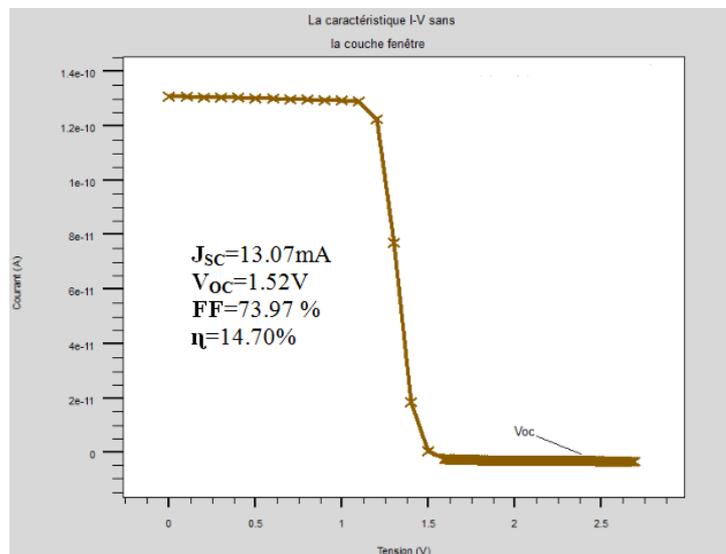


Figure V-27: Simulation de cellule solaire tandem sans la couche fenêtre.

Dans une deuxième étape, la cellule InGaP/GaAs est simulée en introduisant la couche fenêtre InAlAsP, on remarque une amélioration dans les caractéristiques I-V de la cellule tels que le courant du court-circuit ( $J_{SC}=14.60\text{mA}$ ), tension de circuit ouvert ( $V_{OC}=2.62\text{V}$ ), facteur de forme ( $FF=90.32\%$ ) et le rendement ( $\eta=34.53\%$ ).

## Partie 2: Résultats de Simulation

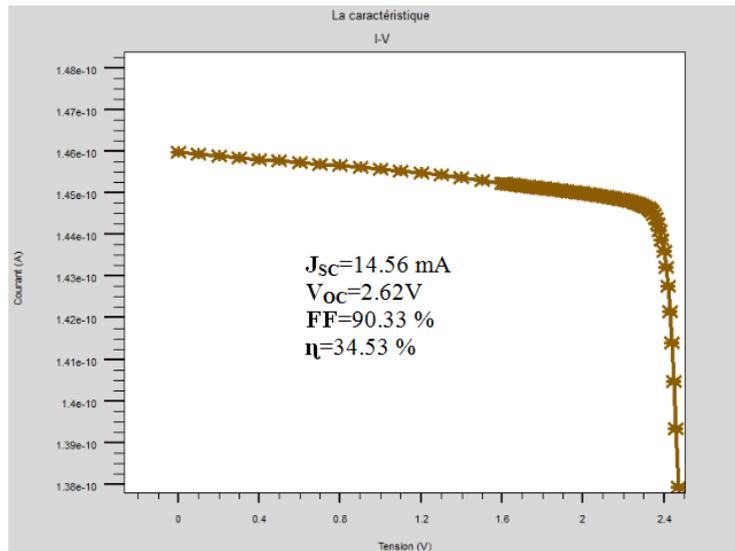


Figure V-28: Simulation de la cellule solaire avec la couche fenêtre.

Donc, la couche fenêtre permet aux électrons de circuler vers les contacts électriques sans augmenter la résistance des cellules en série et d'augmenter le rendement de la cellule. La couche fenêtre évite la recombinaison en surface et résout le problème du désaccord de maille.

### 5.1. Variation de la fraction molaire de la couche fenêtre

Les fractions molaires des matériaux  $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{P}$  et  $\text{Al}_{(x)}\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$  sont prises comme constantes  $x=0.5$  et  $x=0.67$  respectivement, alors que la fraction molaire de la couche fenêtre est variée comme il est illustré dans le tableau suivant :

## Partie 2: Résultats de Simulation

La fraction molaire $\text{In}_{(x)}\text{Al}_{(1-x)}\text{As}_y\text{P}_{(1-y)}$		$J_{\text{SC}}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{\text{OC}}(\text{V})$	FF(%)	$\eta(\%)$
x	Y				
0.371	0.159	14.37	2.64	90.54	34.32
0.371	0.15	14.39	2.63	90.46	34.17
0.371	0.19	14.37	2.64	90.55	34.27
0.4	0.19	14.60	2.60	90.23	34.32
0.45	0.159	14.60	2.62	90.32	34.48
0.42	0.20	14.60	2.60	90.17	34.23
0.5	0.19	14.58	2.60	90.17	34.18
0.73	0.23	14.47	2.54	90.01	33.02
0.39	0.16	14.60	2.62	90.33	34.53

Tableau V-11 : Résultats des variations de FF,  $J_{\text{SC}}$ ,  $V_{\text{OC}}$  et  $\eta$  en fonction de la fraction molaire.

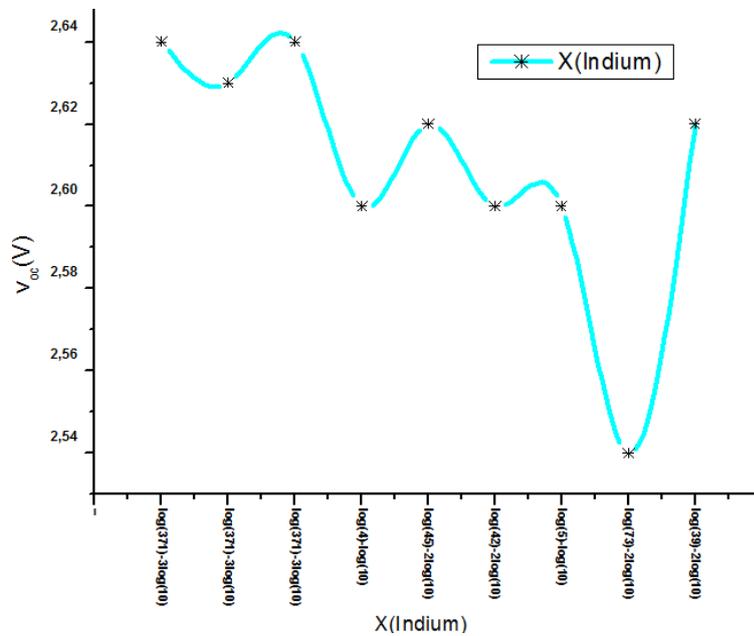


Figure V-29 : Variation de  $V_{\text{OC}}$  en fonction de la fraction molaire d'Indium.

## Partie 2: Résultats de Simulation

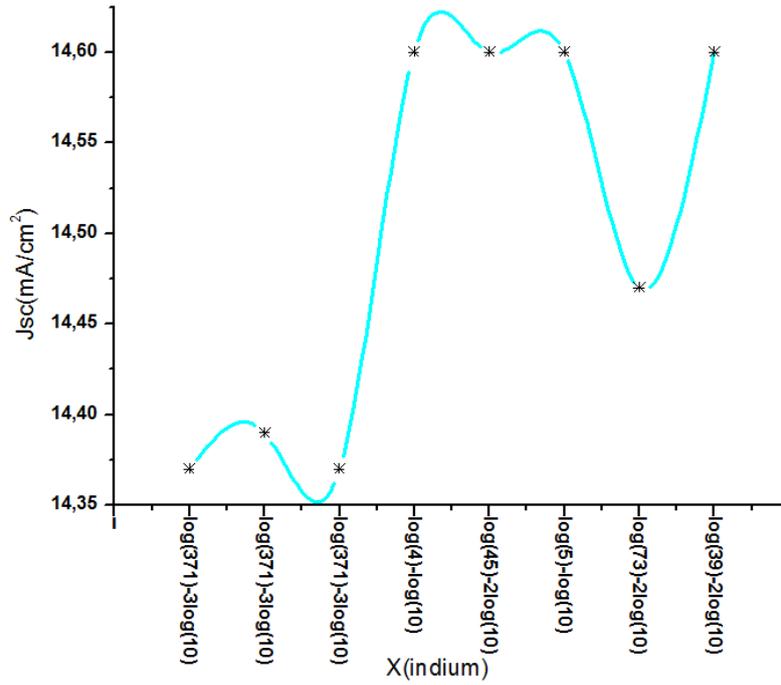


Figure V-30: Variation de  $J_{sc}$  en fonction de la fraction molaire d'indium.

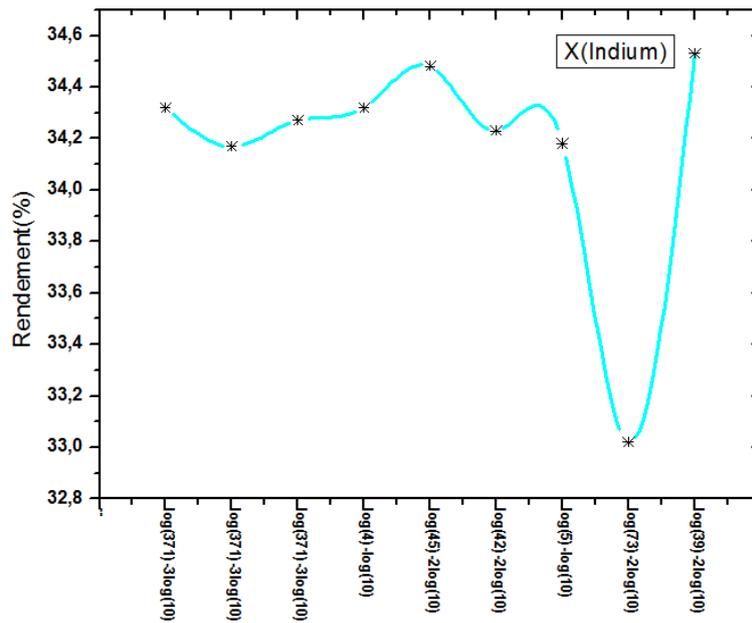


Figure V-31: Variation de rendement en fonction de la fraction molaire d'Indium.

## Partie 2: Résultats de Simulation

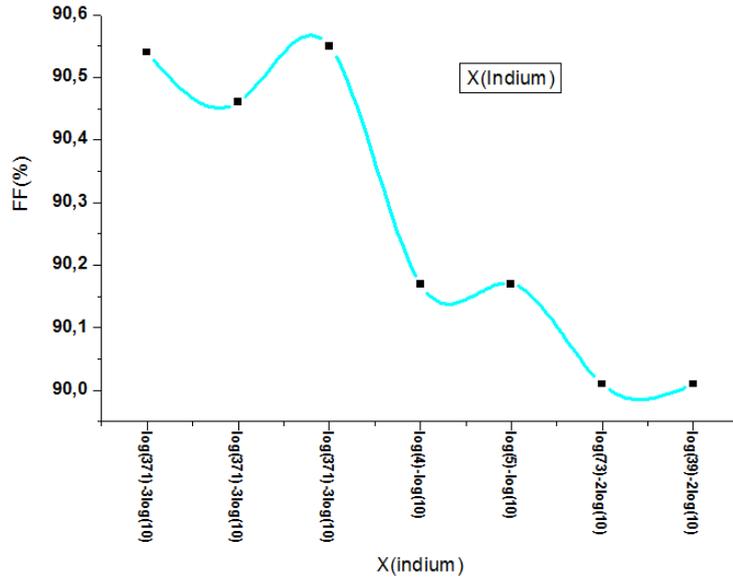


Figure V-32: Variation de FF en fonction de la fraction molaire d'indium.

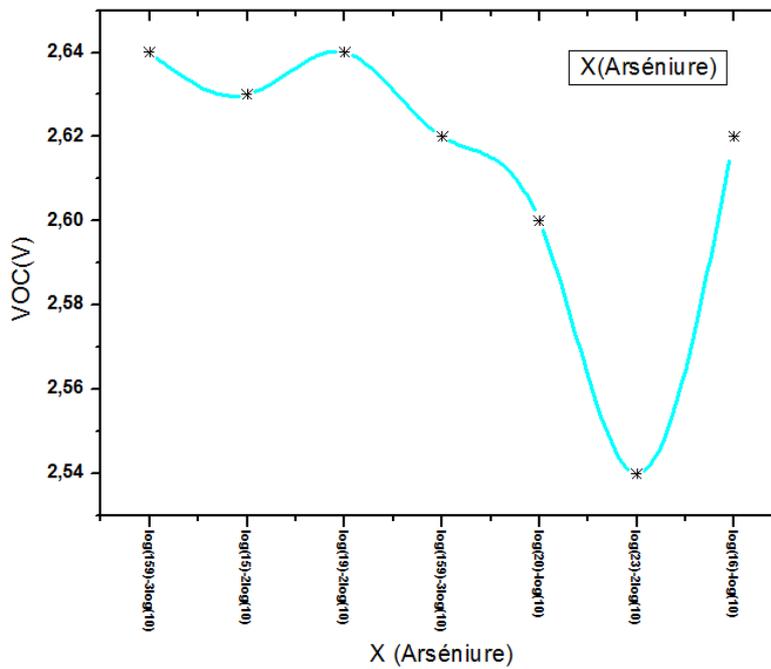


Figure V-33: Variation du  $V_{OC}$  en fonction de la fraction molaire d'Arseniure.

