الجمهـــــــورية الجزائـــريـــــــــة الديمقراطيـــــــــــة الشعبيـــــــــة
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليـــــــم العـــــالي و البـــــــحث العـــــــــــــلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعـــــة فرحـــــات عبـــــاس سطيـــــــف-1
UNIVERSITE FERHAT ABBAS de SETIF-1

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE

En vue de l'obtention du Diplôme de MAGISTER

Option : Instrumentation

Présenté par : **LASLADJ MERIEM**

Thème:

Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiales

Soutenu le: …/ … /2014, devant la commission d'examen:

Mr. A. FERHAT HAMIDA	Président	Prof.	Université F. A de Sétif-1
Mr. A. MESSOUS	Rapporteur	M.C.C.A	Université F. A de Sétif-1
Mr. A. BOULOUFA	Examinateur	Prof.	Université F. A de Sétif-1
Mr. A. BARTIL	Examinateur	M. C.C.A	Université F. A de Sétif-1

Année universitaire : 2014/2015.

Je dédie ce modeste travail à mes parents, mon frère, mes sœurs, la mémoire de ma sœur, mon âme Safo, et A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier naturellement en premier lieu ALLAH Le Tout Puissant qui m'a donné la force, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur ***A. MESSOUSS****, pour ses encouragements, de son expérience dans l'orientation et la direction de ce travail.*

Monsieur le professeur ***A. FERHAT HAMIDA****, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, je lui exprime mon respect et mes sincères remerciements.*

J'exprime de même mes remerciements les plus sincères aux honorables membres de jury: Monsieur ***A. BOULOUFA****, monsieur* ***A. BARTIL****, d'avoir accepté d'être examinateurs.*

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1. Spectre d'émission solaire……4

Figure I.2. Structure de bande des trois catégories de matériaux……..6

Figure I.3. Création d'une paire électron-trou dans un semiconducteur…….....7

Figure I.4. Représentation d'une jonction PN……...8

Figure I.5. Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque sous éclairement…….9

Figure I.6. Schéma électrique réel de la cellule solaire……...10

FigureI.7. (a) Caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque sous éclairement et dans l'obscurité. (b) Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V)……..11

Figure I.8. Composition d'une cellule photovoltaïque……13

Figure I.9. a)Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée;
b) Plaque de silicium après texturation…….....13

Figure I.10. Caractéristiques de groupement série des cellules…….....15

Figure I.11. Caractéristiques de groupement parallèle des cellules…….....16

Figure I.12. Caractéristiques *I-V* pour l'association mixte……..16

Figure I.13. Influence de la résistance série…….....17

Figure I.14. Influence de la résistance parallèle R_{sh}……...18

Figure I.15. Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V)…….....18

Figure I.16. Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)……19

CHAPITRE II

Figure II.1. Maille élémentaire de la structure zinc blende……...22

Figure II.2. Vue de dessus de la structure zinc blende…….22

Figure II.3. Structure des bandes de Ge, Si (gap indirect) et GaAs (gap direct)……..23

Figure II.4. Transitions inter-bandes d'électrons dans un semiconducteur. a) gap direct ; b) à un gap indirect…….....25

Figure II.5. a) Recombinaison SRH ; b) Recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron (1) ou à un trou (2) ; c) Recombinaison radiative……..26

Figure II.6. Différents défauts (ponctuels et étendus) présents dans un réseau cristallin.....31

Figure II.7. La configuration stable et métastable de L'antisite d'Arsenic As_{Ga}……..33

Figure II.8. (a) Structure du V_{Ga} à l'état (-3) ; (b) de (As_{Ga} + V_{As}) à l'état (+3) ; (c) les énergies de formation…….....35
Figure II.9. (a) Structure du V_{As} à l'état (-3) ; (b) de (Ga_{As} + V_{Ga}) à l'état (+3) ; (c) les énergies de formation…….....36
Figure II.10. Structure du Ga_i. (a) entouré de 4 atomes d'As ; (b) entouré de 4 atomes de Ga……37
Figure II.11. Structure du As_i . (a) entouré de 4 atomes de As ; (b) entouré de 4 atomes de Ga…….....37
Figure II.12. (a) Structure du (V_{Ga}+ As_{Ga}); (b) de ($2As_{Ga}$ + V_{As}) ; (c) les énergies de formation…….....38
Figure II.13. Energie de formation de V_{Ge} en fonction de niveau de Fermi…….39
Figure II.14. Diode Schottky (a) polarisée en inverse Vr, (b) pendant le pulse Vp, (c) après le pulse Vr……...40
Figure II.15. Schéma présentant le principe de mesure de photoluminescence…….....43

CHAPITRE III

Figure III.1. Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie…….....45
Figure III.2. Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge…….47
Figure III.3. La dépendance du rendement et le gap du semiconducteur……48
Figure III.4. La relation entre la constante de réseau et la largeur de la bande interdite pour les alliages III-V……...50
Figure III.5. Coefficient d'absorption en fonction de l'énergie de photon…….....51
Figure III.6. Structures cellules solaires triples jonction. (a) avec accord de paramètre de maille, (b) avec désaccord de paramètre de maille……..53
Figure III.7. Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une CSTJ…….....54
Figure III.8. Couche fenêtre (a)avant et (b) arrière…….54
Figure III.9. Structure cristalline de l'InP……...56
Figure III.10. Structure cristalline de GaP……..57
Figure III.11. Structure cristalline d'InAs……..58
Figure III.12. Structure cristalline de GaAs……59
Figure III.13. Le rendement quantique externe de la cellule solaire InGaP/InGaAs/Ge.....59
Figure III.14. Circuit équivalent du model à une seul diode……..60

Figure III.15. Circuit équivalent du model à deux diodes……...62

CHAPITRE IV

Figure IV.1. Ensemble de sous-fenêtres pour introduire les différents paramètres……..64
Figure IV.2. La fenêtre d'informations de couches……..65
Figure IV.3. Structure de la cellule à simuler……...66
Figure IV.4.Caractéristiques J(V) des sous cellules InGaP/InGaAs/Ge sans défauts……..70
Figure IV.5. Les caractéristiques J(V) des sous cellules InGaP/InGaAs/Ge avec défauts ….72
Figure IV.6. Puissance débitée par la cellule InGaP sans et avec défauts……74
Figure IV.7. Puissance débitée par la cellule InGaAs sans et avec défauts…..…….74
Figure IV.8. Puissance débitée par la cellule Ge sans et avec défauts…….…….75
Figure IV.9. Les caractéristiques J(V) de la cellule triple jonction avec et sans défauts……..76
Figure IV.10. Puissance débitée par la cellule triple jonction sans et avec défauts…….…….77

Sommaire

Introduction générale……..1

Chapitre I

Les Cellules solaires

I.1 Introduction 3
I. 2 L'énergie solaire 3
I. 2. 1 La ressource solaire 3
I. 2. 2 Spectre solaire 3
I.3 L'effet photovoltaïque 5
I.4 La cellule solaire 7
I.4.1 Définition 7
I.4.2 La jonction PN 7
I.4.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 8
I.4.4 Schéma électrique équivalent 9
I.4.5 Grandeurs caractéristiques de la cellule solaire 10
I.5 Architecture de la cellule photovoltaïque 12
I.5.1 Texturation de la surface 13
I.5.2 Les contacts face avant et face arrière 14
I.5.3 La couche antireflet 14
I.5.4 La passivation 14
I.5.5 Champ électrique dans la zone arrière (BSF) 14
I.6 Association des cellules solaires 14
I.6.1 Association en série 15
I.6.2 Association en parallèle 15
I.6.3 Association mixte (série parallèle) 16
I.7 Influence de paramètres sur la caractéristique de la cellule PV 17
I.7.1 Paramètres internes 17
I.7.1.1 Influence de la résistance série R_s 17
I.7.1.2 Influence de la résistance parallèle R_{sh} 17
I.7.2 Paramètres externe 18

I.7.2.1 Influence de l'éclairement 18
I.7.2.2 Influence de la température 19
I.8 Générations de cellules solaires 19
I.8.1 Première génération 19
I.8.2 Deuxième génération 20
I.8.3 Troisième génération 20
I.9. Conclusion 21

Chapitre II

Physique des cellules solaires

II.1 Introduction 22
II.2 Propriétés physiques des semi-conducteurs III-V 22
II.2.1 Maille cristalline 22
II.2.1.1 Configuration 22
II.2.1.2 Evolution du paramètre de maille 23
II.2.2 Bande interdite le gap 23
II.2.2.1 Structure de bandes 23
II.2.2.2 Variation du gap 24
II.3 Absorption et génération 24
II.3.1 Processus d'absorption 24
Absorption bande-à-bande 24
Absorption par les porteurs libres 25
II.3.2 Génération des porteurs 25
II.4 Mécanismes de recombinaison 26
II.4.1 Recombinaisons en volume 26
II.4.1.1 Recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH) 26
II.4.1.2 Recombinaisons Auger 28
II.4.1.3 Recombinaisons radiatives 28
II.4.2 Recombinaisons en surface 28
II.5 Défauts dans les semiconducteurs 29
II.5.1.Différents types des défauts dans les semi-conducteurs 29
II.5.1.1 Défauts ponctuels 29

Lacunes 29
Interstitiels 30
Substitutions 30
II.5.1.2 Défauts étendus 30
Dislocations 30
Défauts surfaciques 30
Défauts volumiques 31
II.5.2 Etats de charge des défauts et énergie de formation 32
II.5.3 Défauts dans InGaAs 32
II.5.3.1 Antisite d'Arsenic As_{Ga} 33
II.5.3.2 Antisite de galium Ga_{As} 34
II.5.3.3 Vacance de galium V_{Ga} 34
II.5.3.4 Vacance d'arsenic V_{As} 35
II.5.3.5 Interstitiel de galium Ga_i 36
II.5.3.6 Interstitiel d'arsenic As_i 37
II.5.3.7 Défaut complexe [V_{Ga}+As_{Ga}] 37
II.5.4 Défauts dans le Ge 38
II.5.5 Défauts dans InGaP 39
II.6. Méthodes de Mesure des Défauts 39
II.6.1. La spectroscopie de transitoire de capacité DLTS 39
II.6.2. La Photoluminescence 41
1. Principe 42
2. Dispositif 42
II.7 Conclusion 43

Chapitre III

Cellule solaire triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge

III.1 Introduction 44
III.2 Les Cellules solaires multijonctions 44
III.2.1 Aperçu sur les Cellules solaires multijonctions 44
III.2.2 Utilité des cellules multijonction 46

III.2.3 Structure et principe de base des Cellules solaires multijonctions 46
III.2.3.1 Structure 46
III.2.3.2 Principe de base 47
III.2.4 Choix des matériaux 48
III.2.4.1 Bandes interdites 48
III.2.4.2 Constante de réseau 49
III.2.4.3 Le coefficient d'absorption 50
III.3 Cellules solaires TJ à base d'InGaP/InGaAs/Ge 52
III.3.1 Constituants de base d'une CSTJ à base d'InGaP/InGaAs/Ge 52
III.3.1.1 Jonctions tunnels entre les cellules 53
III.3.1.2 Couches "fenêtres" 54
III.3.1.3 Couche tampon 55
III.3.1.4 Couche antireflet 55
III.3.1.5 Couche de contact et contacts électriques 55
III.3.2 Les alliages ternaires 55
III.3.2.1 Le phosphure d'indium et de gallium (InGaP) 56
III.3.2.1.1 Le phosphure d'indium (InP) 56
III.3.2.1.2 Le phosphure de galium (GaP) 57
III.3.2.2 L'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs) 57
III.3.2.2.1 Arséniure d'indium (InAs) 57
III.3.2.2.2 Arséniure de galium (GaAs) 58
III.3.2.3 Le germanium 59
III.4 Modélisation électrique de la cellule triple jonction 60
III.4.1 Model d'une seule diode 60
III.4.2 Model à deux diodes 61
III.5 Conclusion 62

Chapitre VI

Résultats de la simulation et discussion

IV.1 Introduction 63
IV.2 Le simulateur AMPS-1D 63
IV.3 Structure de la cellule à simuler 65
IV. 3. 1 Paramètres des matériaux 66

a) Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier 66
b) Paramètres qui s'appliquent à une région particulière 67
c) Etat des défauts 68
IV.4 Caractéristiques J(V) et extraction des paramètres de la cellule triple jonction InGaP /InGaAs/Ge sans défauts 70
IV.4.1 Caractéristiques J(V) 70
IV.4.2 Méthode d'extraction des résistances série et shunt 71
IV.4.3 Extraction des paramètres 71
IV.5 Caractéristiques J(V) et extraction des paramètres des sous cellules 72
solaires InGaP /InGaAs/Ge avec défauts 72
IV.5.1 Caractéristiques J(V) 72
IV.5.2 Extraction des paramètres 73
IV.6 Puissance débitée par les sous cellules solaires 73
IV.6.1 La cellule InGaP 74
IV.6.2 La cellule InGaAs 74
IV.6.3 La cellule Ge 75
IV.7 Caractéristiques J(V) et extraction des paramètres la cellule triple jonction avec et sans défauts 76
IV.7.1 Caractéristiques J(V) 76
IV.7.2 Puissance débitée par la cellule solaire triple jonction 77
IV.8 Conclusion 77
Conclusion générale 78

Intoduction générale

Faces aux problèmes inhérents à l'utilisation des combustibles fossiles tel que les effets nuisibles sur le plan environnemental, ainsi l'épuisement de ces sources d'énergie, l'homme sera condamné à trouver d'autres alternatives pour produire l'énergie dont il s'est rendu dépendant. Plusieurs types de sources d'énergies renouvelables sont actuellement connus, l'énergie solaire est une des technologies les plus prometteuses et qui offre la solution pour répondre aux exigences énergétiques modernes, car le soleil est considéré comme une ressource non limitée à l'échelle humaine, non polluante et les matériaux utilisés pour la fabrication des cellules photovoltaïques sont réutilisables.