## Partie 2: Résultats de Simulation

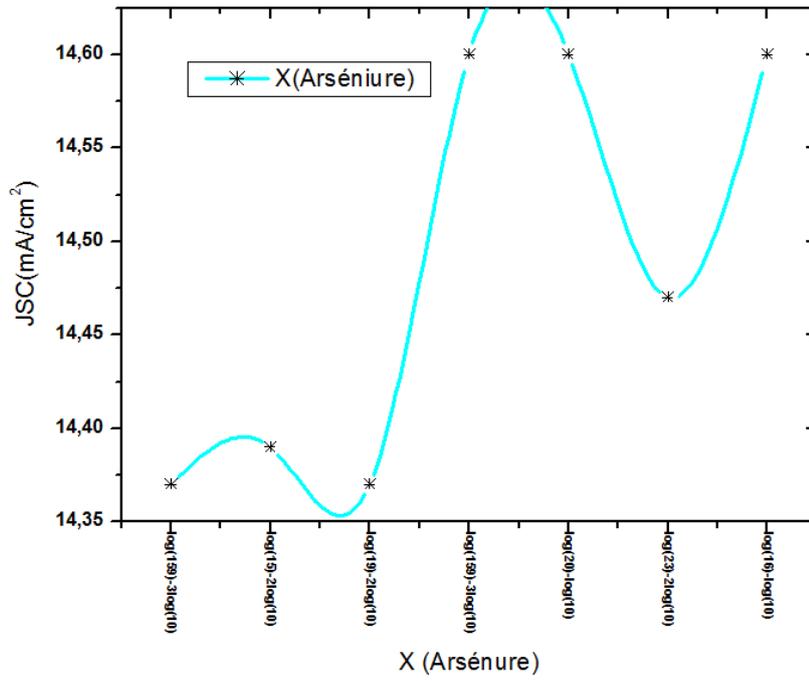


Figure V-34: Variation de la  $J_{SC}$  en fonction de la fraction molaire d'Arséniure.

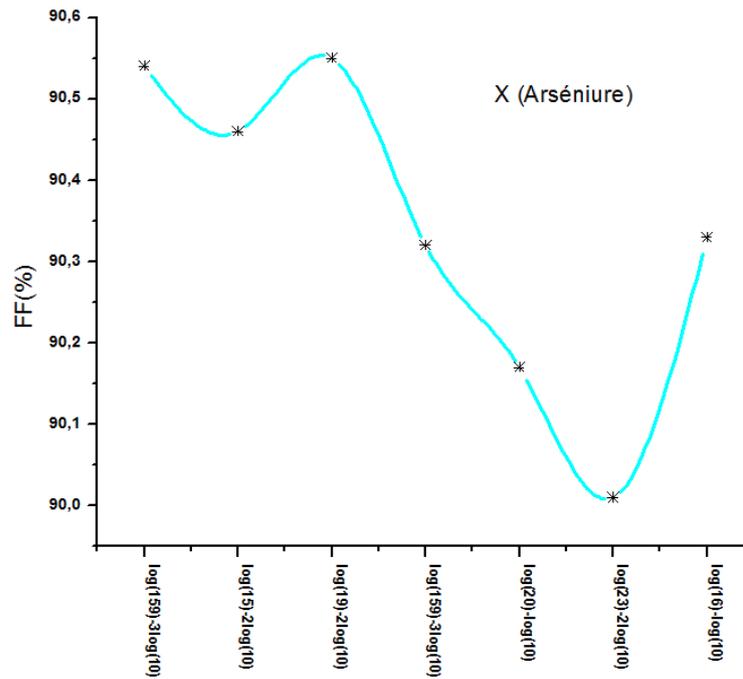


Figure V-35: Variation de FF en fonction de la fraction molaire d'Arséniure.

## Partie 2: Résultats de Simulation

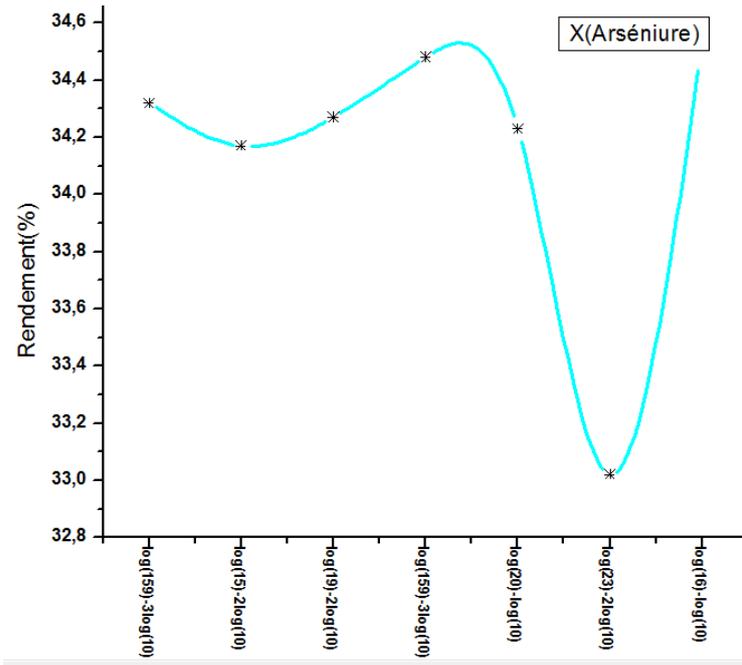


Figure V-36: Variation du rendement en fonction de la fraction molaire d'Arséniure.

A partir des résultats obtenues et illustrés dans le tableau 11 et les différents graphes, on remarque que la tension à circuit ouvert atteint une valeur maximale de 2.64 V pour une fraction molaire d'indium  $x= 0.371$  et  $y= 0.159$  pour l'arséniure mais cette valeur ne correspond pas à la valeur optimale du rendement. Les résultats correspondants à un rendement meilleur ont été obtenus pour les fractions ( $x=0.39$ ,  $y=0.19$ ) pour InAlAsP, ( $x=0.5$ ) pour InGaP et ( $x=0.67$ ) pour AlGaAs en prenant tous les autres paramètres constants.

### 6. L'effet de champ de la surface arrière (BSF)

Pour optimiser l'effet de la couche BSF dans l'amélioration du rendement de la cellule solaire en tandem InGaP/GaAs. Nous avons simulé la cellule sans l'introduction de couche BSF de la cellule InGaP, et par la suite sans le BSF de la cellule GaAs. Après, nous avons simulé la cellule sans les deux BSFs. Le matériau utilisé pour la couche BSF de la cellule InGaP est InAlAsP avec une concentration de dopage  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  et celle utilisée pour la cellule GaAs est AlGaAs avec une concentration de dopage  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ . Les caractéristiques I-V de chaque cas sont illustrées dans les figures ci après :

## Partie 2: Résultats de Simulation

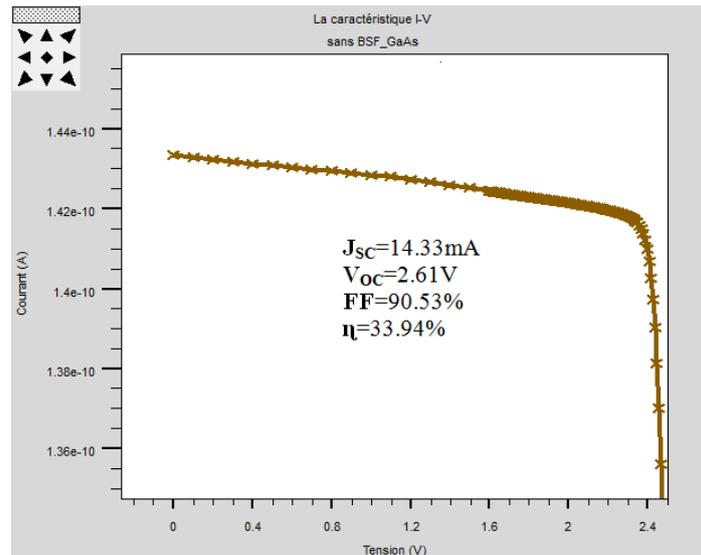


Figure V-37 : Caractéristique I-V sans la couche BSF de la cellule GaAs.

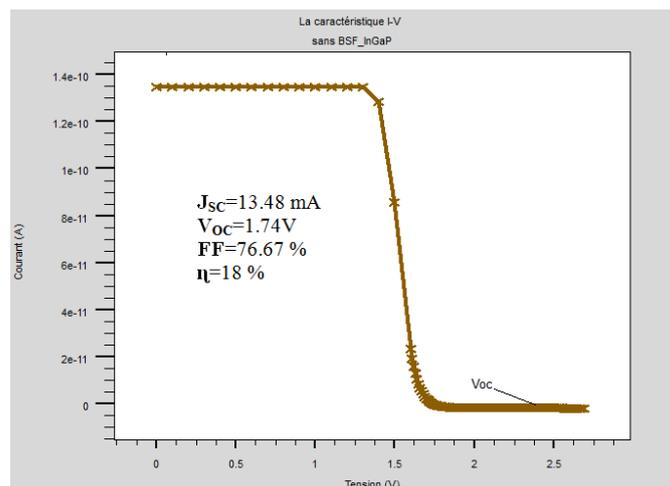


Figure V-38 : Caractéristique I-V sans la couche BSF de la cellule InGaP.

On remarque que la couche BSF de la cellule solaire InGaP (Top) a un effet très important dans l'amélioration de la tension de la cellule InGaP/GaAs par la minimisation des recombinaisons à la surface arrière.

Après, nous avons introduit les deux BSFs de la cellule, la figure (V-39) montre la caractéristique tension-courant de la cellule solaire optimisée. On peut conclure que le BSF a deux contributions sur la structure de la cellule. D'une part, elle permet d'améliorer la tension de circuit ouvert et par conséquent de diminuer le courant de l'obscurité dans la cellule. D'autre part le champ électrique intégré dans la jonction p-p+ confiné les porteurs

## Partie 2: Résultats de Simulation

minoritaires, par conséquent elle permet d'augmenter la tension de court-circuit de la cellule solaire, de minimiser les recombinaisons et donc collecter des porteurs majoritaires [1] [3] [41].

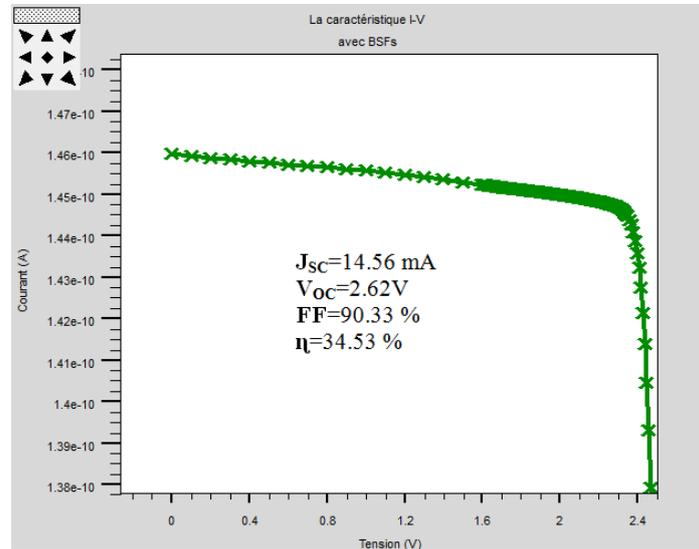


Figure V-39 : Caractéristique I-V de la cellule InGaP/GaAs avec les BSFs des deux jonctions.

### 7. Variation de l'épaisseur des bases

Nous avons utilisé les résultats correspondants aux fractions molaires obtenues dans le tableau 12 et qui ont donné le meilleur rendement, comme constants et nous avons varié les épaisseurs de bases d'InGaP et de GaAs, afin d'observer leurs effets sur le rendement de la cellule solaire à une température ambiante 300K. Les épaisseurs des bases ont été variées de 0.4 à 0.55  $\mu\text{m}$  pour la base d'InGaP et de 1 à 3  $\mu\text{m}$  pour la base de GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

Epaisseur de la base (microns)		$J_{sc}(mA/m^2)$	$V_{oc}(V)$	FF(%)	$\eta(\%)$
InGaP	GaAs				
0.4	1	14.11	1.72	75.75	18.36
0.44	1.4	14.42	1.72	74.99	18.61
0.46	1.8	14.58	1.72	74.54	18.72
0.48	1.8	14.53	1.72	74.69	18.70
0.5	2.2	14.61	1.72	74.43	18.74
0.52	2.2	14.54	1.73	74.62	18.71
0.55	3	14.60	2.62	90.33	34.53
0.55	2	14.40	2.62	90.81	34.28

Tableau V-12: Résultats de variation de l'épaisseur des bases.

## Partie 2: Résultats de Simulation

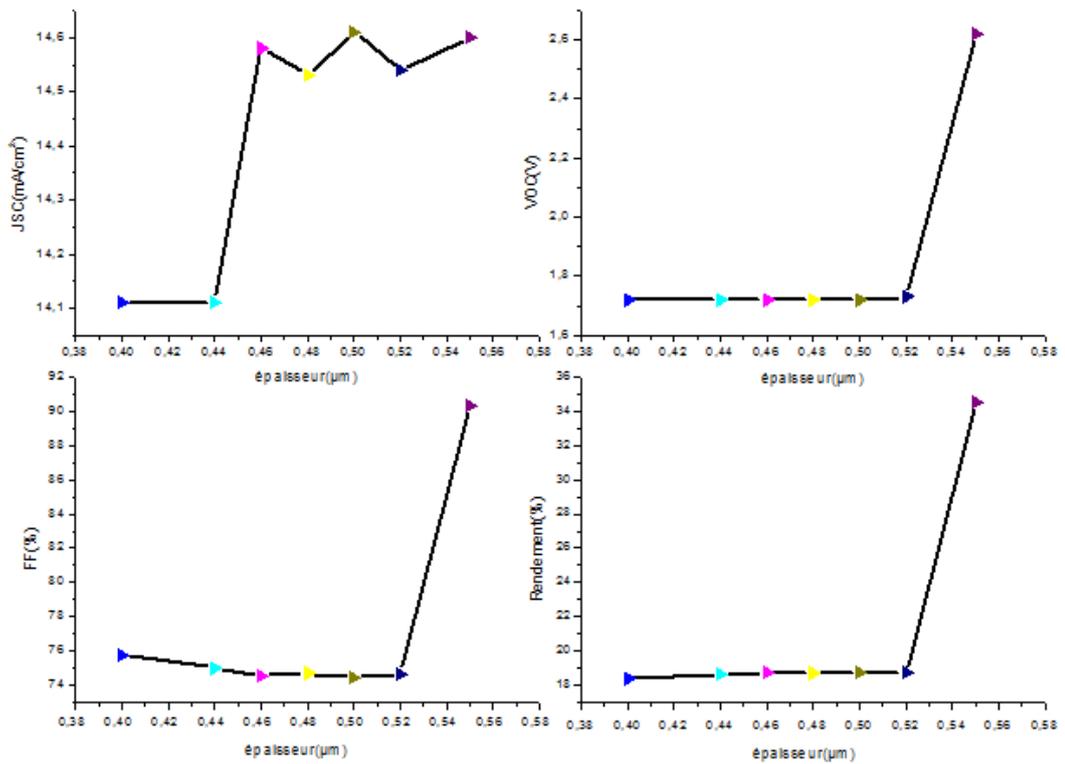


Figure V-40: Variation du rendement, FF,  $V_{OC}$  et  $J_{SC}$  en fonction de l'épaisseur de la base InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

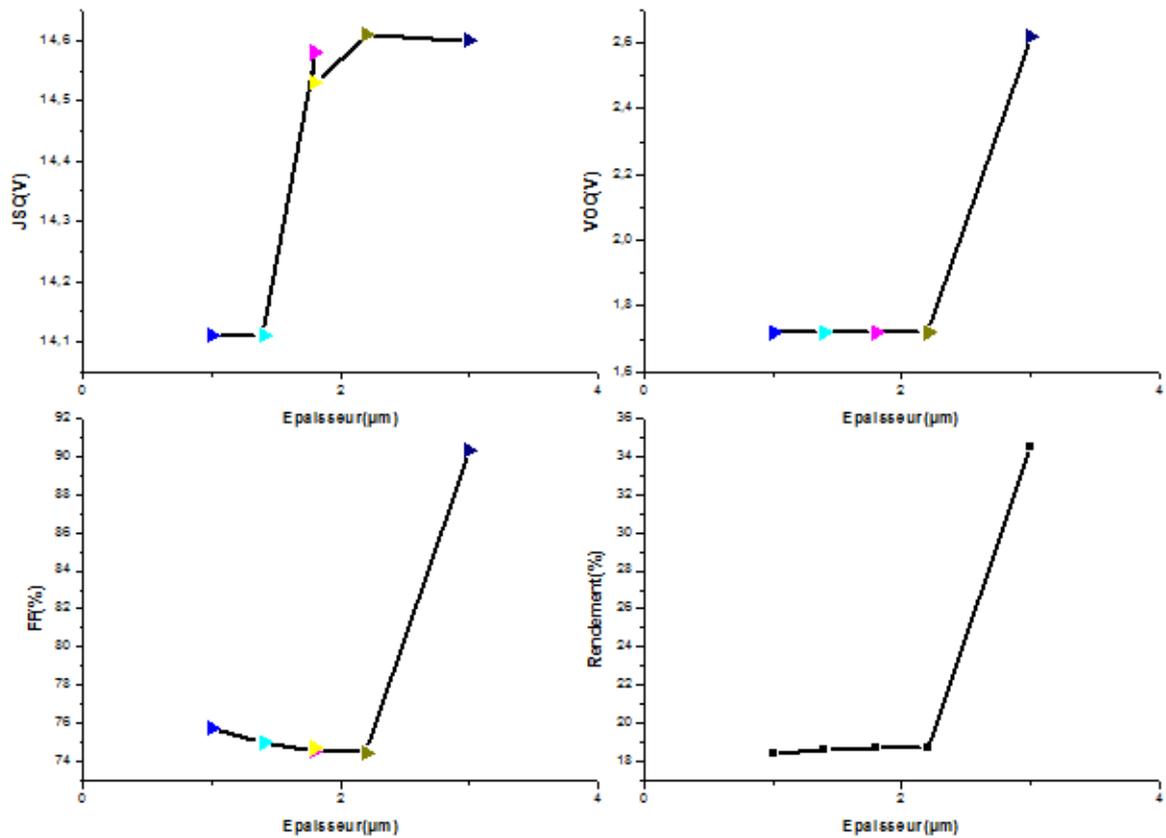


Figure V-41 : Variation de rendement, FF, V<sub>OC</sub>, J<sub>SC</sub> en fonction de l'épaisseur de la base GaAs.

Ces résultats montrent que l'épaisseur des bases de la cellule hétérogène proposée affecte le courant de la cellule et la tension et donc sur le rendement.

### 8. Variation des niveaux de dopage

#### 8.1. Concentration de dopage des bases

En variant les niveaux de dopage des bases des deux cellules (supérieure et inférieure) pour une température  $T=300K$  et en prenant l'épaisseur pour lequel le rendement est optimal comme constant. Dans une première étape, nous avons pris le dopage de la base GaAs constant ( $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) et nous avons varié le dopage de la base InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

Dopage de base (cm <sup>-3</sup> )	J <sub>SC</sub> (mA/m <sup>2</sup> )	V <sub>OC</sub> (V)	FF(%)	η(%)
InGaP				
7x10 <sup>14</sup>	15.18	2.14	83.57	27.08
1x10 <sup>15</sup>	14.58	2.31	88.23	29.72
2x10 <sup>16</sup>	14.59	2.37	88.27	30.53
4x10 <sup>16</sup>	14.57	2.39	88.21	30.76
5x10 <sup>17</sup>	14.59	2.46	88.49	31.78
2x10 <sup>17</sup>	14.59	2.44	88.00	31.25
3x10 <sup>18</sup>	14.59	2.53	86.58	31.96
9x10 <sup>18</sup>	14.60	2.61	90.36	34.51
11x10 <sup>18</sup>	14.60	2.62	90.32	34.53

Tableau V-13 : Résultats de variation de concentrations de dopage de base InGaP.

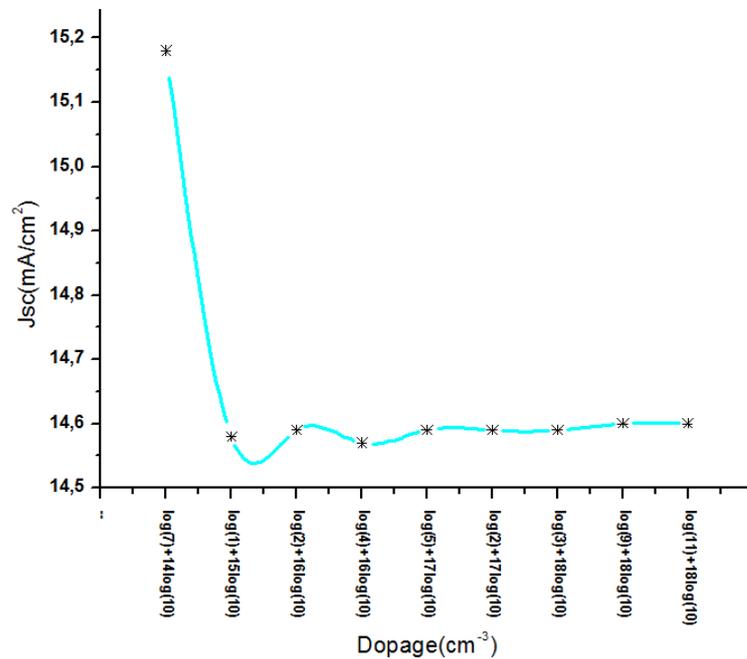


Figure V-42 : Variation de J<sub>SC</sub> en fonction du dopage la base InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

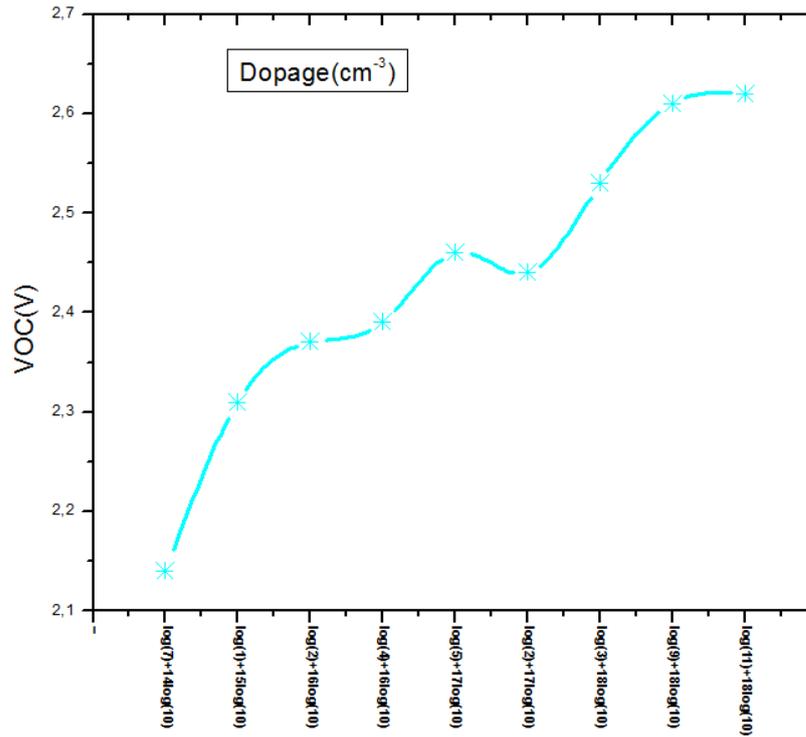


Figure V-43: Variation de  $V_{OC}$  en fonction du dopage la base InGaP.

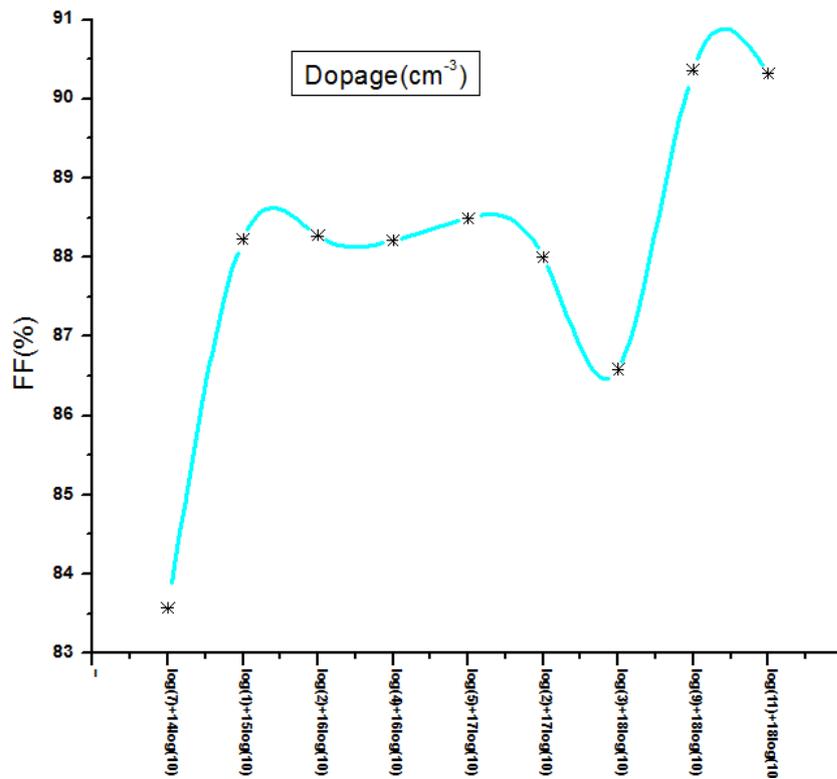


Figure V-44 : Variation de FF en fonction du dopage la base InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

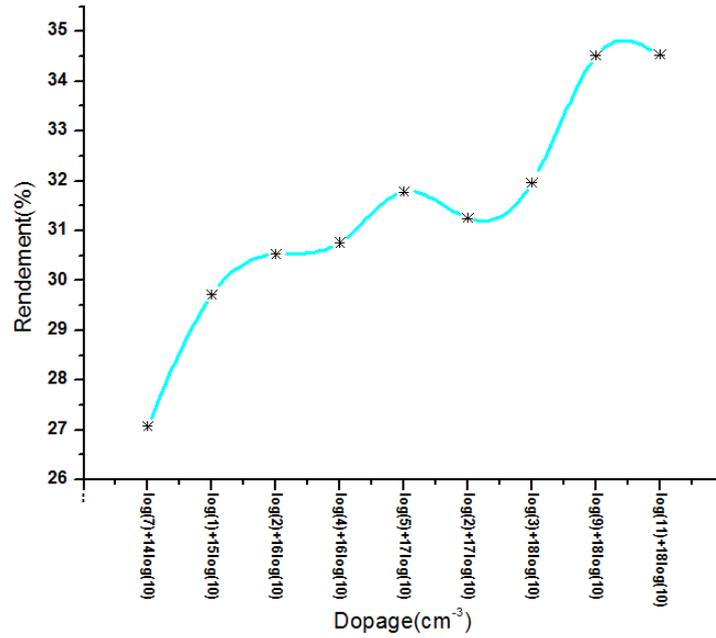


Figure V-45 : Variation du rendement en fonction du dopage la base InGaP.