Le grand obstacle est, cependant, d'une part le coût élevé de ces technologies et d'autre part leurs rendements limités les rendant ainsi de loin moins compétitives par rapport aux énergies fossiles. C'est pour cette raison qu'un grand effort est concentré sur la recherche d'autres solutions profitant des avancées technologiques contemporaines, notamment de l'industrie de la microélectronique, pour à la fois augmenter les rendements énergétiques mais aussi réduire les coûts de production.

Les cellules solaires multijonctions (CSMJ) constituées essentiellement de plusieurs types de couches épitaxiées les unes après les autres promettent de répondre à ces pétitions. En effet, les CSMJ sont généralement conçues à partir des matériaux (III-V) et elles font la troisième génération de la technologie photovoltaïque, et détiennent actuellement tous les records de rendement énergétique.

Le concept des cellules multijonctions est simple, plusieurs cellules avec des gaps différents sont empilées de manière à ce que le rayonnement incident interagisse séquentiellement avec les cellules de gaps décroissants. Les cellules supérieures, à grands gaps (à base de l'InGaP), absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous-jacentes de gap plus petits (à base de l'InGaAs et du Ge respectivement). Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie. Les pertes par thermalisation sont ainsi minimisées car chaque cellule convertit des photons d'énergie $h\nu \sim E_g$.

Dans ce travail, une cellule solaire triple jonction de type InGaP/InGaAs/Ge est décrite et entièrement simulée en utilisant l'outil de simulation AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures). Les propriétés des matériaux employés seront soigneusement étudiées et tous leurs paramètres électriques et optiques importants pour la simulation seront recherchés. Ainsi nous nous intéresserons aux différents défauts présents dans les matériaux utilisés et leur effet sur les performances de ces cellules. Trois différentes cellules seront à examiner et le rendement de chacune d'elles sera optimisé.

Afin de fournir une simulation précise, les paramètres spécifiques de chaque matériau seront insérés, notamment ceux concernant les défauts dans les matériaux.

Le travail réalisé a été élaboré comme suit :

Dans le premier chapitre nous rappelons les généralités sur les cellules solaires. Nous décrivons le fonctionnement et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque. Nous abordons le principe de conversion photovoltaïque, les paramètres caractéristiques et la structure de la cellule photovoltaïque ainsi que les différentes sources de pertes influençant le rendement de conversion.

Le deuxième chapitre traite la physique de la cellule solaire, en décrivant les phénomènes de génération et de recombinaison en premier lieu, la structure et les défauts présents dans les semiconducteurs en deuxième lieu.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du fonctionnement et les caractéristiques d'une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge pour des applications spéciales.

Enfin nous présentons dans le quatrième et dernier chapitre les résultats de simulation obtenus et leurs interprétations.

Chapitre I

Les Cellules solaires

I.1 Introduction

L'électricité photovoltaïque est une source incontournable pour l'avenir, et des efforts considérables se font pour rendre cet apport d'énergie plus performant. Ce premier chapitre est consacré à une étude générale pour mettre en évidence la cellule solaire.

I. 2 L'énergie solaire

I. 2. 1 La ressource solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 microns. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0.4 cm).
- 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8 cm).
- 44% dans la bande des infrarouges (> 0.8 cm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2) à plus ou moins 3% selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci

L'atmosphère en absorbe toute fois une partie de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement (1.2 kW/m^2). La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter.

Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et au moment où cette énergie est disponible [1].

I. 2. 2 Spectre solaire

Le soleil se comporte comme un corps noir dont la surface est à la température d'environ 5800 K. A la traversée de l'atmosphère, la lumière est absorbée et dispersée en particulier par les composants atmosphériques importants tels que le CO_2 et la vapeur d'eau (H_2O), de sorte que le spectre atteignant la surface de la terre soit atténué et changé dans la forme. Une mesure pour le spectre solaire est l'air Mass (noté AM). Elle est définie comme suit :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad \text{(I.1)}$$

Où θ est l'angle entre le soleil et le zénith. Le spectre standard pour la latitude tempérée est AM1.5 qui correspond à l'angle de 48 du vertical [2].

AM 1.5G donne une irradiance de 970 w/m^2, mais a été arrondi à 1 kW/m^2. L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce a la formule empirique suivante.

$$I_D = 1.33(0.7^{AM})^{0.678} \quad \text{(I.2)}$$

Avec I_D en kW/m^2

Il est clair, d'après ce qui précède, que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et de proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques et de l'altitude du lieu.

La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire: les ensoleillements moyens sur l'année peuvent atteindre 7kW/m^2/jour dans le nord de l'Australie et au Botswana. En Europe occidental, la puissance se situe autour de 3kW/m^2/jour pour les pays comme l'Espagne, à moins de 1KW/m^2/jour pour le sud de la Suède. La France est soumise à une moyenne annuelle comprise entre 1.5et 3.1kW/m^2/jour selon les régions [3].

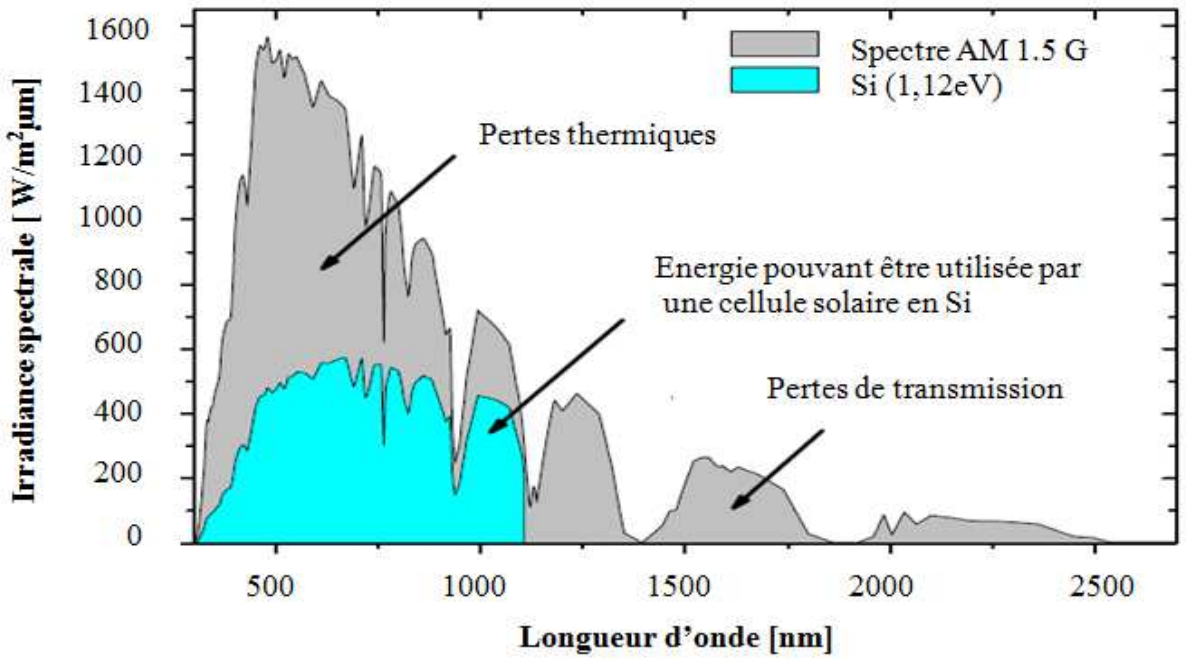


Figure I.1 : Spectre d'émission solaire [4].

I.3 L’effet photovoltaïque

L’effet photovoltaïque transforme l’énergie lumineuse en électricité. Il fut découvert par Antoine Becquerel en 1839, qui constata que le rayonnement lumineux produit sur certains matériaux une étincelle, preuve d'un phénomène électrique.

Ce phénomène se produit dans les semiconducteurs. Ceci est dû à leur structure énergétique. Un électron lié à l'atome se trouve dans la bande de valence; un électron libre se situe, lui, dans la bande de conduction: c'est lui qui, par son déplacement, permet la conduction du courant électrique. Les métaux présentent une forte concentration en électrons libres, ils conduisent très bien le courant. Les isolants qui au contraire n'en possèdent pas, tous les électrons étant liés dans la bande de valence, ne conduisent pas le courant électrique. Quant aux semi-conducteurs, ils sont intermédiaires entre ces deux comportements : ils possèdent une très faible concentration en électrons libres, mais si on leur apporte de l'énergie, les électrons de la bande de valence peuvent passer dans la bande de conduction, et participer à un courant électrique dans le matériau. Si on les éclaire avec un rayonnement électromagnétique, par exemple de la lumière visible, les semiconducteurs sont capables de conduire un courant électrique.

La figure (I.2) montre les structures de bande de trois types de matériaux : isolants, métaux, et semiconducteurs. On voit sur cette figure que la différence réside au niveau de l'éloignement des bandes de valence et de conduction. Dans les isolants, cette différence est assez importante, de l'ordre d'une dizaine d'eV. Chez les métaux par contre, elle est inexistante, les bandes de valence et de conduction se chevauchent, permettant un passage aisé des électrons, dont la circulation induit un courant électrique. Chez les semiconducteurs enfin, ce passage d'électrons entre les bandes de valence et de conduction n'est possible que si l'on fournit une certaine quantité d'énergie, par exemple sous forme de photons, pour franchir la bande interdite, aussi appelée gap, dont la largeur va de 0,6 à 4 eV, selon le matériau.

C'est ce phénomène qui rend possible l'effet photovoltaïque. Lorsqu'un photon atteint le matériau, il transmet intégralement son énergie à un électron qui, excité, peut se libérer de la bande de valence où une liaison chimique le retient, et passer dans la bande de conduction, si le niveau énergétique final est permis.

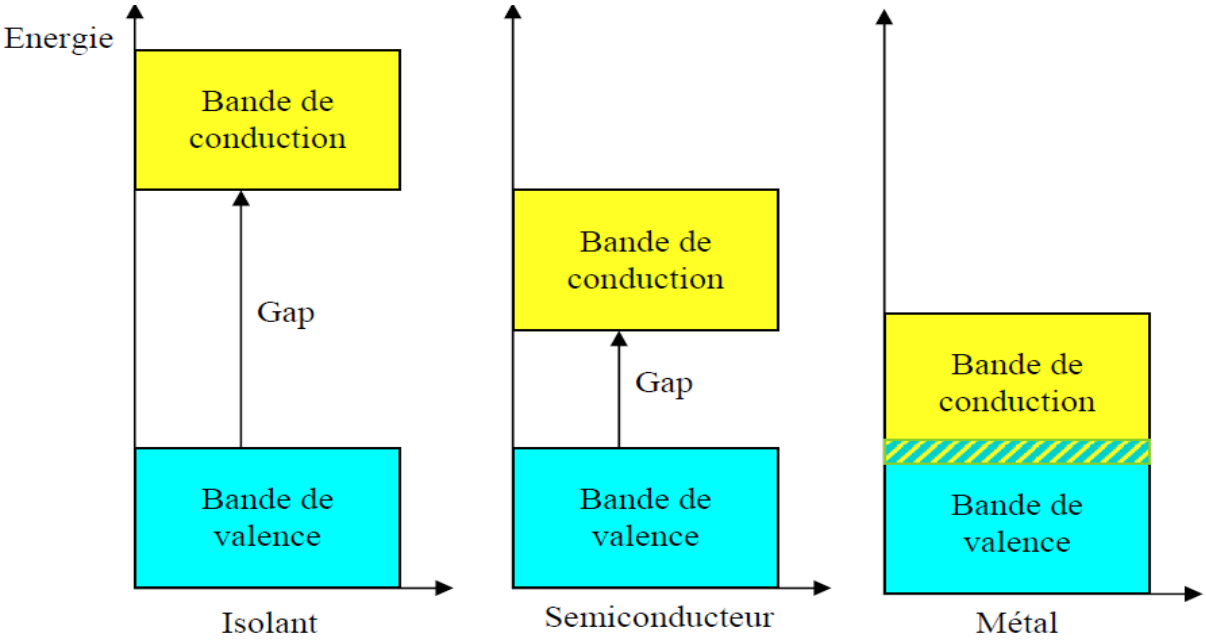


Figure I.2 : Structure de bande des trois catégories de matériaux.

Un métal peut absorber tout rayonnement qu'il reçoit, mais l'électron ainsi excité revient immédiatement dans son état initial, ne pouvant donc participer à un courant électrique. L'énergie du photon est ensuite cédée au réseau sous forme thermique.

Le rayonnement n'agira sur un isolant que si son énergie dépasse la largeur de la bande interdite, ce qui correspond à une énergie grande, située au delà du spectre solaire.

Par contre, dans un semiconducteur, le gap étant plus étroit, l'énergie à fournir pour exciter un électron est plus basse, un photon dont l'énergie appartient au spectre solaire peut donc interagir sur lui.

La transition de l'électron vers un niveau plus énergétique génère deux types de porteurs de charge, des électrons de conduction, de charge -e, et des trous, particules fictives de charge e+ correspondante à l'absence d'un électron. Pour chaque absorption d'un photon, apparaît ainsi une paire électron-trou, comme illustré sur la figure (I.3).