Pour un dopage de la base InGaP de  $11 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , nous avons varié le dopage de la base GaAs comme la montre le tableau suivant :

Dopage de base (cm <sup>-3</sup> )	J <sub>SC</sub> (mA/m <sup>2</sup> )	V <sub>OC</sub> (V)	FF(%)	η(%)
GaAs				
2x10 <sup>14</sup>	14.84	2.45	87.97	31.95
1x10 <sup>15</sup>	14.85	2.48	87.97	32.49
2x10 <sup>16</sup>	14.84	2.55	86.73	32.82
4x10 <sup>16</sup>	14.80	2.60	88.37	34.03
1x10 <sup>17</sup>	14.60	2.62	90.32	34.53
4x10 <sup>17</sup>	14.09	2.63	91.10	33.73
6x10 <sup>17</sup>	13.87	2.63	91.33	33.31
9x10 <sup>17</sup>	13.52	2.63	91.71	32.61
2x10 <sup>18</sup>	12.73	2.63	92.15	30.84

Tableau V-14 : Résultats de variation de concentrations de dopage de base GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

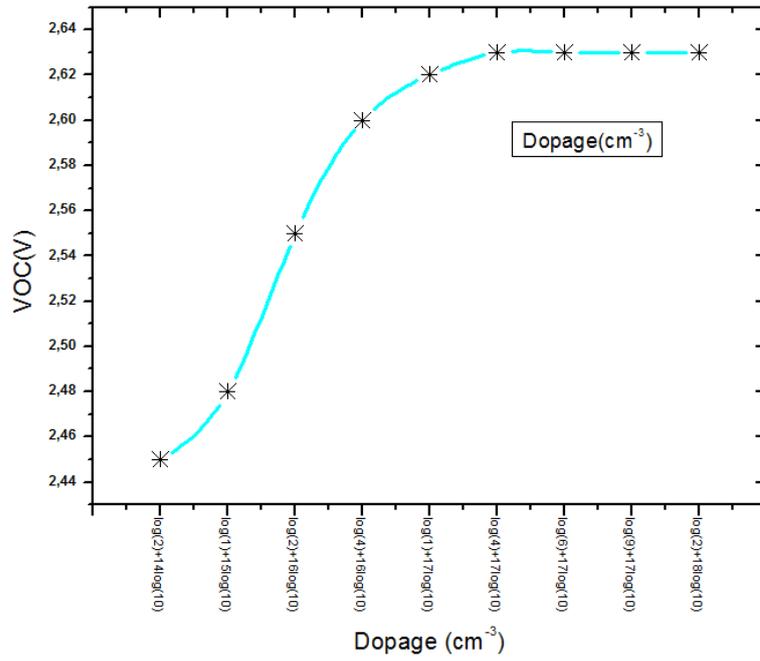


Figure V-46 : Variation du J<sub>SC</sub> en fonction du dopage la base GaAs.

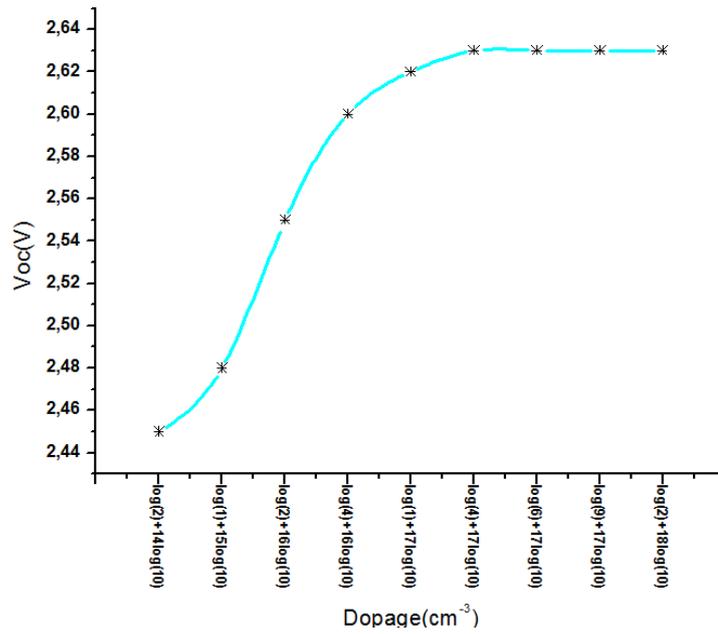


Figure V-47 : Variation du V<sub>OC</sub> en fonction du dopage la base GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

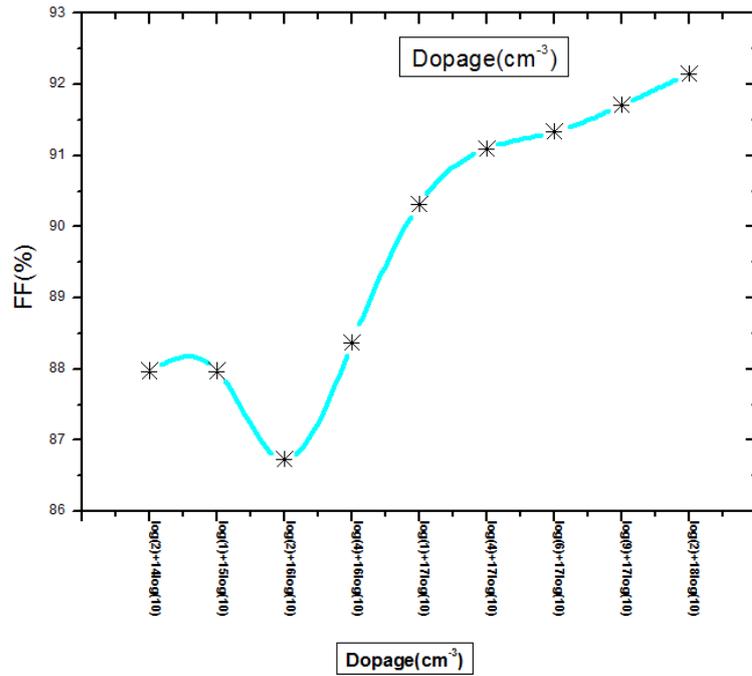


Figure V-48 : Variation du FF en fonction du dopage la base GaAs.

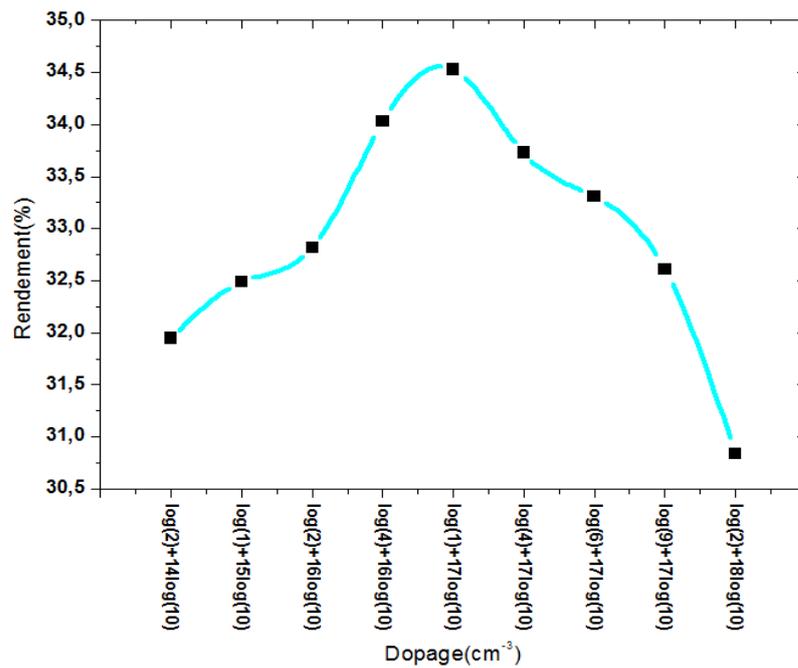


Figure V-49 : Variation du rendement en fonction du dopage la base GaAs.

La variation de dopage des bases donne un rendement maximal de 34.53% pour une concentration de dopage des bases de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  pour la base InGaP et  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pour la base GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

### 8.2. Concentration de dopage des émetteurs

✚ L'émetteur de la cellule InGaP

Finalement, nous avons varié la concentration de dopage de l'émetteur pour InGaP et le GaAs pour observer les variations du rendement et de puissance maximale quand la température augmente. Le tableau 15 montre ces différentes variations pendant que le dopage change. Nous avons pris le dopage de l'émetteur GaAs constant ( $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) et on a varié le dopage de l'émetteur InGaP.

Dopage d'émetteur ( $\text{cm}^{-3}$ )	$J_{SC} (\text{mA/m}^2)$	$V_{OC} (\text{V})$	FF(%)	$\eta$ (%)
InGaP				
$2 \times 10^{17}$	14.59	2.45	87.48	31.29
$1 \times 10^{18}$	14.59	2.48	87.00	31.41
$5 \times 10^{18}$	14.59	2.57	88.31	33.13
$7 \times 10^{18}$	14.60	2.60	89.93	34.14
$9 \times 10^{18}$	14.60	2.61	90.23	34.37
$12 \times 10^{18}$	14.60	2.62	90.33	34.49
$15 \times 10^{18}$	14.60	2.62	90.32	34.53

Tableau V-15: Résultats de variation de concentrations de dopage de l'émetteur InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

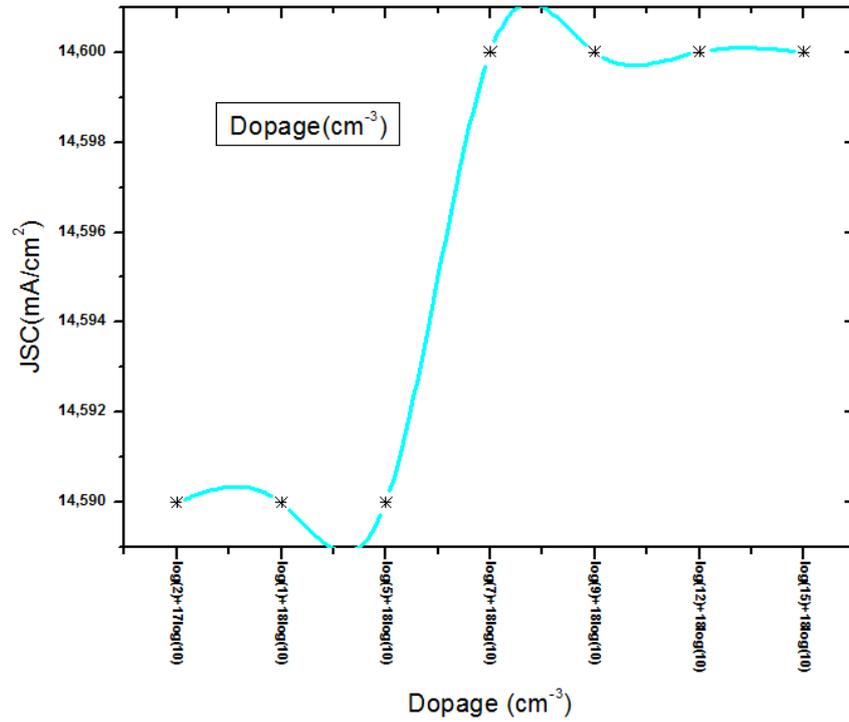


Figure V-50: Variation de  $J_{SC}$  en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP.

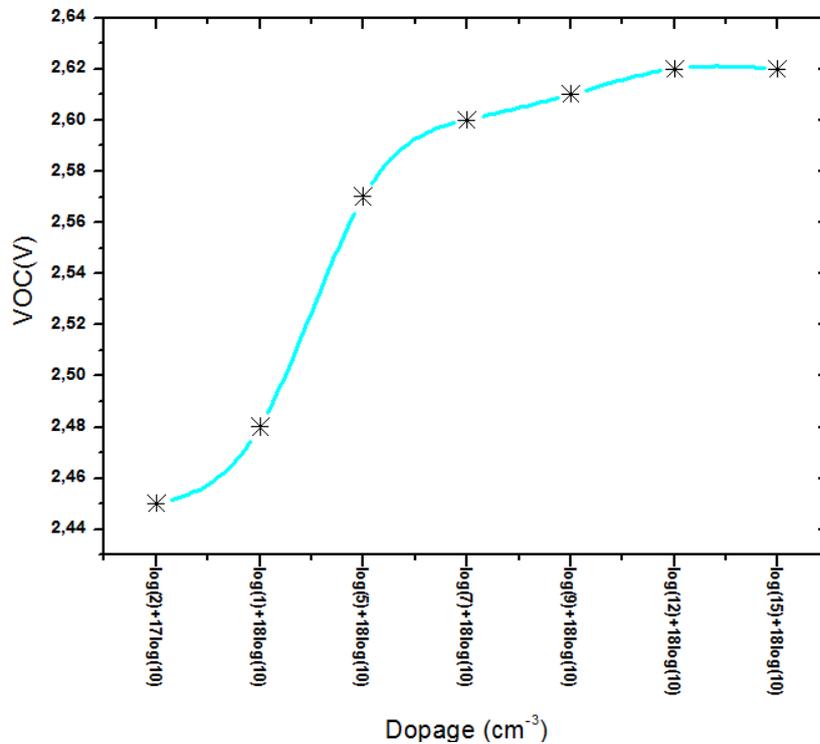


Figure V-51 : Variation de  $V_{OC}$  en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

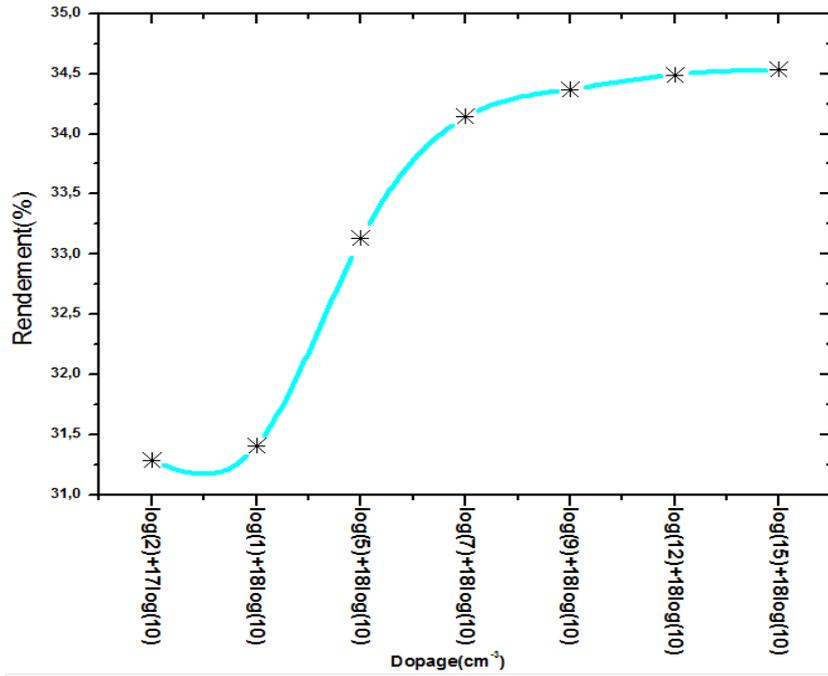


Figure V-52: Variation du rendement en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP.

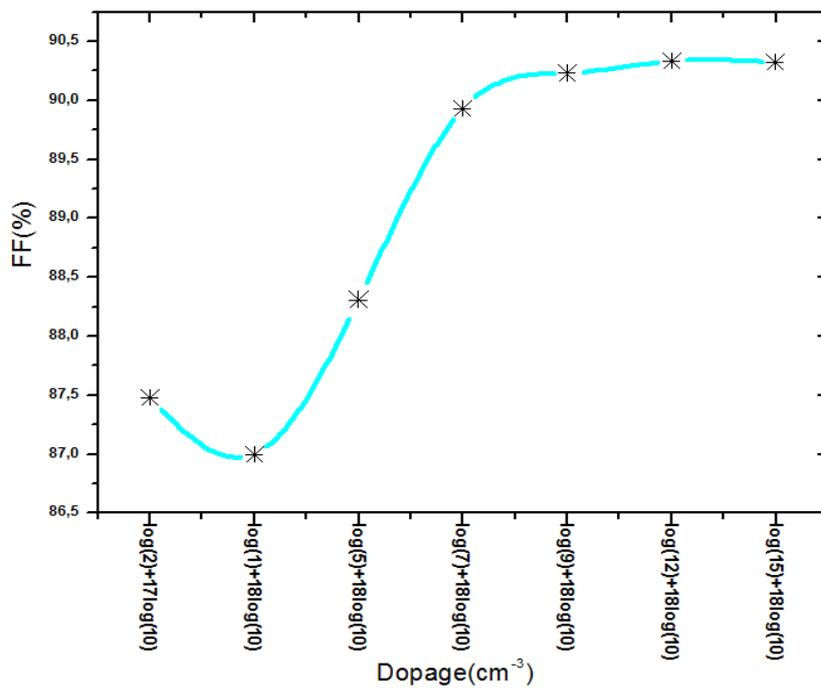


Figure V-53: Variation du FF en fonction de concentration de dopage de l'émetteur InGaP.

## Partie 2: Résultats de Simulation

✚ L'émetteur de la cellule GaAs

Dopage d'émetteur (cm <sup>-3</sup> )	J <sub>sc</sub> (mA/m <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF(%)	η(%)
GaAs				
2x10 <sup>17</sup>	14.66	2.60	90.17	34.36
4x10 <sup>17</sup>	14.64	2.61	90.22	34.47
1x10 <sup>18</sup>	14.60	2.62	90.32	34.53
2x10 <sup>18</sup>	14.54	2.63	90.44	34.50
4x10 <sup>18</sup>	14.43	2.63	90.57	34.34
6x10 <sup>18</sup>	14.32	2.63	90.70	34.16
8x10 <sup>18</sup>	14.22	2.63	90.80	33.95

Tableau V-16. Résultats de variation de concentrations de dopage de l'émetteur GaAs.

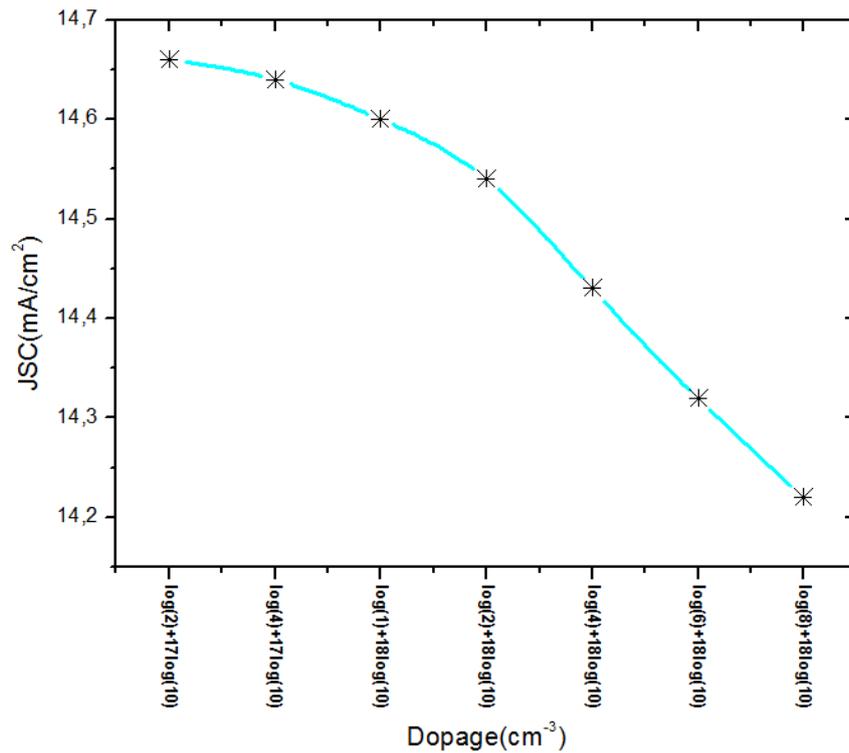


Figure V-54: Variation du J<sub>sc</sub> en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

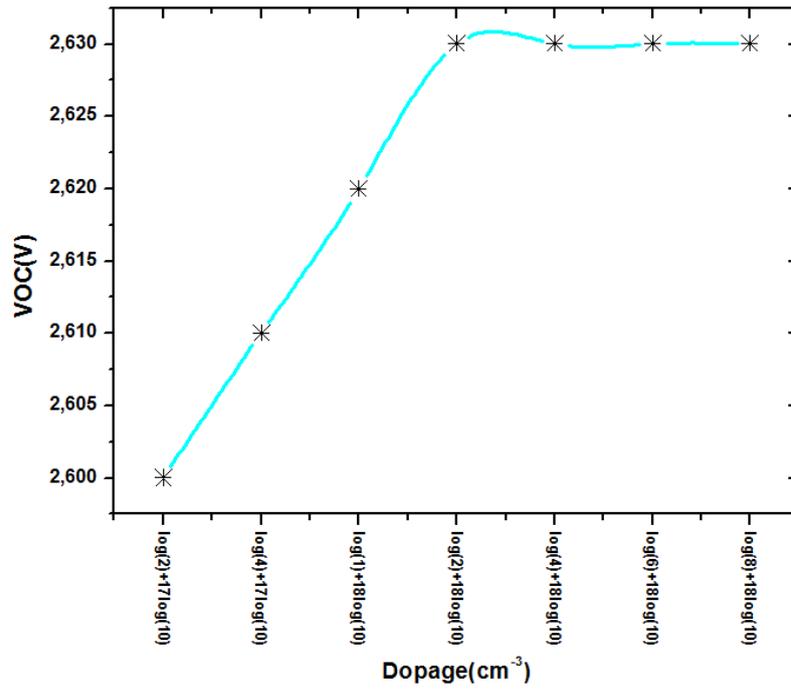


Figure V-55: Variation du  $V_{OC}$  en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs.

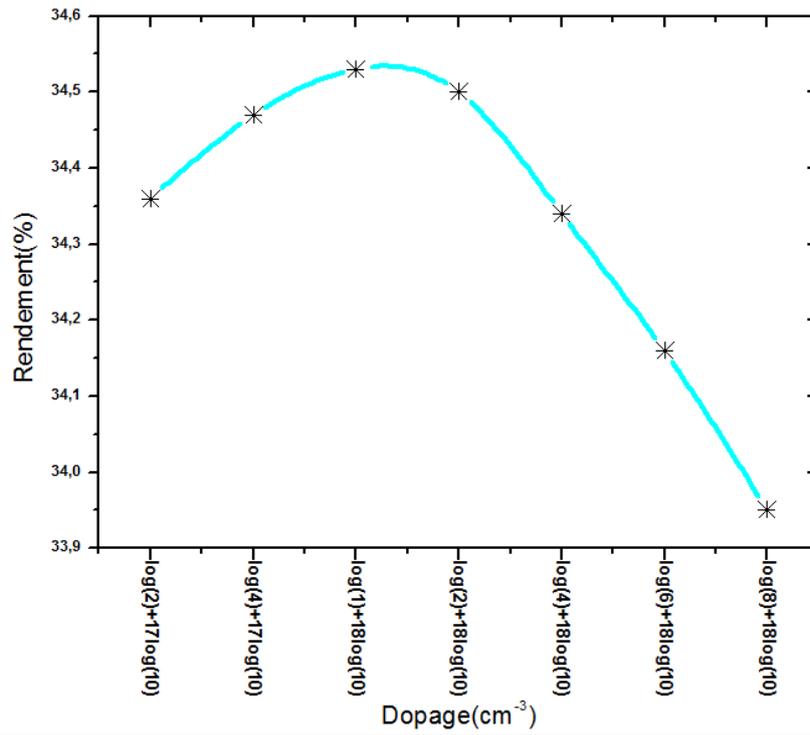


Figure V-56: Variation du  $\eta$  en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs.

## Partie 2: Résultats de Simulation

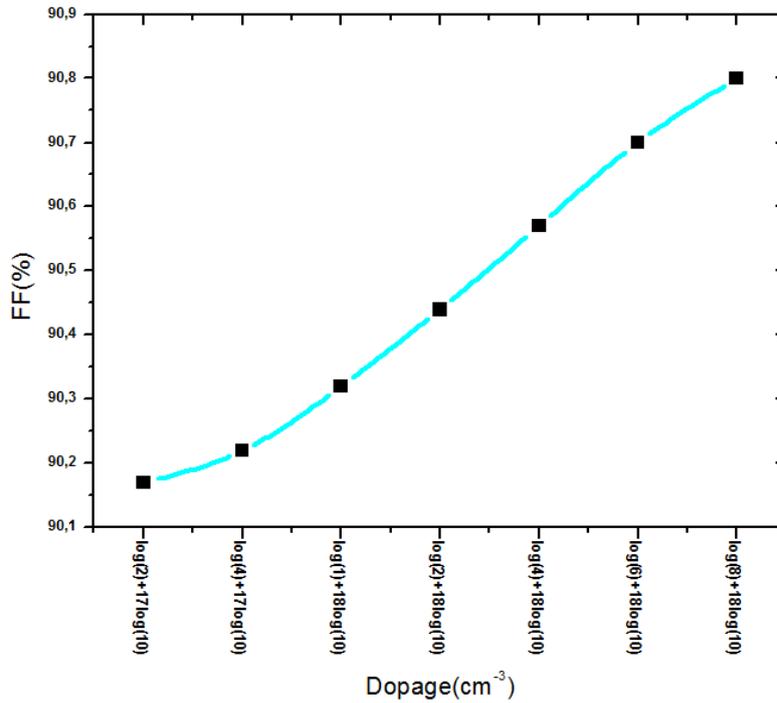


Figure V-57: Variation du FF en fonction de concentration de dopage de l'émetteur GaAs.

### 9. Effet de la température sur le rendement

Avec l'augmentation de la température de fonctionnement de la cellule solaire, on remarque une diminution en  $J_{SC}$  et  $V_{OC}$ . Le tableau suivant résume les différentes variations de  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $P_{Max}$ ,  $\eta$  et FF avec la variation de la température.

Température(K)	$J_{SC}$ (mA)	$V_{OC}$ (V)	$P_{Max}$ (W)	$\eta$ (%)	FF(%)
<b>300</b>	14.60	2.62	3.45	34.53	90.33
<b>325</b>	14.36	2.55	3.28	32.83	89.57
<b>350</b>	14.33	2.46	3.18	31.26	88.59
<b>375</b>	14.30	2.37	2.97	29.66	87.56

Tableau V-17 : Variation du rendement en fonction de la température.