La durée de vie des porteurs de charge dans un semiconducteur est un million de fois plus grande que dans un métal. Il est donc possible de séparer les électrons des trous, avant qu'ils ne se recombinent pour se neutraliser, si le matériau est soumis à un champ électrique interne. Les charges de signes opposés seront collectées par ce champ, les charges négatives repoussées vers une face et les charges positives vers l'autre face, une pile étant ainsi créée. Une différence de potentiel se formera alors, induisant l'apparition d'un courant électrique, appelé **‘‘photocourant’’**, puisque ce sont les photons qui ont permis sa création [5].

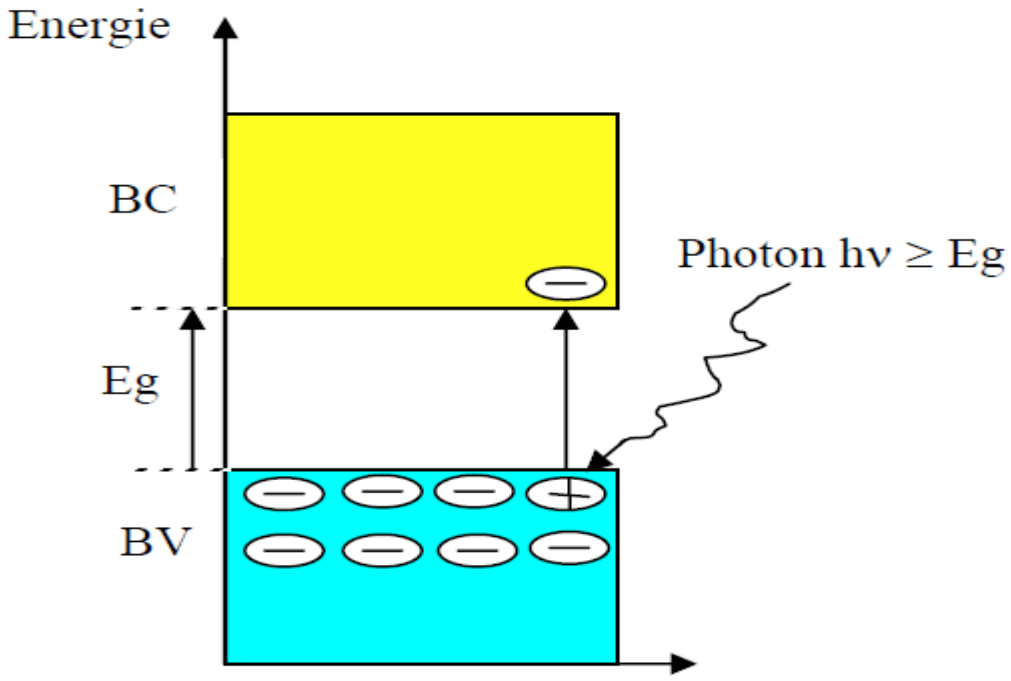


Figure I.3 : Création d'une paire électron-trou dans un semiconducteur.

I.4 La cellule solaire

I.4.1 Définition

La cellule solaire est un composant qui convertit la lumière incidente provenant du soleil en électricité. Elle fournit la source d'énergie de longue durée la plus importante pour les satellites et les véhicules spatiaux. Elle a été aussi implantée avec succès dans plusieurs applications terrestre à échelle réduite. Son importance ne cesse pas de croitre surtout depuis que le monde s'est mis à l'évidence qu'il doit développer d'autres ressources d'énergie autres que les ressources conventionnelles. Le meilleur candidat pour cette fonction est le soleil [6].

I.4.2 La jonction PN

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteurs. Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposerons abrupte (figure I.4), c.-à-d. que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés,

qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives, qu'on appelle la zone de charge d'espace (ZCE). Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [7].

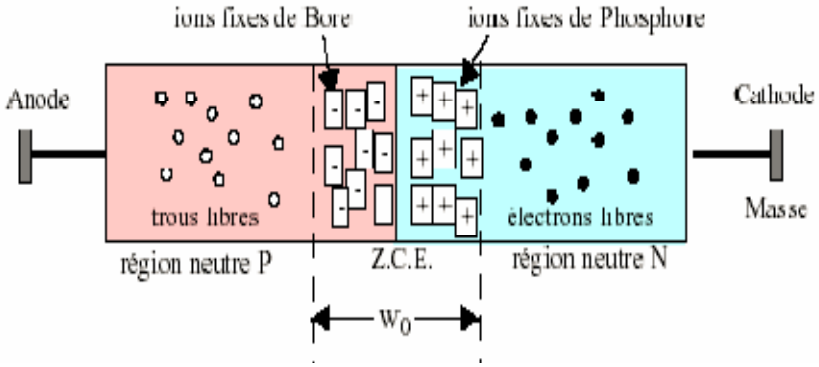


Figure I.4 : Représentation d'une jonction PN.

I.4.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, ou encore photopile, est basé sur les propriétés des matériaux semiconducteurs.

La figure (I.5) montre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque avec les principales régions (Emetteur, Zone de Charge d'Espace et Base) dans lesquelles les photons incidents peuvent créer des porteurs libres. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant la région de leur création. Dans les zones électriquement neutres (p) et (n), les porteurs minoritaires générés par les photons diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) sont propulsés par le champ électrique $\vec{E}$ vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs de charges contribuent donc au courant de la cellule photovoltaïque par leurs diffusions, cette composante est appelée courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p, donnant naissance à un courant de génération [5].

Il convient donc de noter que la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible si et seulement si trois phénomènes physiques de base ont lieu quasi simultanément :

- L'absorption d'un maximum de photons possible ;
- La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres ;

- La collecte sans perte de ces derniers vers un circuit électrique extérieur.

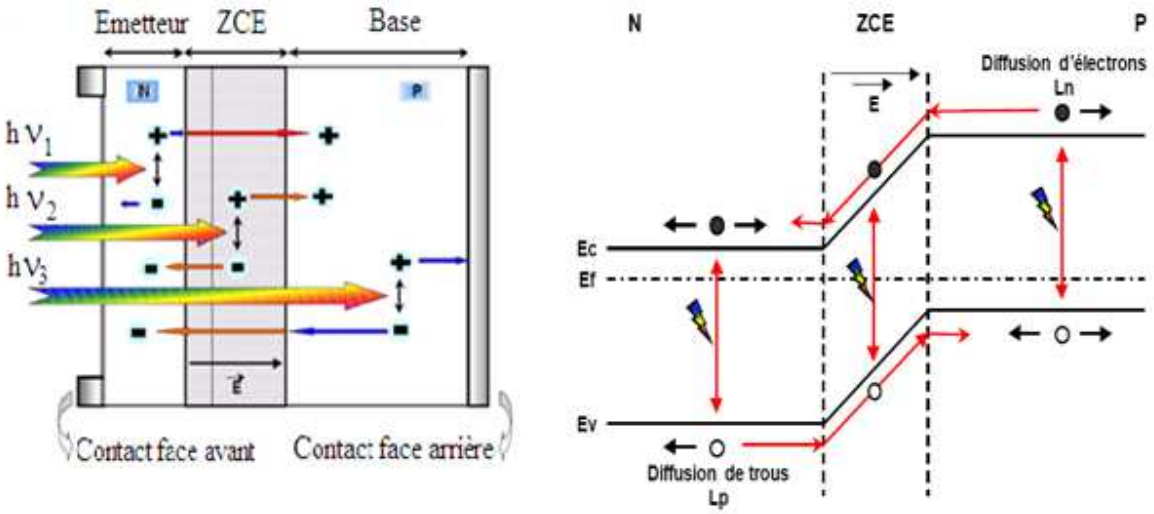


Figure I.5 : Structure et diagramme de bande d'une cellule Photovoltaïque sous éclairement.

Le premier phénomène est l'absorption optique de photons par un matériau semiconducteur approprié dans la partie la plus intense du spectre solaire [3] (figure I.5). Si l'on prend un semiconducteur à grand gap, l'absorption sera limitée aux petites longueurs d'onde, dans l'ultra-violet, alors que la partie la plus importante du spectre solaire se situe dans le visible et le proche infrarouge. Pour absorber un maximum de photons, il faudrait donc un semiconducteur possédant un petit gap. Mais alors la tension de sortie, proportionnelle au gap, et donc la puissance de la photopile (P = I*V), seraient trop faibles pour exploiter cette pile. La valeur optimale du gap du matériau utilisé comme absorbeur se situe vers 1,5 eV.

Le second, c'est la séparation rapide des électrons et des trous avant leur recombinaison.

Quant au troisième, c'est l'entraînement des électrons et des trous vers les électrodes collectrices (collecte des porteurs).

I.4.4 Schéma électrique équivalent

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma équivalent électrique ci-dessous. On peut considérer le cas d'une cellule photovoltaïque idéale comprenant une source de courant et une diode en parallèle. La source de courant modélise le courant généré par les photons et la diode qui modélise la jonction PN.

Pour envisager le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, le circuit équivalent doit intégrer:

- Une résistance R_s, qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations ;
- Une résistance parallèle R_{sh} modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuite par les bords de la cellule est au niveau de la jonction).

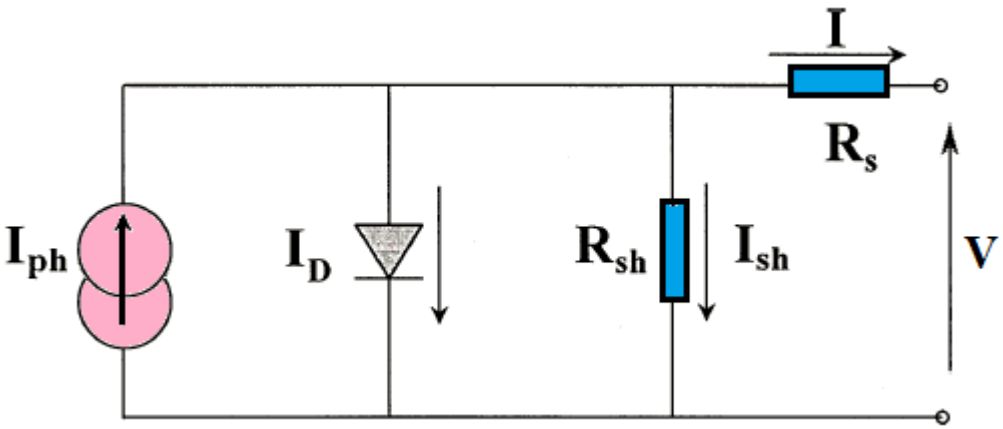


Figure I.6 : Schéma électrique réel de la cellule solaire.

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans La figure (I.6), on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}}\right) \quad \text{(I.3)}$$

$$I = I_{ph} - I_s\left[exp\left(\frac{V+IR_s}{nV_T}\right) - 1\right] - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}}\right) \quad \text{(I.4)}$$

I.4.5 Grandeurs caractéristiques de la cellule solaire

Les grandeurs caractéristiques de la cellule solaire peuvent être déterminées à partir de la caractéristique I(V) décrivant le fonctionnement de la cellule. La figure ci-dessous représente la caractéristique I(V) sous obscurité et sous éclairement et sa représentation conventionnelle.

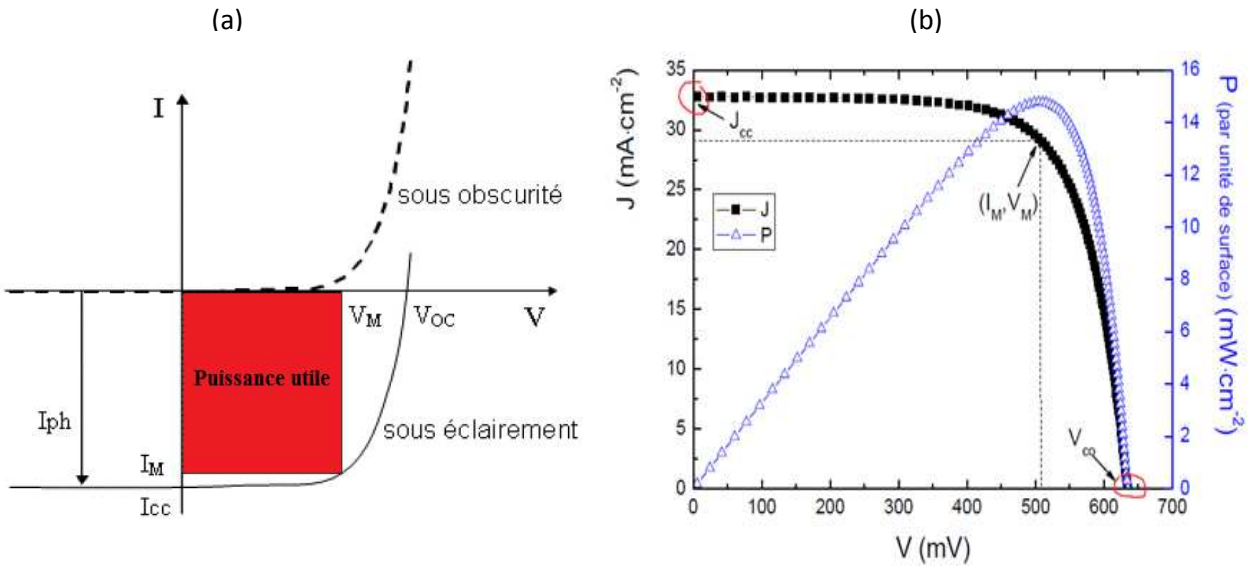


Figure I.7: (a) Caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque sous éclairement et dans l'obscurité. (b) Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V).