## Partie 2: Résultats de Simulation

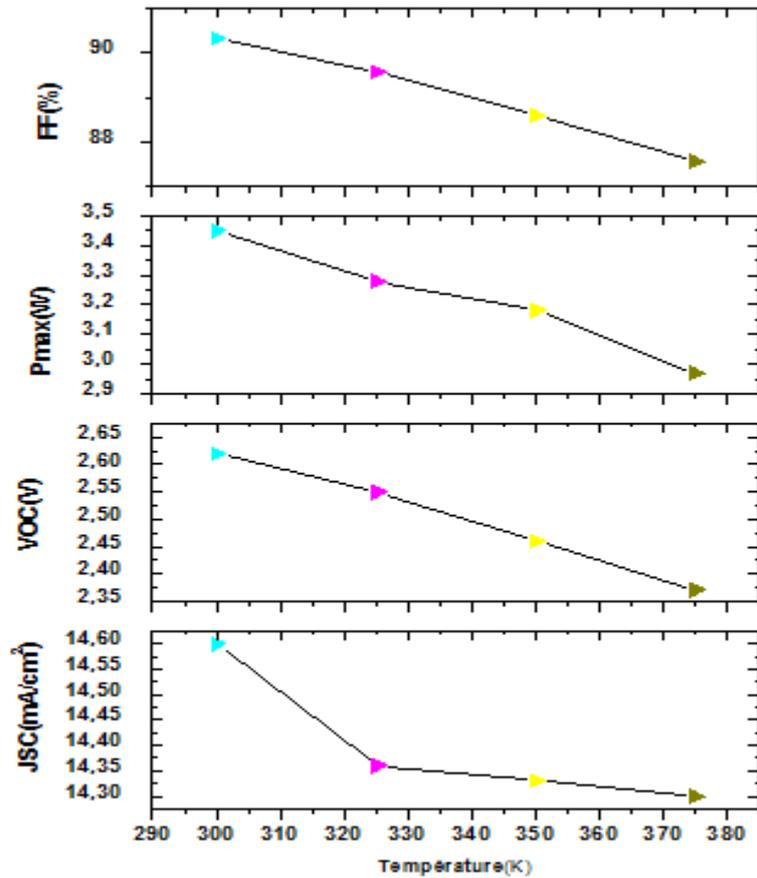


Figure V-58: Variation des paramètres de mérite en fonction de la température.

A mesure que la température augmente, le FF diminue. A cause de la diminution significative de la tension. Nous avons remarqué la diminution de FF de 1 % pour chaque augmentation de la température de 25°K.

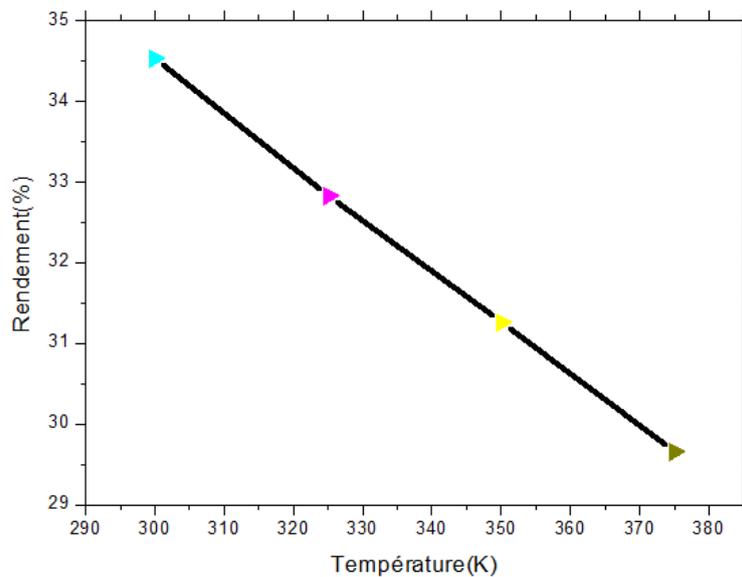


Figure V-59: Variation du rendement en fonction de la température.

## Partie 2: Résultats de Simulation

La diminution du rendement de la cellule solaire est due à l'effet de la température sur la variation des propriétés des matériaux InGaP et GaAs. L'énergie de gap dépend principalement de la température. Elle varie en fonction de la température selon la relation de Varshni [15] [58]:

$$E_g(\text{eV}) = E_{g0} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (\text{V-17})$$

Où  $T$  : est la température en Kelvin,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes caractérisant les matériaux InGaP et GaAs et  $E_{g0}$  est l'énergie de gap de matériau à une température ambiante ( $T=25^\circ$ ).

Matériaux	$E_{g0}$ (eV)	$a \times 10^{-4}(\text{eV} / \text{K}^2)$	$\beta(^\circ\text{K})$
In <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> P	1.9614	5.40	204
GaAs	1.5204	5.40	204

Tableau V-18: Énergie de gap des matériaux In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>P et GaAs.

✚ L'énergie de gap de GaAs est variée selon la relation suivante :

$$E_g(\text{eV}) = 1.5204 - \frac{5.4 \times 10^{-4} T^2}{(T+204)} \quad (\text{V-18})$$

✚ L'énergie de gap d'InGaP est variée selon la relation suivante :

$$E_g(\text{eV}) = 1.9614 - \frac{5.4 \times 10^{-4} T^2}{(T+204)} \quad (\text{V-19})$$

Le tableau suivant montre la variation de l'énergie de gap des matériaux semi conducteurs et le rendement de chaque cellule isolé InGaP et GaAs en variant la température de 300K à 375K.

Température(°K)	Energie de gap (eV)				$\eta(\%)$			
	300	325	350	375	300	325	350	375
La cellule								
InGaP	1.865	1.870	1.874	1.877	20.87	21.23	20.07	19.78
GaAs	1.424	1.429	1.436	1.440	25.27	22.74	21.97	19.71

Tableau V-19: Variation de l'énergie de gap en utilisant la loi de Varshni.

## Partie 2: Résultats de Simulation

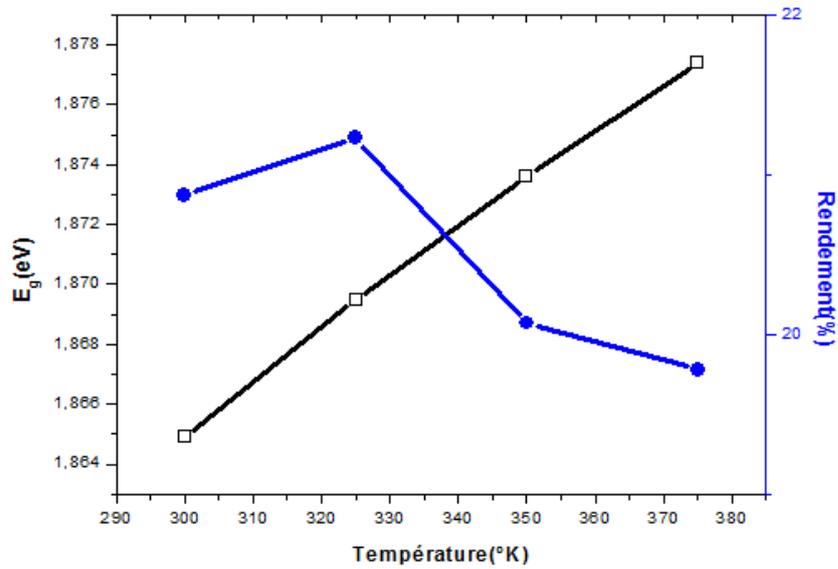


Figure V-60: Variation du rendement et l'énergie de gap de la cellule InGaP.

Le rendement de la cellule InGaP (Bottom) varie avec l'énergie de gap d'InGaP. Il atteint une valeur maximale de 21.23% pour une énergie de valeur  $E_g=1.87\text{eV}$ .

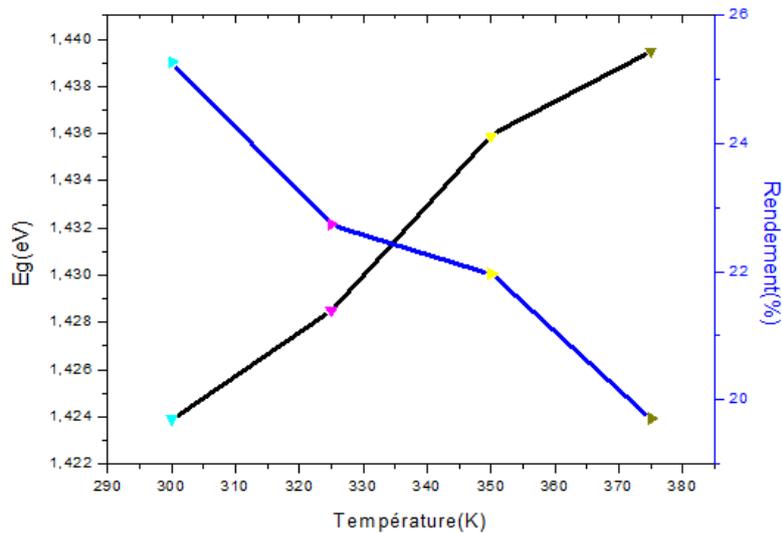


Figure V-61: Variation du rendement et l'énergie de gap de la cellule GaAs.

Pour les deux cellules (top) InGaP et (bottom) GaAs, on remarque que l'énergie de gap augmente linéairement avec l'augmentation de la température ce qui influe sur le rendement de la cellule ceci est due à la diminution de l'absorption des rayons lumineux. La figure 62 montre la variation de l'énergie de gap et le rendement en variant la température.

## Partie 2: Résultats de Simulation

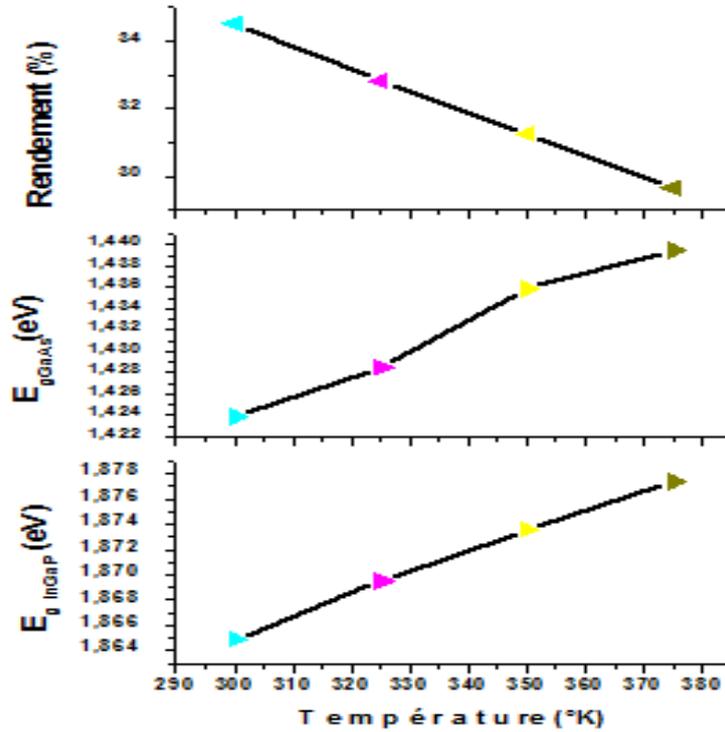


Figure V- 62 : Variation d'énergie de gap et le rendement de la cellule InGaP/GaAs.

Nous avons simulé la cellule solaire à hétérojonction à 300, à 325, à 350, et à 375 K. Les résultats du tableau montrent que le rendement diminue de 2% pour chaque augmentation de la température de 25°K. La courbe du rendement et  $P_{Max}$  en fonction de la température est représentée dans la figure 63.

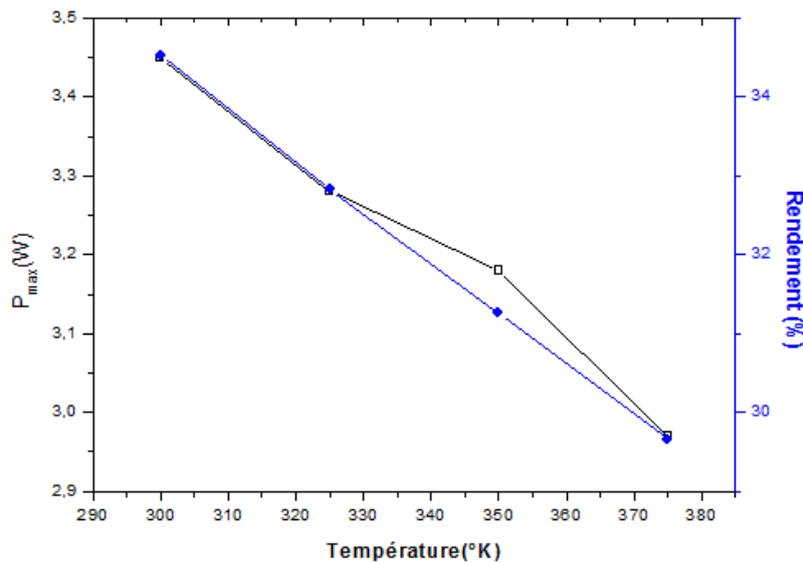


Figure V-63 : Variation du rendement et la puissance maximale en fonction de la température.

## Partie 2: Résultats de Simulation

---

La diminution du rendement de la cellule solaire et de la puissance maximum respectivement est due principalement à la diminution de la tension à circuit ouvert.

Le calcul de la variation de la puissance maximum en fonction de la température est conforme à l'expression suivante [59].

$$\frac{dP_{mp}}{dT} = V_{mp} \cdot \frac{dI_{mp}}{dT} + I_{mp} \cdot \frac{dV_{mp}}{dT} \quad (V-20)$$

Où

$P_{mp}$  : Puissance maximale.

$I_{mp}$  : Courant maximal.

et  $V_{mp}$  : Tension maximale.