Les paramètres propres à la cellule photovoltaïque (V_{co}, I_{cc}, FF, η), extraits de la caractéristique I(V), permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

- ***Courant de court-circuit,* I_{cc} *:***

Il s'agir du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant V=0 dans le schéma équivalent. Il croit linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

- ***Tension à circuit ouvert,* V_{co} *:***

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

La tension V_{co} est donnée par la relation :

$$v_{co} = \frac{KT}{q} ln(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1) \quad \text{(I.5)}$$

- ***La puissance maximum,* Pm** :

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_m = I_m . V_m \quad \text{(I.6)}$$

Avec : V_m: la tension correspondante à la puissance maximale fournie, et I_m : le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

- ***Facteur de forme,* FF** *:*

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement P_m (I_m et V_m) de la courbe courant-tension. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad \text{(I.7)}$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme *FF* ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

- ***Le rendement,* η** *:*

Le rendement η des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre le rapport maximal délivré par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{incidente}} \quad \text{(I.8)}$$

Où bien :

$$\eta = \frac{FF.I_{cc}.V_{oc}}{P_{incidente}} \quad \text{(I.9)}$$

I.5 Architecture de la cellule photovoltaïque

Les premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Mais leur architecture a ensuite évolué. En effet, trois grandes avancées technologiques ont permis l'augmentation de leur rendement. Il s'agit de la texturation de surface, l'usage d'une couche anti-reflet et le champ de contact arrière.

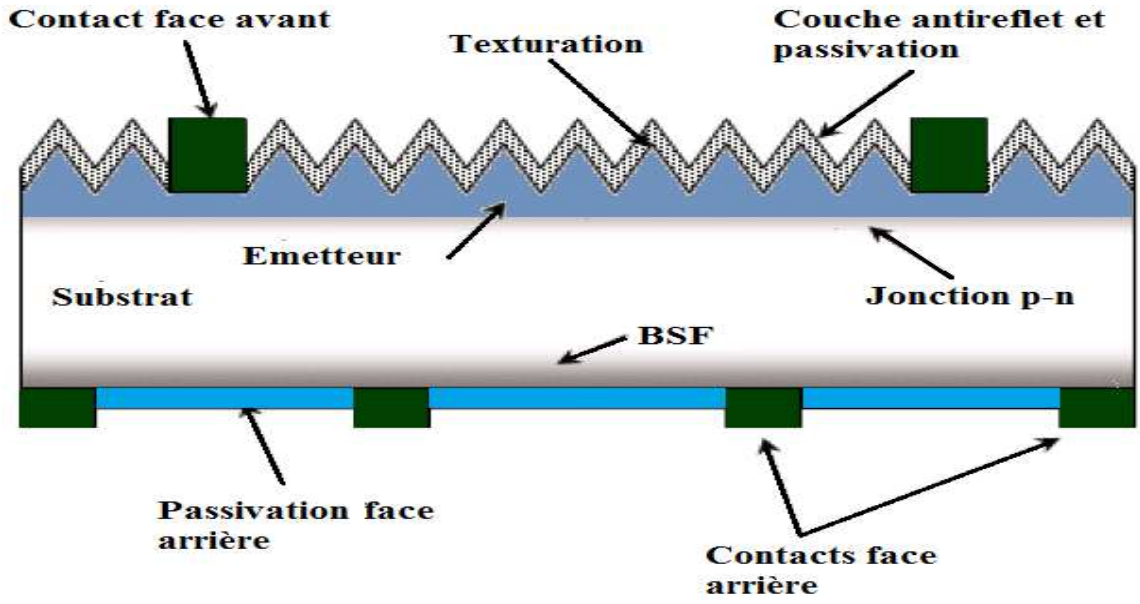


Figure I.8 : Composition d'une cellule photovoltaïque.

I.5.1 Texturation de la surface

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40% à moins de 10% [8].

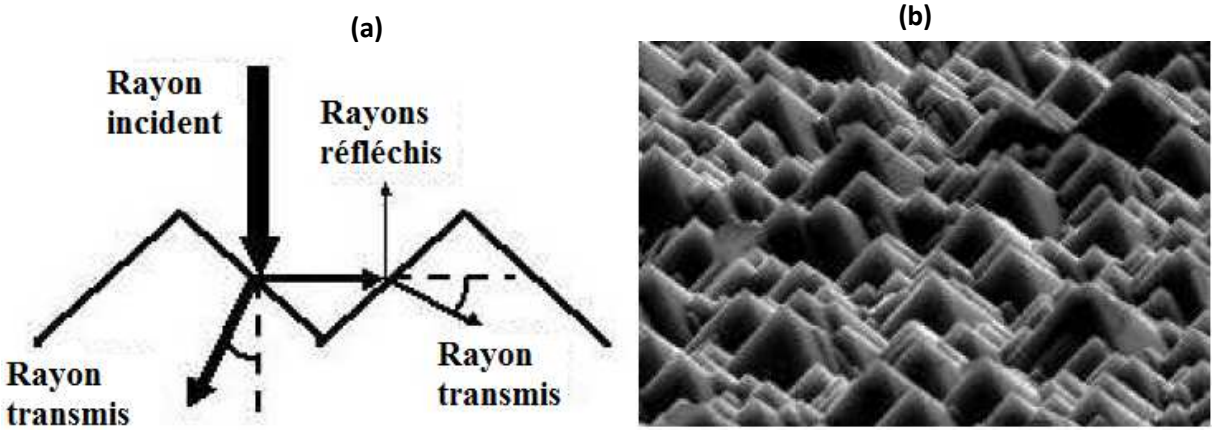


Figure I.9 : a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée;
b) Plaque de silicium après texturation.

I.5.2 Les contacts face avant et face arrière

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photogénérés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupéré.

I.5.3 La couche antireflet

La texturisation de la surface de la cellule permet de limiter les réflexions face avant. Pour réduire encore plus la réflexion, une couche antireflet (CAR) est ajoutée. L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quarte d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives.

I.5.4 La passivation

La surface des cellules est une source de recombinaison importante à cause des nombreux défauts cristallins présents liés à la discontinuité du cristal. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume du substrat, en neutralisant les sites actifs. Des matériaux tels que le SiN, le SiO et le SiNxOy permettent de passiver une grande partie de ces défauts puisqu'il combine deux effets de passivation : Passivation par neutralisation des défauts d'interface et passivation par effet de champ dont.

I.5.5 Champ électrique dans la zone arrière (BSF)

Afin de collecter les paires électron-trou créent par les radiations de grandes longueurs d'ondes du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contact ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créent au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombiner, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [9].

I.6 Association des cellules solaires

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules mais elles sont regroupées entre elles pour former un module photovoltaïque. Les modules sont regroupés leur tour pour former un panneau solaire.

Généralement, dans le module les cellules sont groupées en série alors que dans le panneau les modules sont groupés en parallèle ou en séries parallèle constituant ainsi une

matrice [10] .Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions et des courants supérieurs à ceux que peuvent fournir les cellules élémentaires ; d'où l'utilisation de groupements séries parallèles [11].

I.6.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par adition des tensions à courant donné.

La figure I.10 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série *ns* cellules identiques.

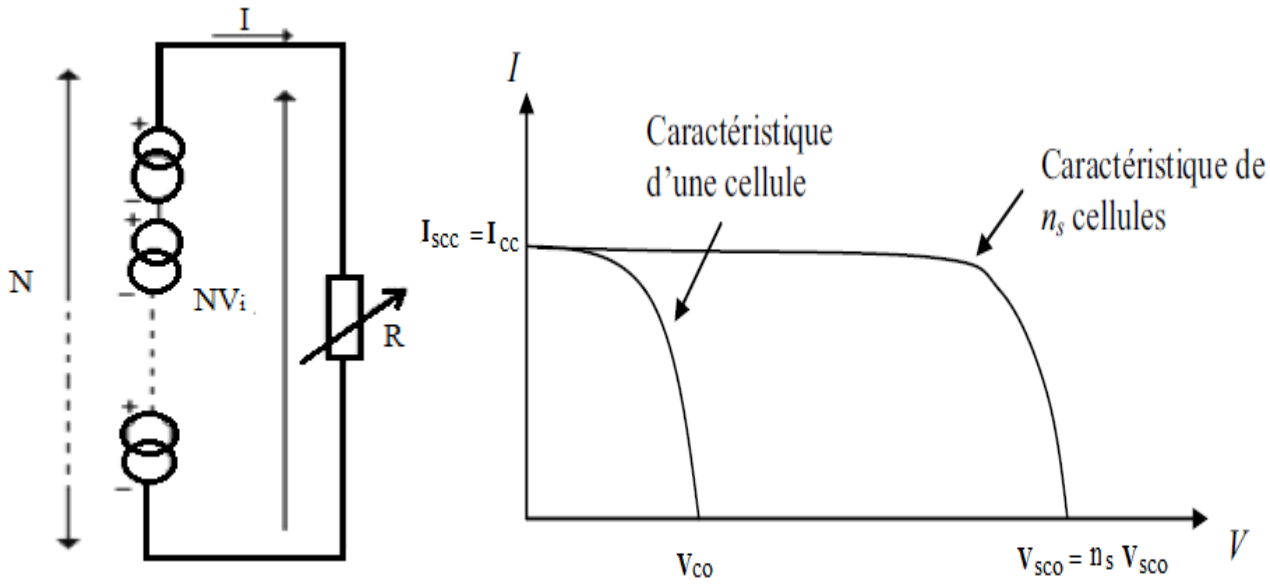


Figure I.10 : Caractéristiques de groupement série des cellules [12].

I.6.2 Association en parallèle

Ce genre de groupement permet l'augmentation du courant du générateur. La tension générée par les cellules est la même, le courant passant par la charge est égal à la somme des courants de chaque branche. Dans le cas de la figure (I.11), il y a une cellule par branche, par conséquent la charge R' sera traversée par un courant.

$$I = \sum_{i=1}^{M} I_i \qquad \text{(I.10)}$$

Ou M étant le nombre de cellules identique, I_i: le courant débité par chaque cellule. De même que R' sera soumise à une tension $V = V_i$, d'où V_i est la tension aux bornes d'une cellule. La courbe I-V du générateur, est obtenue en additionnant le courant de toutes les cellules pour une tension donnée.

Ainsi toutes les cellules étant identique, la tension sera égale à la tension de chaque cellule.

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \quad \text{(I.11)}$$

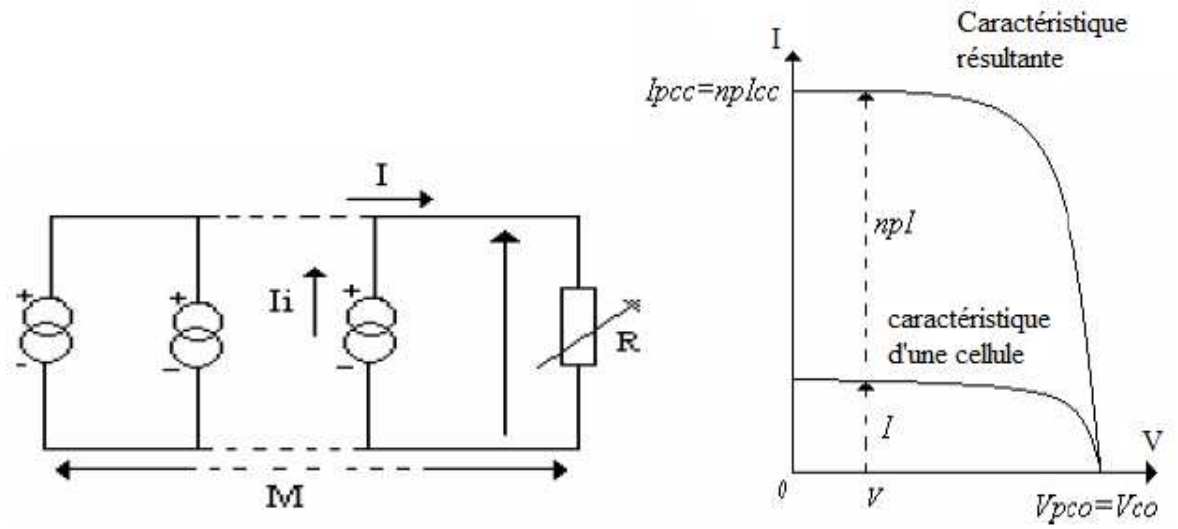


Figure I.11 : Caractéristiques de groupement parallèle des cellules [13].

I.6.3 Association mixte (série parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

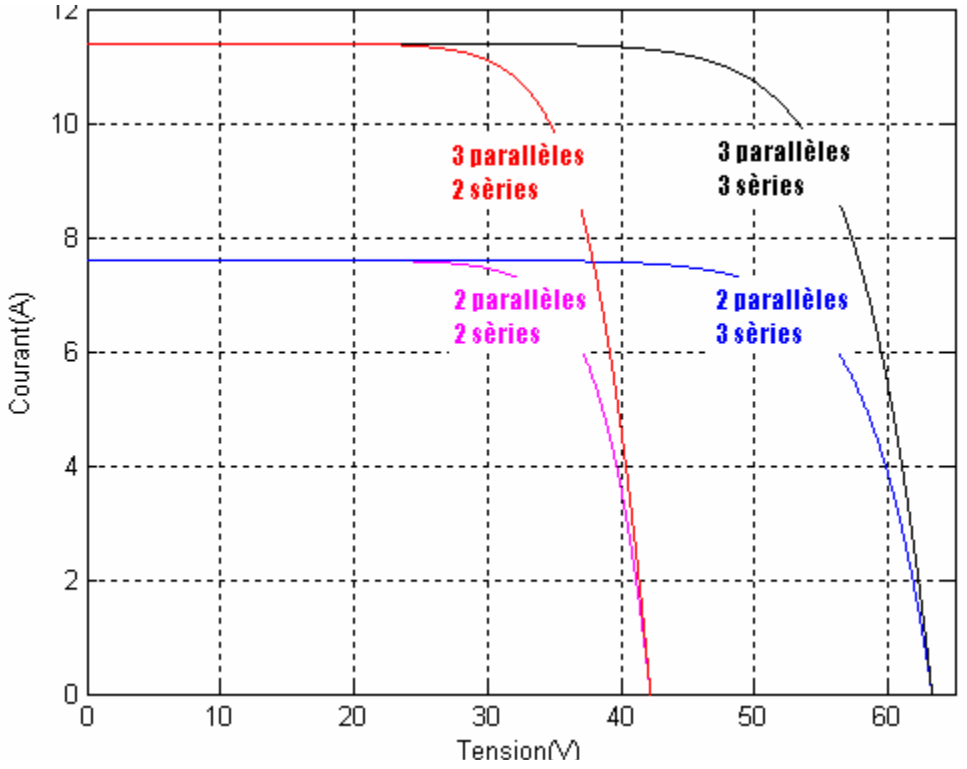


Figure I.12: Caractéristiques I(V) pour l'association mixte [14].

I.7 Influence de paramètres sur la caractéristique de la cellule PV

Le comportement électrique d'une cellule dépend de deux types de paramètres dont:

- Des paramètres internes tels que la résistance série R_s, la résistance shunt R_{sh}.
- Des paramètres externes tels que le flux solaire et la température T [15].

I.7.1 Paramètres internes

I.7.1.1 Influence de la résistance série R_s

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semiconducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contactes ohmiques de la cellule. Les contactes semi conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [14].

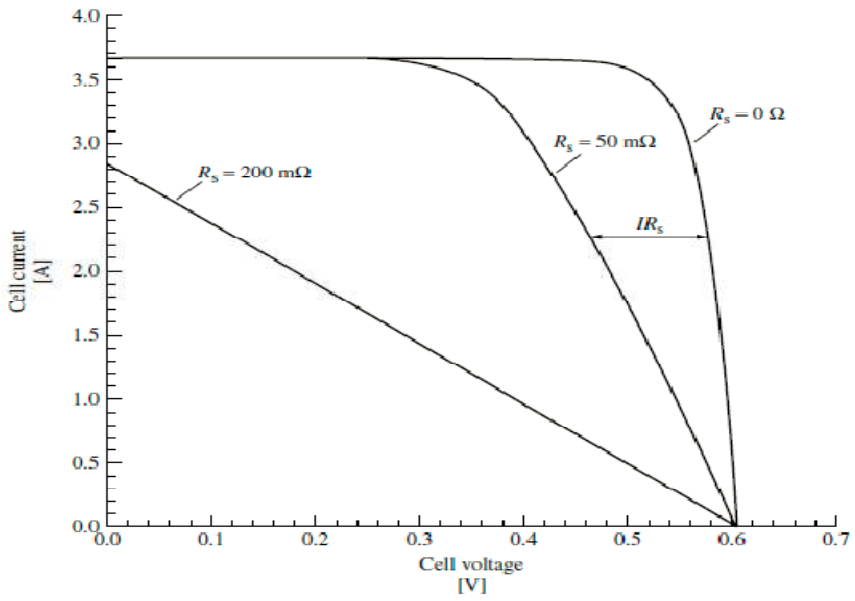


Figure I.13 : Influence de la résistance série [14].

I.7.1.2 Influence de la résistance parallèle R_{sh}

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_{sh}. L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si : $R_{sh} = 10^2$ à $10^4\ \Omega$. R_{sh} augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [14].

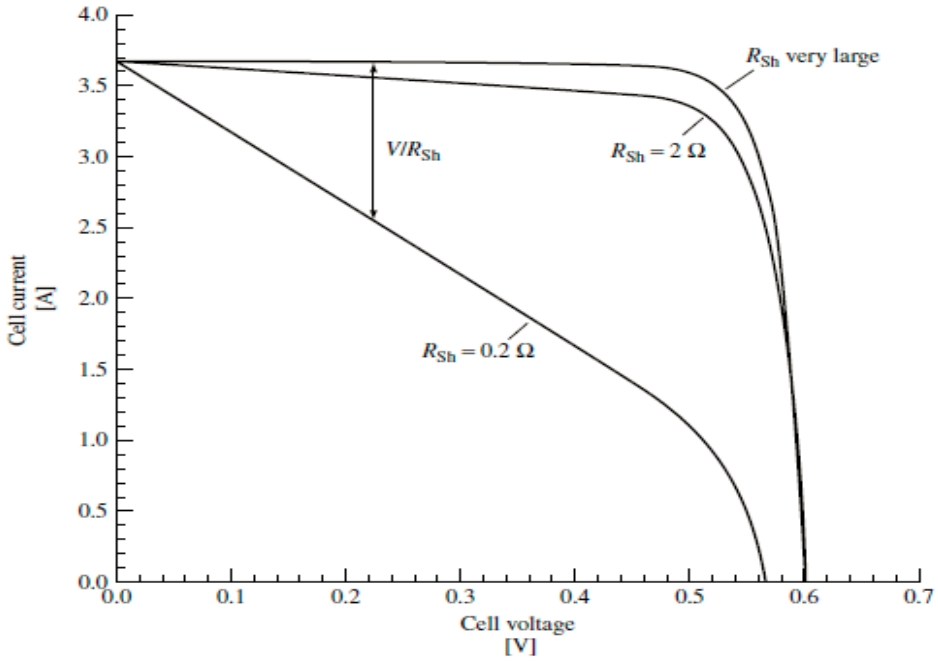


Figure I.14 : Influence de la résistance parallèle R_{sh}.

I.7.2 Paramètres externe

I.7.2.1 Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique I=f (V) suivant l'axe des courants.

L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [16].

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) de la cellule solaire est représentée sur la figure (I-15), pour une température fixe T=25c°.

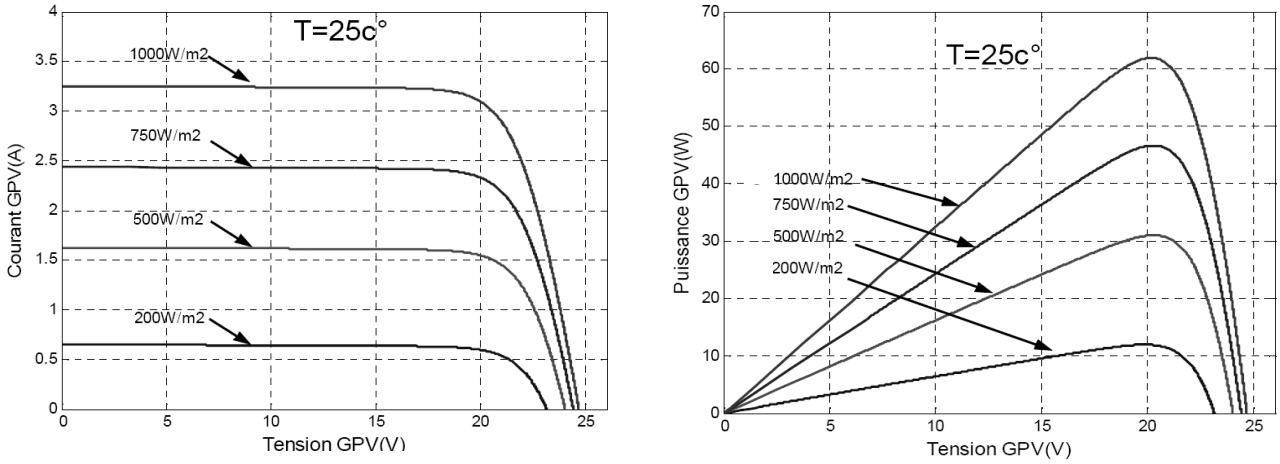


Figure I.15: Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V) et P(V) [17].

I.7.2.2 Influence de la température

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d'un semi-conducteur. Pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement [17].

L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure (I-16), pour un éclairement fixe E =1000W/m^2.

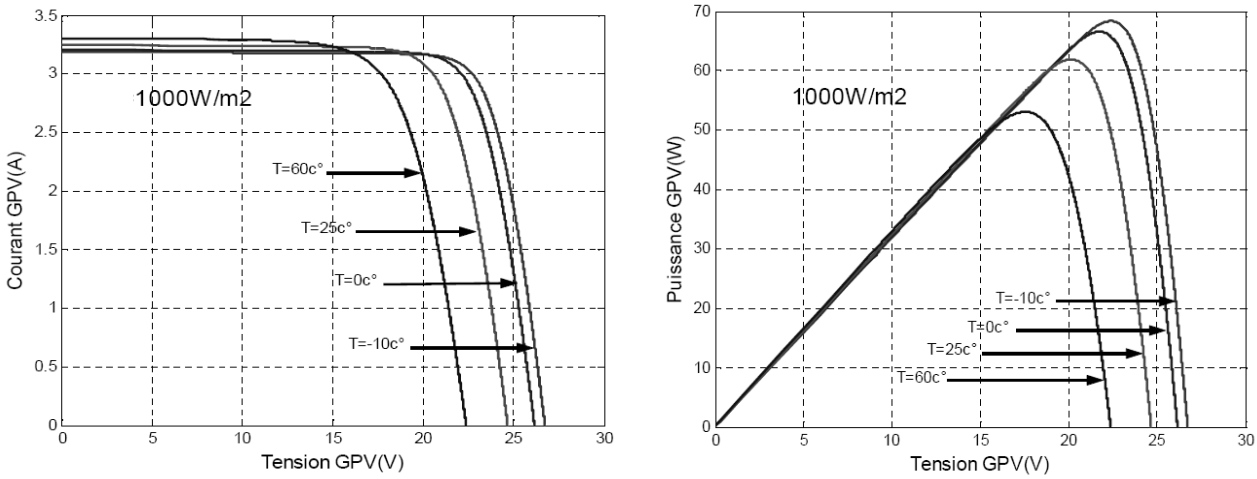


Figure I.16: Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V) [17].

I.8 Générations de cellules solaires

Les cellules solaires sont classées en trois générations à base de l'ordre de leur importance. Des recherches sont menées sur l'ensemble des trois générations en même temps pour améliorer leur efficacité, tandis que les cellules solaires de première génération constituent la plus grande part de la production commerciale à propos de 89,7% en 2007.

I.8.1 Première génération

Elles sont à grande surface, à haute qualité et des dispositifs formés des cellules solaires simple jonction de la *première génération*. La réduction des coûts de production de cette technologie est annulée en raison des coûts de main-d'œuvre élevée, et les coûts des matériaux surtout pour le silicium. Cette tendance se poursuit tant que l'industrie photovoltaïque est en expansion. Bien qu'il dispose d'une large partie d'absorption spectrale, les photons de haute énergie à la fin du bleu et violet du spectre sont gaspillés sous forme de chaleur [18].

La production de cellules solaires à haut rendement avec une efficacité énergétique de conversion élevée sont ainsi favorisées à condition de ne pas augmenter la complexité de la

cellule solaire. La limite théorique de l'efficacité des cellules solaires à simples jonction de silicium est de 33%.

I.8.2 Deuxième génération

Pour résoudre ces problèmes de besoins énergétiques et les coûts de production des cellules solaires, nous présentons la *deuxième génération*. La technologie des piles en couche mince a été imminente. Une réduction importante des coûts des matériaux est possible dans cette technologie. Ils ont aussi l'avantage d'augmenter la taille de l'unité.

Au fil du temps, les cellules solaires de deuxième génération sont attendues pour combler le fossé entre eux et les cellules de première génération par rapport au rendement de conversion énergétique. Avec l'augmentation de la dominance de cette technologie, le coût des matériaux constitutifs augmente également pour le couvercle supérieur et d'autres encapsulations pour lui donner une plus longue durée de vie. Les matériaux généralement utilisés dans la technologie en couche mince sont principalement le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre et d'indium CuInSe2 (CIS), le diséléniure de cuivre d'indium et de gallium Cu(InGa)Se2 (CIGS). Ces matériaux réduisent la masse, et par conséquent le coût de substrat formant le support pour le verre et la céramique. Non seulement ils réduisent les coûts mais également promettent une très haute efficacité de conversion d'énergie. Ce profile fait une tendance vers le changement de la première génération vers la deuxième génération. Mais la commercialisation de cette technologie s'est avérée être difficile [19].

I.8.3 Troisième génération

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération des cellules solaires [19]. La piètre performance électrique de la technologie en couche mince en maintenant de faibles coûts de production de cette technologie, les technologies de non semi-conducteurs (y compris les cellules à base de polymères).

Le progrès constant de l'évolution de l'industrie photovoltaïque est le résultat de l'augmentation de l'automatisation de la production de cellules solaires à couches minces avec une plus grande efficacité et des coûts réduits. La nécessité des découvertes révolutionnaires dans l'industrie photovoltaïque est parfois interrompue par des progrès dans les matériaux photovoltaïques et les technologies de fabrication pour l'amélioration de la compétitivité des coûts et de l'expansion du marché du photovoltaïque. En brisant les anciennes limites de l'efficacité et du coût en apportant les innovations par l'exploitation de nouvelles

compréhensions de la physique et de la science des matériaux deviendront une révolution [20].

I.9. Conclusion

Ce présent chapitre introduit l'énergie photovoltaïque par sa source solaire ; le soleil et traite les notions préliminaires nécessaires pour la compréhension de la photovoltaïque, ainsi nous avons étudié l'architecture de l'élément essentiel de la photovoltaïque qui est la cellule et les facteurs limitant son rendements. Enfin, nous avons cité les différentes générations de cellule solaire.

Chapitre II

Physique des cellules solaires

II.1 Introduction

La cellule solaire est l'élément essentiel assurant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'interaction entre la lumière et le semi-conducteur constituant la cellule solaire s'accompagne par différents phénomènes physiques tel que la génération et la recombinaison. Cette dernière dépend fortement de la structure cristalline ainsi que des défauts présents dans le semi-conducteur.