### 10. Circuit équivalent de la cellule simulé InGaP/GaAs

La cellule solaire à hétérojonction est composé de deux (multi jonction) diodes (jonction p-n) connectées entre eux par des jonctions p-n dans le sens inverse (jonction tunnel) [60]. Chaque jonction possède une énergie de gap inférieur de la jonction supérieur. Pour une cellule de jonction p-n (épitaxie d'un matériau de type n sur un matériau de type p, la jonction tunnel est fait de matériau de type p sur un matériau de type n. Le dopage excessif de la jonction tunnel permet le déplacement des porteurs libres de la région p vers la région P+ et de la région n+ vers la région n. Il faut ajouter des électrodes à chaque jonction tunnel. L'anode est en or. Il est met en haut de la cellule (à une surface qui ne dépasse pas de 8%). Alors que la cathode couvert la surface inférieur de la cellule [5].

La figure 64 montre le circuit équivalent d'une cellule solaire à double jonctions (InGaP/GaAs) avec une jonction tunnel.

## Partie 2: Résultats de Simulation

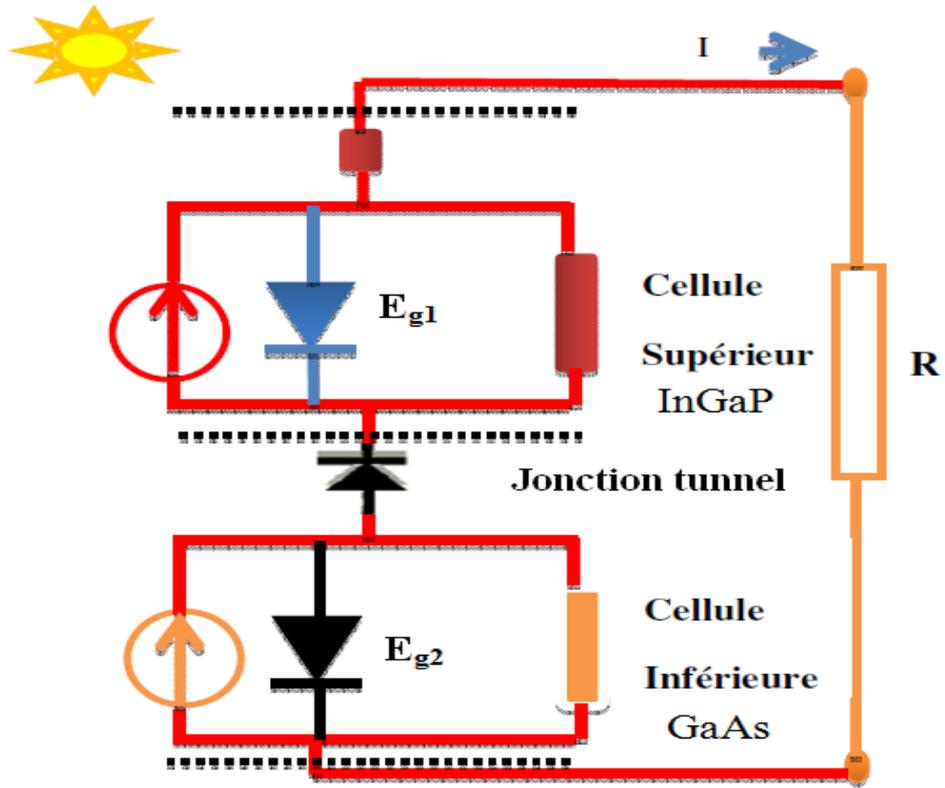


Figure V-64: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à hétérojonction (InGaP/GaAs).

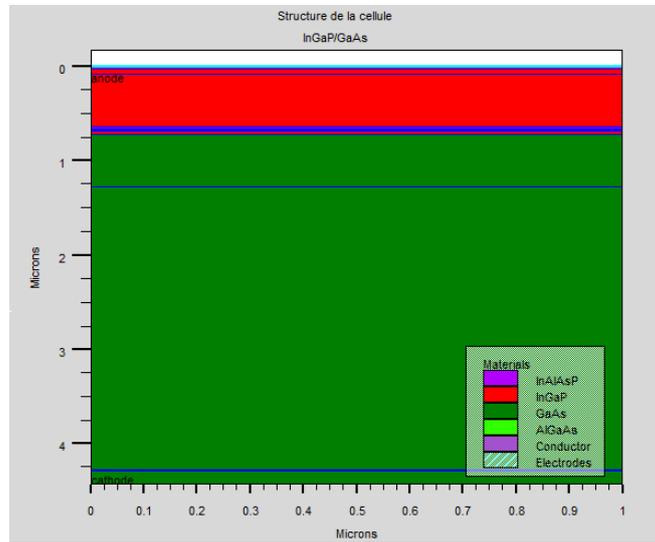


Figure V-65 : Structure de la cellule InGaP/GaAs sous TcadSilvaco.

## Partie 2: Résultats de Simulation

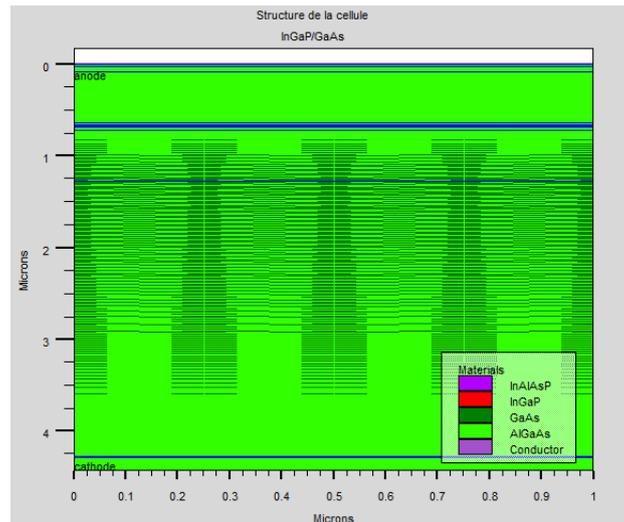


Figure V-66: Maillage de la cellule InGaP/GaAs.

Les figures ci-dessus présentent une partie de la cellule optimisée. Elle est constituée d'un émetteur de la cellule (top) en InGaP d'une épaisseur de 55 nm et un émetteur de la cellule (bottom) en GaAs d'une épaisseur de 550nm, des bases des cellules supérieure (en InGaP) et inférieure (en GaAs) d'épaisseurs 550nm et 3 $\mu$ m respectivement, deux BSFs (InAlAsP et AlGaAs) des épaisseurs 30nm et 10 nm respectivement. Pour obtenir des résultats meilleurs, le maillage de la cellule est raffiné au niveau des contacts.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'optimiser le rendement de la cellule solaire de type InGaP/GaAs. Nous avons varié les paramètres un par un en fixant les autres et puis nous avons fait varier la température afin de déterminer la température qui correspond à un rendement optimal.

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

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

## Partie 2: Résultats de Simulation

---

- + L'effet de la concentration de dopage de l'émetteur ;
- + L'effet de l'épaisseur de l'émetteur ;
- + Et l'effet de l'épaisseur de la base ;
- + L'effet de la température ;

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

---

Dans cette thèse, nous avons pu extraire les paramètres internes et externes qui affectent la performance de la cellule solaire inorganique à double jonction à base des matériaux InGaP/GaAs. Les paramètres internes sont : la fraction molaire, le dopage des bases et des émetteurs, le type et l'épaisseur de la jonction tunnel, l'épaisseur de la couche BSF et l'épaisseur de l'émetteur et la base. Les paramètres externes est la température.

La modélisation et la simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs sont faites en utilisant le logiciel Tcad silvaco pour extraire les caractéristiques de base de la cellule solaire: le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement électrique ( $\eta$ ).

La simulation et la modélisation de la cellule solaire ont été prises (développées) à partir des données de certains auteurs en variant les valeurs des paramètres qui sont importantes dans l'amélioration du rendement de la cellule. Le rendement électrique optimal obtenu est de 34.53% avec un facteur de forme de 89.57%.

Au début, nous avons présentés les matériaux semi-conducteurs, leurs propriétés et la possibilité de faire un alliage entre les matériaux (III-V) de tableau Mendeleïev Tels qu'Indium (In), Gallium (Ga), Alliminium (Al)...etc.

Après, nous sommes intéressés sur l'importance du choix des modèles physiques utilisés par le logiciel Tcad silvaco pour simuler la cellule solaire à hétérojonction III-V.

Dans une troisième étape, nous avons étudié la progression de la filière technologique, les différentes générations de la cellule solaire (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>) afin de procéder au choix de la cellule envisagée, parmi les différentes générations.

Dans une quatrième étape, nous avons étudié les différents constituants de base de la cellule tels que les contacts, la couche antireflet, la texturation et le BSF (Back Surface Field) et le principe de rayonnement solaire pour une bonne modélisation de la cellule.

Puis, nous nous sommes basés sur le critère de choix des matériaux constituant la cellule solaire et le principe de l'alliage en vérifiant la validité de la loi de Végard. Après une modélisation précise, nous avons présenté les résultats de simulation de la cellule solaire InGaP/GaAs.

Dans une dernière étape, nous avons simulé la cellule solaire à hétérojonction InGaP/GaAs avec des caractéristiques qui donnent un rendement optimal 34.53% dont l'épaisseur ne dépasse pas les quelques nanomètres 4.431  $\mu\text{m}$ .

Les différentes étapes de résultats de simulation effectuées dans le but:

✚ D'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des différents paramètres qui sont couteux et bénéficier d'un gain du temps.

## Conclusion Générale

---

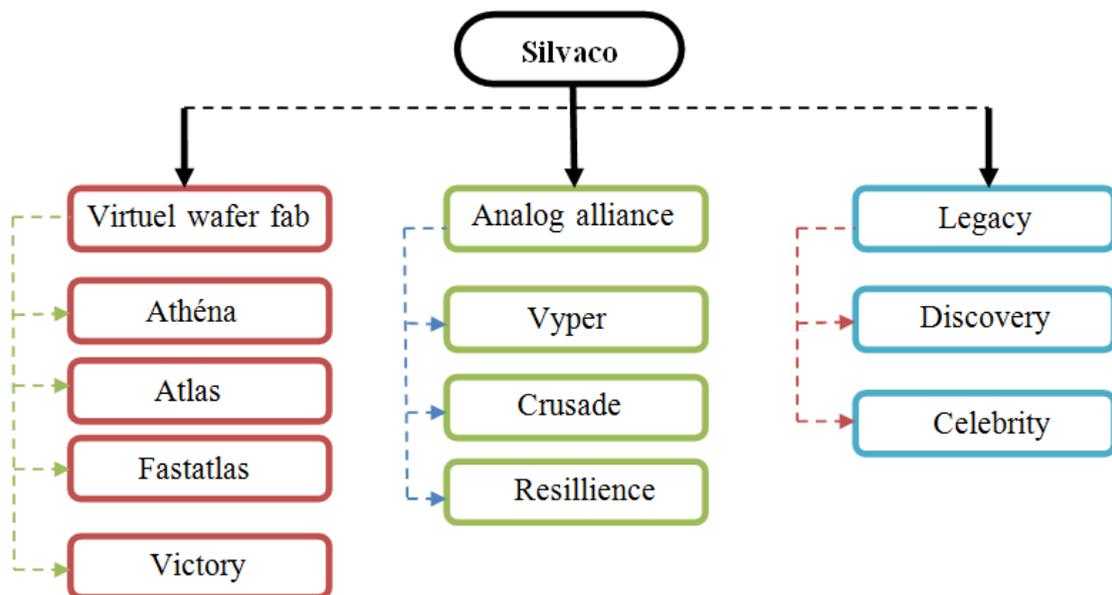
- ✚ Nous avons prouvé que l'introduction de la jonction tunnel et de champs de la surface arrière (BSF) améliorent le rendement de la cellule.
- ✚ L'alliage des matériaux inorganique III-V (InGaP, InAlAsP, AlGaAs, GaAs) permet de récupérer une partie très importante des photons et donc d'absorber la quasi-totalité du spectre solaire.
- ✚ L'épaisseur des couches ainsi que le choix des matériaux jouent un rôle important dans l'amélioration du rendement des cellules solaires.

N'importe quelle recherche scientifique n'est achevée et nous pensons à améliorer ce travail de recherche en s'intéressant sur le même type de cellules inorganiques (cellules tandem) mais en introduisant d'autres matériaux II-V et d'autres jonctions (triples).

## Annexe

Tcad silvaco est un outil de simulation à deux et trois dimensions des dispositifs basés sur la physique des semi-conducteurs (les diodes, les transistors et les cellules solaires...etc). Il permet d'optimiser et simuler leurs performances. Tcad silvaco inclue une bibliothèque des matériaux prédéfinis et il permet aux utilisateurs de définir des matériaux selon le choix et le besoin. Tcad silvaco donne des résultats proches de ceux de l'expérimentation.

Tcad silvaco est constitué d'un ensemble des outils de programmation permettant de prédire la structure, le maillage et la caractéristique courant-tension.



Atlas: il est conçu pour la simulation électrique des composants électroniques.

Fastatlas : il permet la simulation rapide des dispositifs tels que les mosFets, les diodes....etc.