II.2 Propriétés physiques des semi-conducteurs III-V

II.2.1 Maille cristalline

II.2.1.1 Configuration

Les matériaux semiconducteurs III-V cristallisent suivant la structure sphalérite aussi appelée structure Zinc-Blende (ZB). Cette structure consiste en deux sous-réseaux cubiques à faces centrées (cfc) décalés l'un par rapport à l'autre d'une translation de (¼ ¼ ¼) suivant la direction {111}. Chaque sous-réseau est constitué exclusivement d'atomes III ou d'atomes V (figure II.1et II.2). La stœchiométrie est donc de 1 pour 1 entre les éléments III et V. Les liaisons chimiques entre les atomes sont fortement covalentes avec une mise en commun d'électrons entre les atomes élément III et ceux élément V. Les liaisons sont formées à partir d'orbitales atomiques hybridées de type s p^3. Il existe aussi un faible caractère ionique dans ces liaisons en raison de la différence d'électronégativité entre les éléments III et V.

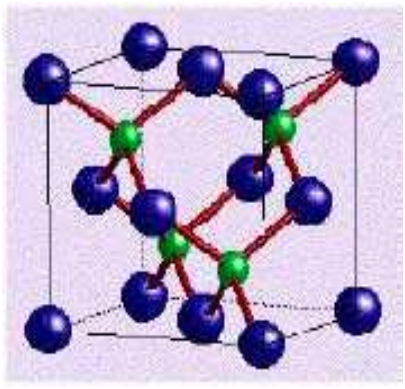


Figure II.1 : Maille élémentaire de la structure zinc blende.

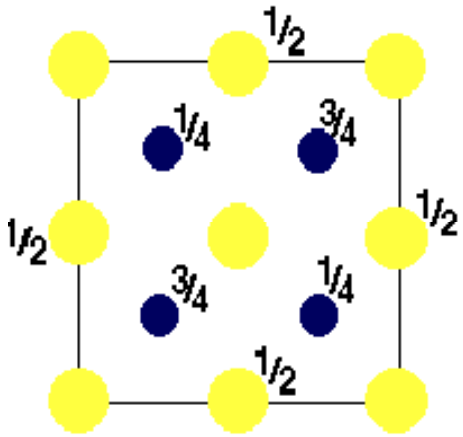


Figure II.2 : Vue de dessus de la structure zinc blende.

II.2.1.2 Evolution du paramètre de maille

Le paramètre de maille; défini comme étant la distance séparant deux mailles consécutives ; est noté *a*. Lors de la réalisation d'alliages avec des semiconducteurs différents, le paramètre de maille de l'alliage peut être considéré comme évoluant linéairement en fonction de la composition des différents binaires suivant la loi de Vegard.

Pour un alliage ternaire de type $In_xGa_{1-x}As$, le paramètre de maille a_{InGaAs} s'écrira ainsi:

$$a_{InGaAs} = xa_{InAs} + (1-x)a_{GaAs} \quad \text{(II.1)}$$

Où : a_{GaAs} et a_{InAs} sont, respectivement, les paramètres de maille des deux binaires GaAs et InAs. Cette loi possède une limite d'applicabilité, il est en effet nécessaire qu'aucun des binaires impliqués ne soit en trop faible proportion (moins de 4%).

II.2.2 Bande interdite : le gap

II.2.2.1 Structure de bandes

Les semiconducteurs sont caractérisés par un écart en énergie entre la bande de conduction et la bande de valence appelée bande interdite ou gap. Plus cet écart est important, plus le matériau est isolant. Ce gap correspond à l'énergie nécessaire au système pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. L'apport énergétique nécessaire à la transition est le plus souvent fourni par un photon ou par une excitation électrique. Inversement, ce gap équivaut à l'énergie du photon émis par le système lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou. C'est sur ces transitions que sont basés les systèmes d'émission ou de détection de photons (diodes, laser ou photodétecteurs).

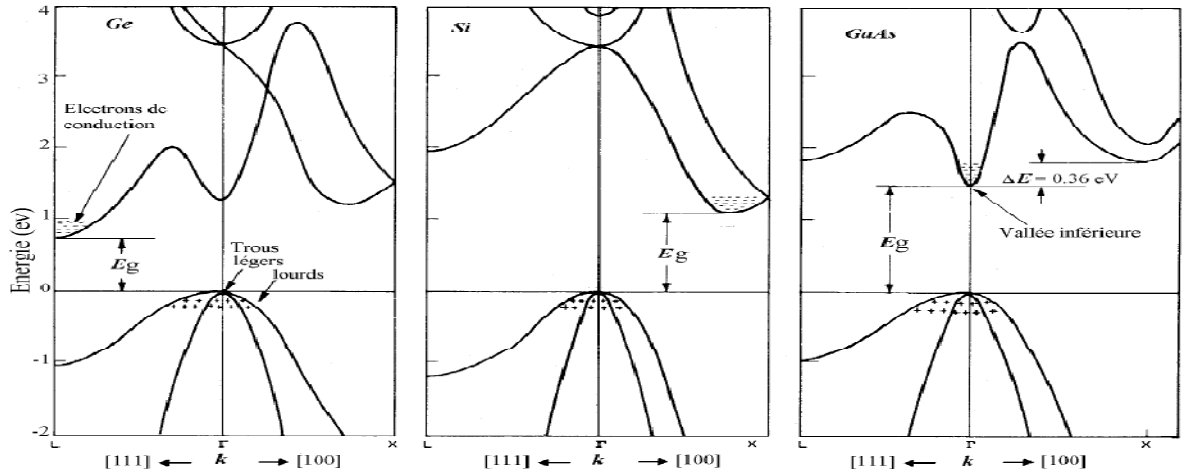


Figure II.3 : Structure des bandes de Ge, Si (gap indirect) et GaAs (gap direct) [21].

Les composés III-V possèdent en général un gap dit "direct" car le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont pour un même point k de la zone de Brillouin. Un gap direct favorise les phénomènes de recombinaisons des porteurs par émission des photons et donc il est à la base de l'intérêt de ces matériaux pour l'optoélectronique. La largeur de cette bande interdite directe (et donc la longueur d'onde des photons associés) varie en fonction de la composition des alliages et aussi de la température.

II.2.2.2 Variation du gap

La température entraîne une variation du gap direct des matériaux III-V selon une loi dite de Varshni. Elle est donnée par :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T+\beta)} \qquad \text{(II.2)}$$

Où : $E_g(T)$ est la valeur du gap à une température donnée et α et β sont des valeurs empiriques déterminées pour chaque semiconducteur.

L'énergie de gap varie également en fonction de la composition. Dans le cas des alliages ternaires, il s'agit en général d'une loi d'approximation parabolique fonction de la concentration de chaque élément et de coefficients dont les valeurs empiriques sont dépendantes de la température [22].

II.3 Absorption et génération

II.3.1 Processus d'absorption

Les principaux processus d'absorption sont l'absorption fondamentale bande-à-bande et par les porteurs libres.

Absorption bande-à-bande

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur l'absorption des photons d'énergie suffisante pour pouvoir induire le saut d'un électron depuis un état occupé de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction. En réalité, cette transition se fait de différentes manières selon le gap du semiconducteur. S'il s'agit d'un gap direct les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives, ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V. Dans le cas du gap indirect, les transitions sont obliques, les électrons du sommet de la bande de valence peuvent être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie [23].

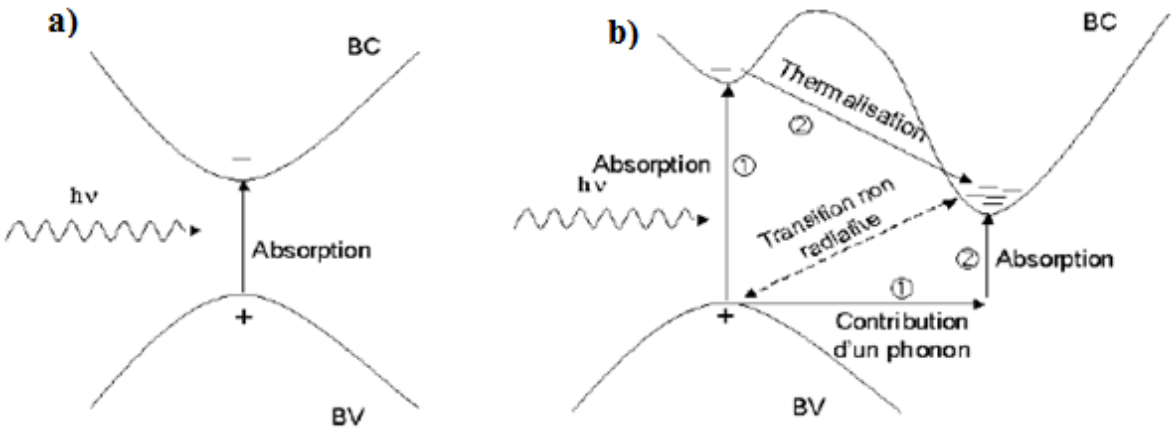


Figure II.4 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semiconducteur.
a) gap direct ; b) à un gap indirect [24].

Absorption par les porteurs libres

L'absorption par les porteurs libres des photons incidents est un processus concurrent aux processus générant des paires électron-trou, ce processus est significatif pour les photons d'énergies inférieurs au gap [25]. Dans ce processus, les électrons de la bande de conduction absorbent des photons et bougent vers des états supérieurs (même chose avec les trous).

II.3.2 Génération des porteurs

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semiconducteur génèrent des pairs électron-trou (on suppose implicitement la création d'un seul pair par photon). L'expression du taux de génération G($cm^{-3}.s^{-1}$) dépend de la forme du faisceau et de la surface éclairée, mais son intégrale sur tout le volume de génération donne le nombre total des photons absorbés par seconde.

Cas (1) : Dans le cas de génération homogène, par un éclairement monochromatique, sur toute l'épaisseur W d'un échantillon :

$$G = \frac{\emptyset_0 f_{abs}}{W} \qquad \text{(II.3)}$$

Où : $\emptyset_0$ (*photons/cm*^{2}/s) : Flux des photons incidents ;

f_{abs}: Fraction des photons absorbés par le semiconducteur.

Cas (2) : En éclairant une surface S d'un semiconducteur d'une façon homogène en surface mais pas en profondeur, le taux de génération à une dimension s'écrit [26] :

$$G(z) = \alpha \frac{I_0}{s} f_{abs} \exp(-\alpha z) \qquad \text{(II.4)}$$

Avec : I_0(*photons/s*) : Intensité incidente.

Dans le cas où les photons incidents ne pénétreraient pas jusqu'à la surface arrière de l'échantillon, on peut écrire :

$$f_{abs} = 1 - R$$

Où *R* est la réflectivité à la longueur d'onde d'excitation.

Cas (3) : Dans le cas d'un faisceau Gaussien de rayon σ, le taux de génération à trois dimensions, s'écrit sous la forme [27] :

$$G(r,z) = I_0(1-R)\frac{\alpha}{2\pi\sigma^2} exp(-\alpha z) exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \quad \text{(II.5)}$$

Avec $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ est la distance par rapport au centre de faisceau.

II.4 Mécanismes de recombinaison

Les principaux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge libres dans les semiconducteurs sont soit les mécanismes de recombinaison via les centres profonds (ou recombinaison Shockley-Read-Hall, SRH) introduits par les défauts cristallins (ponctuels, linéaires, 2D et 3D) et les atomes impuretés (en insertion ou en substitution), soit les recombinaisons radiatives ou bande à bande, soit les recombinaisons Auger (figure II.5).

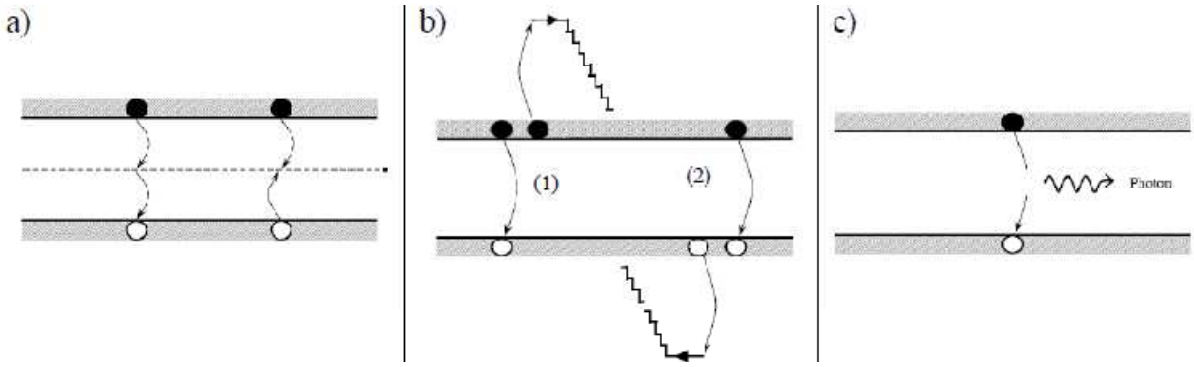


Figure II.5 : a) Recombinaison SRH ; b) Recombinaison Auger, l'excès d'énergie peut être transféré à un électron (1) ou à un trou (2) ; c) Recombinaison radiative.

II.4.1 Recombinaisons en volume

II.4.1.1 Recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH) [28]

Actuellement, la théorie de SRH est universellement reconnue pour la description des processus de recombinaison de porteurs excédentaires via les niveaux énergétiques dans la bande interdite du semiconducteur.

La présence inévitable des impuretés et imperfections cristallines dans les semiconducteurs cause l'apparition d'états électroniques permis dans le gap. Ces défauts peuvent jouer le rôle de pièges à électrons (ou à trous) qui piègent momentanément les électrons (les trous) avant de les renvoyer vers la bande de conduction (la bande de valence) ce qui influence la conductivité du semiconducteur (figure II.5.a). Ils peuvent aussi jouer le rôle de centres de recombinaisons des pairs électron-trou par la capture d'un électron de la

bande de conduction et d'un trou de la bande de valence et provoquant ensuite la recombinaison des deux. Les recombinaisons multiphonons en volume via les défauts ou recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH) s'effectuent par un mécanisme à deux étapes : par la relaxation d'un électron libre de la bande de conduction vers le niveau de défaut puis vers la bande de valence où il s'annule avec un trou (ou la relaxation de l'électron et du trou vers le défaut suivie par la recombinaison des deux). Le taux de ces recombinaisons SRH par unité de volume via un centre de concentration N_t localisé au niveau E_t dans le gap avec une section de capture des électrons σ_p et des trous σ_n est donné par :

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n V_{th}(pn - {n_i}^2)N_t}{\sigma_n\left[n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT}\right)\right] + \sigma_p\left[p + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT}\right)\right]} \quad \text{(II.6)}$$

Où V_{th} est la vitesse thermique des porteurs :

$$V_{th} = \sqrt{\frac{3KT}{m}} \quad \text{(II.7)}$$

A l'équilibre thermodynamique, le taux de recombinaison égale à zéro ($np=n_i^2$), l'expression (II.6) s'implémente sous la forme suivante :

$$R_{SRH}^{volume} = \frac{np - n_{ie}^2}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)} \quad \text{(II.8)}$$

Avec : $n_{ie}^2 = n_i^2 e^{\frac{\Delta E_C + \Delta E_V}{KT}}$ carré de la concentration intrinsèque où ΔE_c et ΔE_v représentent les rétrécissements aux bords du gap causés par le dopage (band gap narrowing) et n_i la concentration intrinsèque sans effet de rétrécissement du gap ;

n_0 et p_0 sont les concentrations de porteurs à l'équilibre. On a la relation suivante : $n_0 p_0 = n_i^2$.

n et p sont les concentrations de porteurs hors équilibre : $n = n_0 + \Delta n$ et $p = p_0 + \Delta n$.

Les quantités statistiques n_1 et p_1 sont définies par :

$n_1 = n_{ie} e^{\frac{E_t - E_{Fi}}{KT}}$ et $p_1 = n_{ie} e^{-\frac{E_t - E_{Fi}}{KT}}$.

E_F est le niveau de Fermi et E_{Fi} le niveau intrinsèque de Fermi localisé proche du mi-gap.

τ_{p0} et τ_{n0} sont, respectivement, les durées de vie fondamentales des trous et des électrons reliées aux vitesses d'agitation thermiques des porteurs de charges v_{th}, à la concentration en centres de recombinaison et à leur section efficace de capture. Elles sont définies par :

$\tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p V_{th} N_t}$ et $\tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n V_{th} N_t}$.

La durée de vie SRH peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\tau_{SRH} = \frac{\Delta n}{R_{SRH}} = \frac{\tau_{n0}(p_0+p_1+\Delta n)+\tau_{p0}(n_0+n_1+\Delta n)}{n_0+p_0+\Delta n} \quad \text{(II.9)}$$

II.4.1.2 Recombinaisons Auger

La prise en considération de ce type de recombinaison est nécessaire aux niveaux de dopage ou niveaux d'injection élevés.

La recombinaison Auger est une recombinaison à trois particules où l'énergie libérée lors d'une recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence est transférée à un autre électron ou autre trou (figure II.5.b).

Le taux de recombinaison Auger est donné par :

$$R_{Auger} = \left(C_n n + C_p p\right)\left(np - n_{ie}^2\right) \approx C_n n^2 p + C_p p^2 n \quad \text{(II.10)}$$

C_n et C_p sont, respectivement, les coefficients Auger pour les électrons et les trous [28].

La recombinaison Auger commence à être importante dans les semiconducteurs fortement dopés ou pour les fortes injections. Ainsi, la recombinaison Auger et la plus importante source de pertes par recombinaison pour les cellules solaires sous concentration si la puissance de la lumière dépasse 200W/cm^2 [29].

II.4.1.3 Recombinaisons radiatives

Le processus de recombinaison radiative ou interbandes est définit comme l'inverse du processus d'absorption. L'excès d'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme d'un rayonnement optique (figure II.5.c). Ce processus est important pour les matériaux à gap directe comme le GaAs, et faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Si. Le taux de recombinaison est proportionnel, à la fois, au nombre d'électron et au nombre de trous :

$$R_r = \beta_r(pn - n_{ie}^2) \quad \text{(II.11)}$$

Où β_r est le coefficient de recombinaison radiative [28].

II.4.2 Recombinaisons en surface

L'écart à la périodicité cristalline causant l'apparition de liaisons pendantes et l'adsorption d'impuretés aux surfaces limites du semiconducteur font apparaître des niveaux électroniques permis dans la bande interdite causant des recombinaisons de type Shockley-Read-Hall [28].

Par analogie avec les recombinaisons SRH en volume, le taux de recombinaisons SRH en surface, par unité de surface, est donné par :

$$R_{SRH}^{Surface} = \frac{S_n S_p (p_s n_s - n_{ie}^2)}{S_n\left[n_s + n_{ie} e^{\frac{E_{trap}}{KT}}\right] + S_p\left[p_s + n_{ie} e^{-\frac{E_{trap}}{KT}}\right]} \quad \text{(II.12)}$$

E_{trap} : Différence entre le niveau du défaut et le niveau intrinsèque ;

n_s, p_s: Concentrations à la surface des électrons et des trous ;

$S_n=\sigma_n V_{th} N_{ts}$, $S_p=\sigma_p V_{th} N_{ts}$ ($cm.s^{-1}$) : vitesses de recombinaison des électrons et des trous à la surface, respectivement ;

N_{ts} : est la densité des états de surface.

II.5 Défauts dans les semiconducteurs

Un cristal parfait, formé par la répétition périodique d'une maille élémentaire, ne se rencontre jamais dans la pratique. Les cristaux réels ont des structures qui diffèrent de cet arrangement périodique car ils sont le siège de défauts de différentes natures. Ces défauts peuvent être classés en deux grandes catégories, la première est dite défauts ponctuels (sans dimension). La deuxième est dite les défauts étendus qui se divise à plusieurs types, à savoir : Les dislocations (à une dimension), les joints de grains et les mâcles (à deux dimensions), et les précipités (à trois dimensions) [30].

Certaines propriétés des matériaux sont essentiellement liées à la structure du réseau et au type de liaison en jeu ; elles dépendent très peu des défauts. D'autres, en revanche, sont fortement influencées par la nature et la concentration des défauts qu'ils contiennent (comportement sous contrainte, phénomène de diffusion et traitement thermique, conductibilité électrique, etc.) [31].

II.5.1 Différents types des défauts dans les semi-conducteurs [32]

II.5.1.1 Défauts ponctuels

Lorsqu'un défaut existe à l'échelle d'un atome, on parle alors d'un défaut ponctuel, du fait que ce défaut occupe un certain volume. Comme tous les défauts, les défauts ponctuels déforment le réseau et génèrent un champ de contrainte dans le cristal qui englobe un volume largement plus grand que celui du défaut même.

- **Lacunes**

La lacune notée V (pour "Vacancy" en anglais) correspond à un atome manquant dans un réseau cristallin parfait. La formation d'une lacune engendre quatre liaisons pendantes, ces liaisons pendantes peuvent former de nouvelles liaisons avec les atomes voisins, entraînant des déplacements atomiques des proches voisins aussi appelés relaxation du cristal. Les

lacunes peuvent se déplacer sur une longue distance avant de se recombiner avec un auto-interstitiel, ou d'être capturés par une impureté.

➢ Interstitiels

Ce sont des atomes qui s'insèrent dans les espaces vides du réseau cristallin. Si l'atome en insertion est lui-même un atome du réseau cristallin, on parle d'auto-interstitiel. Les défauts interstitiels jouent un grand rôle dans la constitution des alliages.

Substitutions

C'est un atome étranger qui se place à un nœud du réseau cristallin. Ce type de défauts joue également un rôle important dans la constitution des alliages.

II.5.1.2 Défauts étendus

Ils sont Qualifiés de défauts cristallins, sous les quelles se regroupe les différents défauts à différents dimensions :

Dislocations

Dites aussi défauts linéaires, ou à une dimension, c.-à-d. que la largeur des défauts est très petite devant les dimensions du cristal. Ces dislocations créent une distorsion de la maille cristalline. Il en existe trois types de dislocation : coin, vis et mixte. Elles proviennent généralement de la relaxation plastique d'un matériau sous contrainte.

Défauts surfaciques

Appelés aussi défauts à deux dimensions, ils sont caractérisés par la perturbation du voisinage des atomes de surface, qui ont perdu certains de leurs voisins. On distingue :

- les défauts d'empilement (la séquence d'empilement des atomes n'est plus respectée). Ce phénomène peut se produire sur un ou deux plans atomiques […ABCABCABABCABC…] ou sur des zones plus étendues avec une structure symétrique […ABCABCACBACBA…]. Ils sont aussi appelés macles ;
- les joints de grain (frontière entre deux cristaux possédant des orientations différentes). Ce type de défaut est très peu probable dans les couches déposées par épitaxie.

Défauts volumiques

Nommés aussi défauts à trois dimensions, qui sont définit comme étant l'emplacement d'une partie du cristal par un volume d'un composé différent. Ce composé "étranger" peut être soit un précipité soit une inclusion.

Les schémas expliquant ces différents défauts sont rassemblés dans la figure ci-dessous.

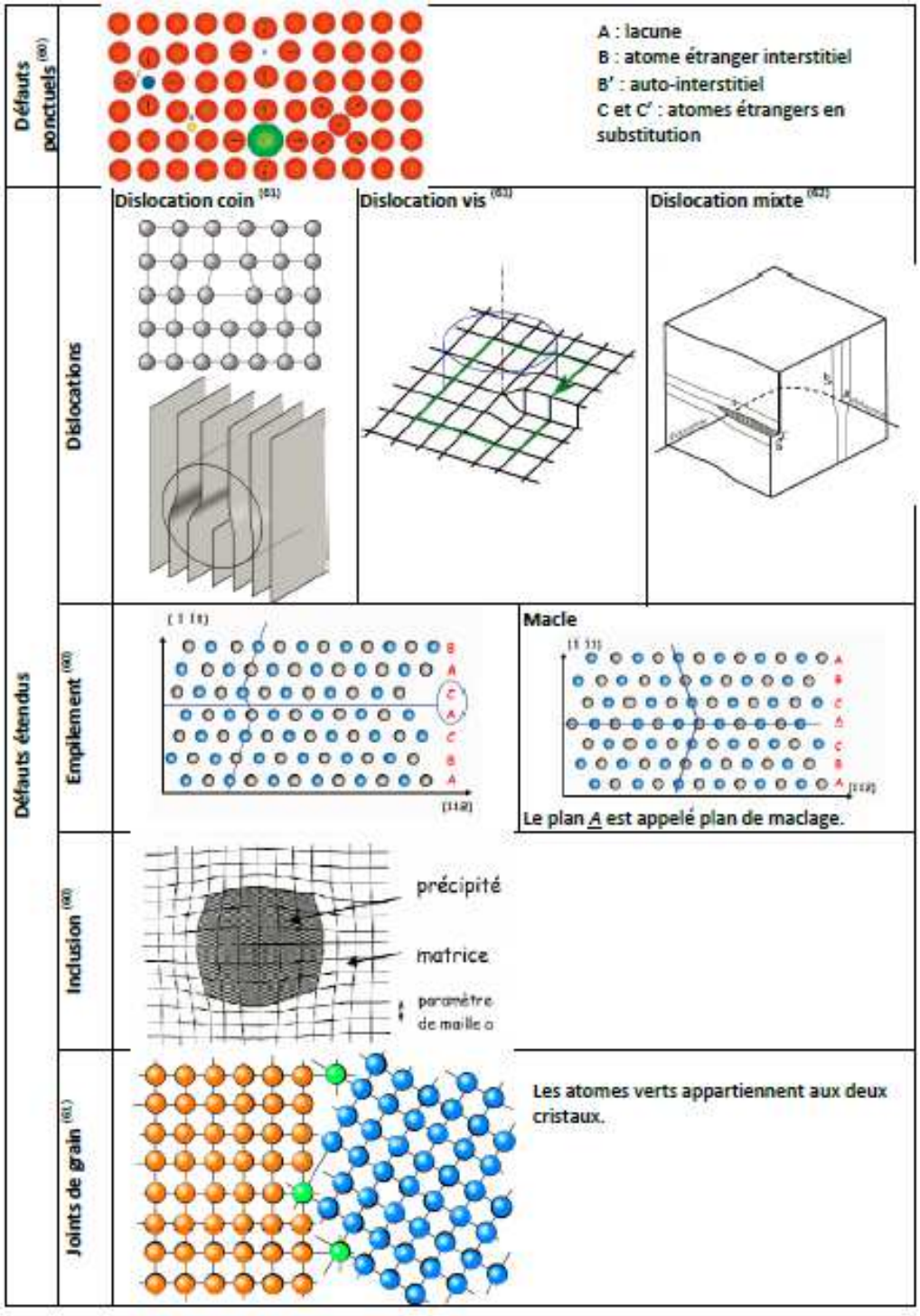


Figure II.6 : Différents défauts (ponctuels et étendus) présents dans un réseau cristallin [32].