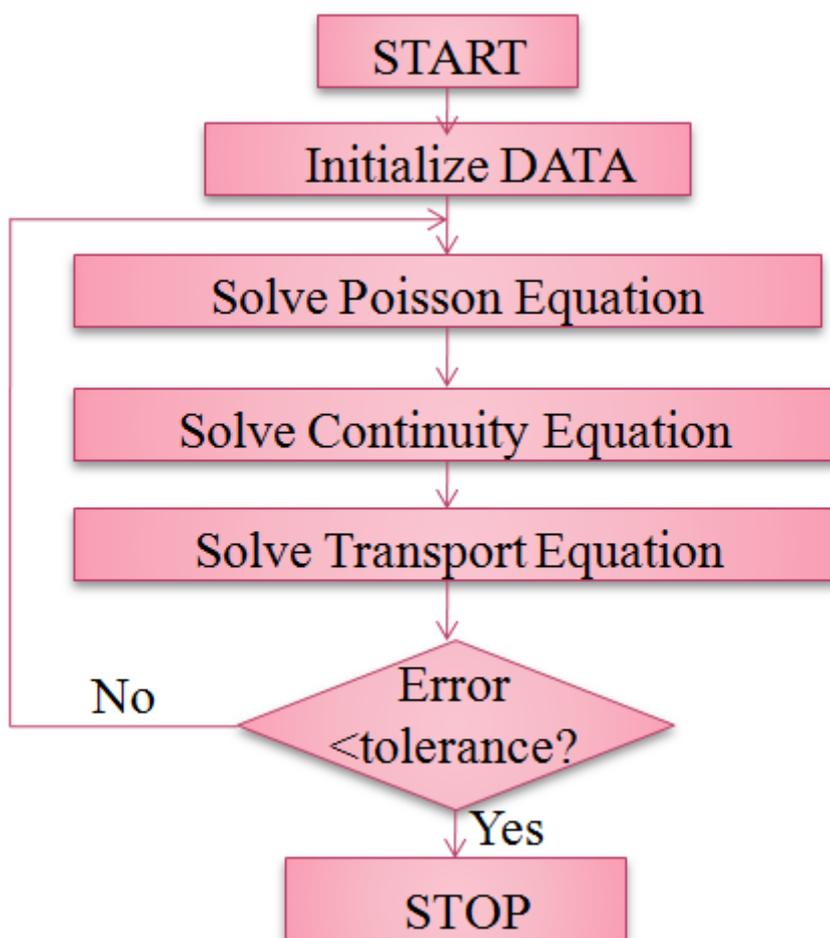
Athéna : il permet l'implantation, le dopage, l'oxydation de la structure proposée.

Victory : un simulateur qui relie entre la partie fabrication et la partie simulation d'un dispositif simulé.

Analog Alliance : il permet la simulation analogique numérique.

Legacy : fait les modèles des circuits intégrés.

Nous nous sommes intéressés à l'utilisation du simulateur Atlas pour extraire les caractéristiques électriques de la structure. La simulation se fait selon l'organigramme suivant :



# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1] Jamie E. VanDyke, «Modeling Laser Effects on Multi-Junction Solar Cells Using Silvaco Atlas Software for Spacecraft Power Beaming Applications», mémoire de master, Juin 2010.
- [2] B. Garcia Jr., «Indium Gallium Nitride Multijunction Solar Cell Simulation Using Silvaco Atlas», mémoire de master, Juin 2007.
- [3] M. Belarbi, « Étude à deux dimensions et optimisation des paramètres physiques et géométriques de cellules solaires de divers contacts interdigités. », thèse de doctorat, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem, 2016.
- [4] Periodic table of elements, 21 March 2007, <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/student-science-tech/>
- [5] B. Sullivan, «The Effect of Temperature on the Optimization of Photovoltaic Cells Using Silvaco Atlas Modeling», thèse de master, Septembre 2010.
- [6] A. Bali, «Etude Comparative entre les Cellules Solaires de Type P+-AlGaAs/ P-GaAs/N-GaAs Et Une Autre De Type N+-AlGaAs/N-GaAs/P-GaAs», Mémoire de magister, 2013.
- [7] Silicon atomic structure, 13 March 2007, [http://www.micromountain.com/sci\\_diagrams/at\\_struct/at\\_struct\\_pages/silicon\\_lab\\_none.htm](http://www.micromountain.com/sci_diagrams/at_struct/at_struct_pages/silicon_lab_none.htm)
- [8] I. Mallem, «Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO», mémoire de magister, 2014.
- [9] T. Prutski, P. Diaz-Arencibia, R. A. Brito-Orta, A. Mintairov, T. Kosel, and J. Merz, «Luminescence anisotropy of InGaP layers grown by liquid phase epitaxy», J. Appl. Phys. 37, pp. 1563-1568, Mai 2004.
- [10] R. F. Pierret, «Semiconductor Device Fundamentals», Addison-Wesley Publishing, Reading, Massachusetts, 199
- [11] K. Djriouat, « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs », mémoire de magistère.
- [12] Y. Marouf, « Modélisation des cellules solaires en InGaN En utilisant Atlas Silvaco », mémoire de magister, Juin 2013.
- [13] S.M. Sze, and Kwok K. Ng, «Physics of semiconductor devices», J. Wiley and Sons, 2007
- [14] Jeffrey B. Lavery, «Quantum Tunneling Model of aP-N Junction in Silvaco», United States Navy B.S./ B.A., University of San Diego, 2003
- [15] ATLAS User's Manual: Device Simulation Software. Santa Clara, CA: SILVACO International, 2012.
- [16] J.D. Jackson, «Classical Electrodynamics», second ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 269–284. 1975

## Bibliographie

---

- [17] D. DIOUF, «Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdiguée en face arrière», thèse de doctorat, 2010, université paris sud 11
- [18] S. Selberher, «Analysis and simulation of semi conductor devices», Wien, New York: Springer-Verlag, 1984. (s.d.)
- [19] Almosni S. Growth, «structural and electro-optical properties of GaP/Si and GaAsPN/GaP single junctions for lattice matched tandem solar cells on silicon». PhD thesis. European University of Brittany; 2015.
- [20] Nelson, J., 2003. «The Physic of Solar Cells”. Imperial College Press, London, pp. 81–117.
- [21] M.R. Pinto, ConorS.Rafferty and Robert W.Dutton, «PSCES2-Poisson and continuity equation solver», Stanford Electronics Laboratory Technical Report, Stanford University (1984).
- [22] A. Mekemeche, «Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes, thèse de doctorat, université de Abd Hamid Ibn badis, Mostaganem, 2017.
- [23] F.Boudjerad, « Amélioration du rendement énergétique de cellules photovoltaïques en couches minces à base de CZTS », Mémoire de master, 2013.
- [24] Schutz-Kuchly, « Investigation du silicium de qualité solaire de type n pour la fabrication de cellules photovoltaïques Thomas », thèse de doctorat, 2013.
- [25] M. Mohammedi, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigués sous environnement Silvaco », mémoire de magister, 2012
- [26] B. Van Zeghbroeck, « Principles of Electronic Devices”, Book. 2011.
- [27] M. MERAD BOUDIA, « Modélisation electro-optique et optimisation des cellules solaires organiques », thèse de doctorat, 2016
- [28] Sylvain De Vecchi, «Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigués en face arrière », thèse de doctorat, Ecole Doctorale E.E.A de Lyon, 2013.
- [29] J,M.Olson, D.J. Friedman and S. Kurtz, «High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells», Handbook of photovoltaics Science and Engineering. John Wiley and Sons, 2003.
- [30] F.Nemmar, « Etude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques a base de matériaux organiques », thèse de doctorat, 2013

## Bibliographie

---

- [31] J Zhao, et al. «Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials». Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 82, numéro 1 et 2, pages 53-64, 2004.
- [32] Z Wang, et al. «Advanced PERC and PERL production cells with 20.3% record efficiency for standard commercial p-type silicon wafers». Progress in Photovoltaics Research and Applications, Volume 20, numéro 3, pages 260-268, 2012
- [33] T Mishima. et al. «Development status of high-efficiency HIT solar cells Solar Energy Materials and Solar Cells». Volume 95, numéro 1 , pages 18-21, 2011
- [34] Silvia Martin de Nicolas, «a-Si : H/c-Si heterojunctionsolarcells : back side assessment and improvement», laboratoire de génie électrique de paris, thèse de doctorat, 2012
- [35] M Lu. et al. «Optimization of interdigitated back contact silicon heterojunction solar cells by two-dimensional numerical simulation», Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, USA, pages 1475-1480, 2009
- [36] K. Maki. et al. «High-efficiency HIT solar cells with a very thin structure enabling a high Voc». Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, USA, pages 57-61, 2011
- [37] [https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/photovoltaics-report\\_fraunhofer\\_2016.pdf](https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/photovoltaics-report_fraunhofer_2016.pdf). [Photovoltaics Reports, Fraunhofer ISE, novembre 2016.](#)
- [38] F.Bouraba, «Etude D'une LED a base d'un InGaN pour l'émission de la lumière blanche », mémoire de magister, 2012
- [39] H.Bencherif, « Etude et modélisation analytique d'une cellule solaire à base de Si-Ge », mémoire de magister, 2015
- [40] S. Mostefa Kara, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de CIS et CIGS », mémoire de magister, Juin.
- [41] B.Lakehal, « Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky », mémoire de magister, 2009.
- [42] A. Ricaud, « Photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés », Presses polytechniques et universitaires romandes (1997).
- [43] A. Mahfoud, « Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement », thèse de doctorat, université de Sétif 1, 2015.
- [44] Khelifi et A. Belghachi, « Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d'une Cellule Solaire GaAs », Rev. Energ. Ren. Vol.7 (2004)13-21

## Bibliographie

---

- [45] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/antiref.html#c2>
- [46] S. Quoizola, « Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût », thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007
- [47] Jha, A. R., « Solar Cell Technology and Application », Taylor & Francis Web site <http://www.taylorandfrancis.com>, 2010, ISBN 978-1-4200-8177-0
- [48] A. Abaidia et A. Dahmane, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) », mémoire de master, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
- [49] T. Markvart and L. Castafier, « Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications », 2003, ISBN 1856173909.
- [50] M. Green, « Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Application », Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1-12, 1982
- [51] G. Writing, « Global Energy Assessment, Toward a Sustainable Future », 2012, Cambridge University Press. ISBN 9780521182935
- [52] <http://www.lechodusolaire.fr/rendement-de-conversion-cellules-solaires-gaas-atteint-316/> le 13-01-2018.
- [53] F. Djaafar, B. Hadri, G. Bachir, « The Effect of a Back Surface Field (BSF) on the Efficiency of Dual Junction InGaP/GaAs Cell », Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Electrical Systems, Tunisia, 2017.
- [54] M. Babar, E. A. Al-Ammar & N. H. Malik, « Numerical simulation model of multijunction solar cell », Journal of Energy Technologies and Policy (2012), 2(7), 44-53.
- [55] L. Esaki, « New phenomenon in narrow Germanium p-n junction », Phys. Rev, Vol. 109, pp. 603-604, 1958.
- [56] F. Djaafar, B. Hadri et B. Ghalem, « Comparison between the Efficiency of Heterojunction Thin Film InGaP/GaAs/Ge and InGaP/GaAs Solar Cell », International Science Index, Energy and Power Engineering Vol: 11, No: 3, 2017, waset.org/Publication/10006842, Singapore.
- [57] H. Ziani, « Propriétés structurales et optoélectroniques du  $ZnS_{1-x}O_x$  Dilué : Etude Théorique Par DFT », mémoire de master,
- [58] 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.

## Bibliographie

---

- [59] S. Quoizola, «épitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût», thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007
- [60] F.Djaafar, B.Hadri et G. Bachir, «InGaP\InGaP tunnel junction role in increasing dual junction InGaP/GaAs cell performance», 8th International Conference on [Modeling, Identification and Control \(ICMIC\), 2016](#), Publisher: IEEE, DOI: [10.1109/ICMIC.2016.7804156](https://doi.org/10.1109/ICMIC.2016.7804156)

## Productions Scientifiques

### ❖ Publications Internationales

- ✚ B. Hadri, **F. Djaafar**, "Parametric Requirements for Optimum Performance of InGaP/GaAs Heterojunction Solar Cell", Advanced Materials Research, Vol. 1105, pp. 131-135, 2015
- ✚ **F.Djaafar**, B.Hadri, G.Bachir, "[Optimal parameters for performant heterojunction InGaP/GaAs solar cell](#)", international journal of hydrogen energy 42 (2017) 8644 e8649.
- ✚ **F.Djaafar**, B. Hadri, G. Bachir, "Comparison between the Efficiency of Heterojunction Thin Film InGaP/GaAs/Ge and InGaP/GaAs Solar Cell", World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:11, No:3, 2017
- ✚ **F.Djaafar**, B. Hadri, G. Bachir, "I-V Characteristics of InGaP/GaAs Solar Cell with the presence of a Back Surface Field and a Tunnel junction", J. Electrical Systems 14-2 (2018): 64-76
- ✚ **F. Djaafar**, B. Hadri, G.Bachir, "Optimization and Comparison between the Efficiency of InGaP and GaAs Single Solar Cells with and without a Window Layer", International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering 7(4), July - August 2018, 61- 66. ISSN 2278-3091.

### ❖ Communications Internationales

- ✚ **F. Djaafar**, G.Bachir, B.Hadri "InGaP/InGaP tunnel junction role in increasing dual junction InGaP/GaAs cell performance", DOI:10.1109/ICMIC.2016.7804156, 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). **Publisher:** IEEE, Alger.
- ✚ **F.Djaafar**, B. Hadri, G.Bachir, "Comparison between the Efficiency of Heterojunction Thin Film InGaP/GaAs/Ge and InGaP/GaAs Solar Cell", 19th International Conference on Energy Efficiency and Renewable Energy, Singapore, 2017. <https://waset.org/conference/2017/03/singapore/ICEERET>
- ✚ **F.Djaafar**, B. Hadri, G. Bachir, "[The Effect of a Back Surface Field \(BSF\) on the Efficiency of a Dual Junction InGaP/GaAs Cell](#)", International Conference on Recent Advances in Electrical Systems, Tunisia, December 2017.
- ✚ F. Djaafar, B. Hadri, G.Bachir, "Optimization and Comparison between the Efficiency of InGaP and GaAs Single Solar Cells with and without a Window Layer", 6th International Conference on Advances in Computer Science and Engineering (ICACSE2018), Malaysia. <http://www.warse.org/IJATCSE/static/pdf/file/ijatcse01742018.pdf>