II.5.2 Etats de charge des défauts et énergie de formation

Les défauts ponctuels peuvent exister sous plusieurs états de charge électriques. En général les auto-interstitiels peuvent avoir trois états de charge stables de (-1, 0, +1), et que les lacunes existent sous la forme de quatre états de charge (-2, -1, 0, +2). Chaque espèce chargée résulte d'une réaction du type équation :

$$X^j + e^j \longleftrightarrow X^{i+j} \qquad \text{(II.13)}$$

Où X représente un défaut ponctuel dans son état de charge j, *e* est soit un électron (i = -1) ou un trou (i = +1).

Chaque état de charge d'un défaut donné doit avoir un coefficient d'énergie d'activation qui est fonction de la position du niveau de fermi.

L'énergie d'activation d'un défaut est définit comme étant la barrière énergétique que doit franchir le défaut au cours de son déplacement, où le défaut saute d'un site stable à un autre avec une fréquence donné.

II.5.3 Défauts dans l'InGaAs

L'étude des propriétés électroniques de l'arséniure de galium et d'indium montre qu'il existe des niveaux d'énergie situés dans la bande interdite correspondent à des états électroniques localisés, et leur effet sur les propriétés électroniques peut être néfaste. Ces niveaux localisés ont pour origine des défauts intrinsèques. Dans ce qui suit, nous présenterons l'état de connaissance actuel sur les défauts intrinsèques. Une description quantitative des défauts est nécessaire pour une analyse thermodynamique afin de pouvoir orienter les techniques servant à améliorer les performances des dispositifs à base de GaAs. Parmi les défauts importants existant dans le GaAs ; l'EL2 est le plus dominant. Cependant, les autres défauts ordonnant les propriétés de GaAs restent contestables [33].

- **Défauts EL2 :**

EL2 est le défaut le plus caractérisé dans le GaAs avec des propriétés bien définies [34]. EL2 est un double donneur, où le premier niveau donneur est proche du milieu de la bande interdite, E_C - 0.75 eV, et le deuxième niveau donneur est situé à ~0.3eV au-dessous de cela, à E_V +0.54 eV [35]. Selon les chercheurs, EL2 est, pour les uns, un antisite d'arsenic associé à un interstitiel et pour les autres un antisite d'Arsenic associé à une lacune d'arsenic [36].

II.5.3.1 Antisite d'Arsenic "As_{Ga}"

Anciennement, les recherches ont démontré qu'un antisite d'Arsenic neutre exhibe une métastabilité conforme à EL2 [34]. L'antisite d'Arsenic est un défaut donneur multiple avec trois états de charge du neutre à (+2). Ces états ont des niveaux profond, la transition (0/+) est au milieu de la bande interdite ; à environ 0.75 eV, et la transition (+/+2) est au-dessous de (0/+) par 0,24 eV. Les niveaux donneurs de As_{Ga} se situent au-dessus du maximum de la bande de valence [33].

L'antisite neutre $As_{Ga}(0)$ a un état fondamental symétrique, et une configuration métastable As_{Ga}^{*} ; là où l'atome central As est excité puis décalé d'un vecteur [111] où un site métastable a lieu. L'énergie de formation de l'antisite $As_{Ga}(0)$ est illustrée sur la figure (II.7.d), en montrant les niveaux d'$As_{Ga}(0)$, qui est à +1,5 eV et $As_{Ga}^{*}(0)$ qui est au-dessus du $As_{Ga}(0)$ par 0,43 eV, c.-à-d. à +1,93 eV. La barrière séparant l'état stable du métastable est de 0,18 eV.

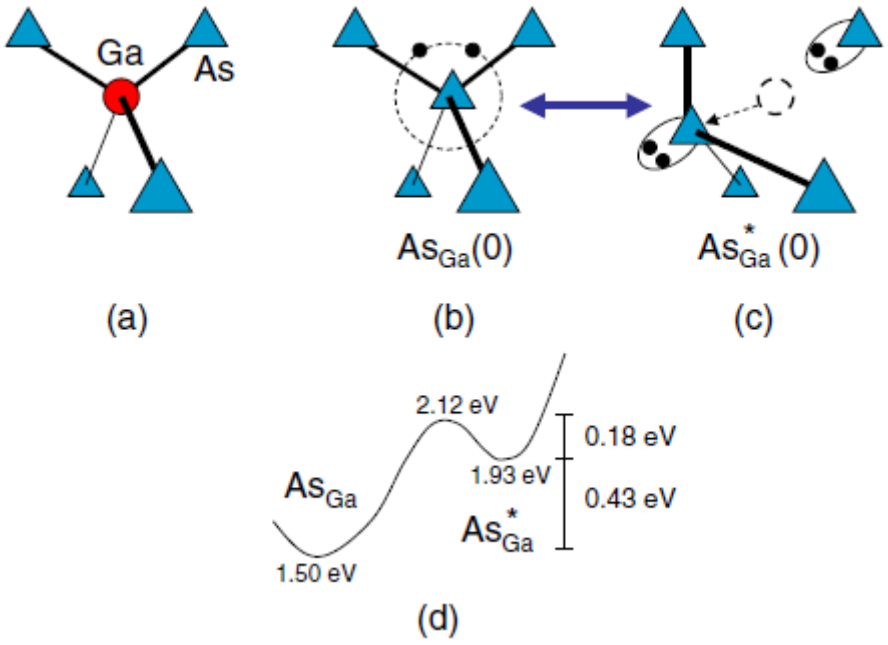


Figure II.7 : La configuration stable et métastable de l'antisite d'Arsenic As_{Ga} [33].

Transitions	[33]	[35]	[37]
(0/+)	$E_V+E_g/2$	E_C-0,75	$E_V+E_g/2$
(+/++)	$E_V+(E_g/2-0.24)$	$E_V+0.54$	$E_V+(E_g/2-0.04)$

Tableau II.1 : Niveaux électroniques associés à 1'antisite d'arsenic.

II.5.3.2 Antisite de galium "Ga_{As}"

L'atome de galium dans l'antiste de galium a deux électrons de valence moins que l'arsenic qu'il remplace. Pour cela, on constate que le Ga_{As} est un double accepteur. Tous les calculs faits montrent deux niveaux d'accepteur. Il y'a un ajustement entre les niveaux de As_{Ga} et celui de Ga_{As}. Le Ga_{As} (-2/-1) à E_C-0.77 eV est à moins de 0.05 eV de l'As_{Ga} et le Ga_{As} (-1/0) est à moins de 0.1 eV que le As_{Ga} (+1/+2).

Les niveaux de Ga_{As} peuvent être confondus avec ceux de l'$As_{Ga.}$ Dans ce cas, le Ga_{As} est un accepteur et le As_{Ga} est un donneur.

II.5.3.3 Vacance de galium "V_{Ga}"

Le déplacement d'un atome de galium de son emplacement a comme conséquence la création d'une lacune de galium "V_{Ga}". Les atomes adjacents d'arsenic vont se diriger vers l'emplacement évacué. Ce défaut se comporte comme un accepteur multiple, avec les états de charge s'étendant de (-3) à (+3). Quoique la détermination expérimentale des niveaux électronique des transitions soit compliquée, il a été démontré qu'ils se situent dans la moitié inférieure de la bande interdite [38].

Transitions	[33]	[38]
(0/-1)	E_V + 0.48	E_V+0.2
(-1/-2)	E_V + 0.64	E_V+0.7
(-2/-3)	E_V+0.8 (±0.01)	E_V+0.9

Tableau II.2: Niveaux électroniques associés à la lacune de galium.

La lacune V_{Ga} est souvent accompagnée par un antisite et une lacune d'arsenic, d'où l'écriture de la réaction [39] :

$$V_{Ga} \rightleftharpoons As_{Ga} + V_{As} \qquad \text{(II.14)}$$

Sur la figure (II.8) est représentée la structure de V_{Ga} à l'état de charge (-3) et le défaut complexe (As_{Ga} + V_{As}) accompagnant à l'état de charge (+3), ainsi que les énergies de formation de chacun des deux. On constate que V_{Ga} est stable dans les états négatifs contrairement au (As_{Ga} + V_{As}) qui est stable dans les états positifs [39].

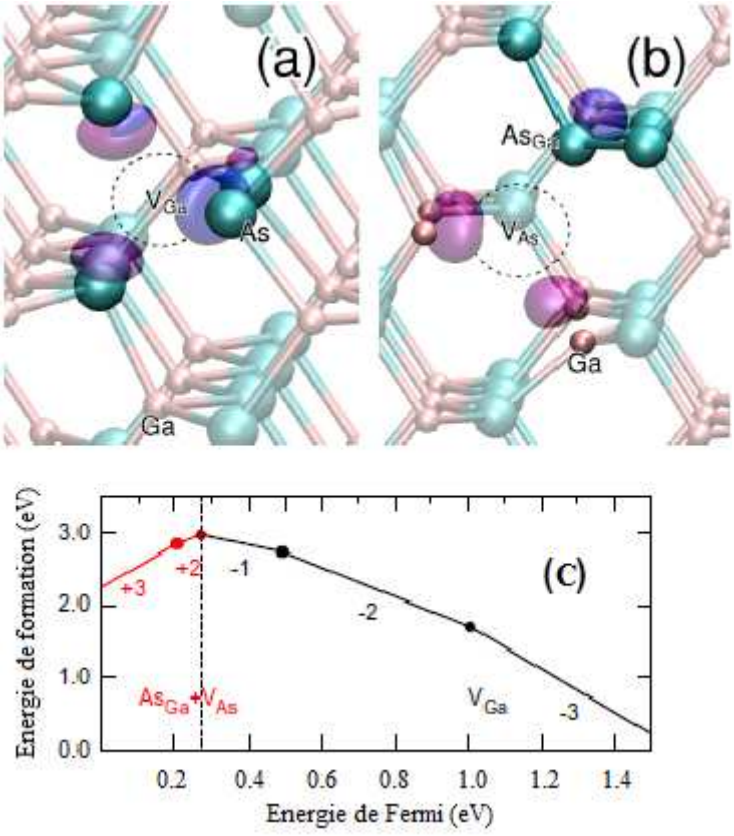


Figure II.8 : **(a)** Structure du V_{Ga} à l'état (-3) ; **(b)** de (As_{Ga} + V_{As}) à l'état (+3) ; **(c)** les énergies de formation [39].

II.5.3.4 Vacance d'arsenic "V_{As}"

Ce défaut est un donneur. Comme le V_{Ga} , V_{As} peut avoir les états de charge allant de (-3) à (+3) [33]. Ainsi il est accompagné par un défaut complexe (Ga_{As} +V_{Ga}) selon la réaction [39] :

$$V_{As} \rightleftharpoons Ga_{As} + V_{Ga} \qquad \text{(II.15)}$$

Les niveaux électroniques des transitions se trouvent à proximité de la bande de conduction. Par exemple les transitions (+1/0) et (0/-1) se trouvent à 0.8 et 1.0 eV, respectivement. L'énergie de formation de (Ga_{As} +V_{Ga}) et V_{As} et la structure de chacun des deux sont illustrées sur la figure (II.9).

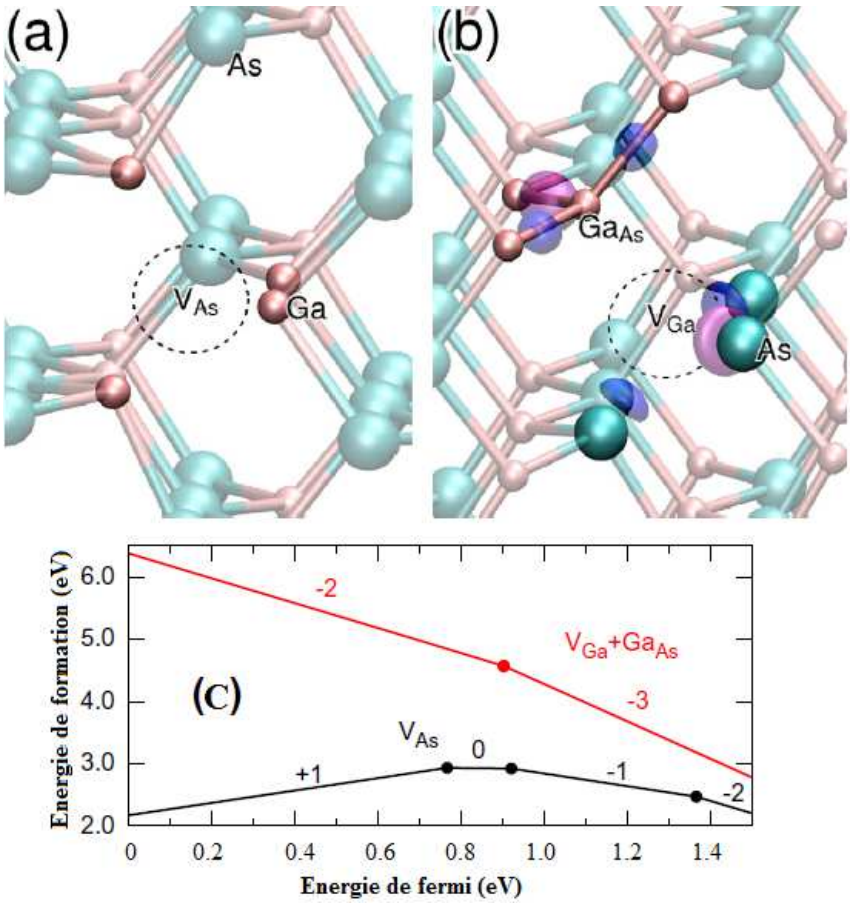


Figure II.9: **(a)** Structure du V_{As} à l'état (-3) ; **(b)** de (Ga_{As} + V_{Ga}) à l'état (+3) ; **(c)** les énergies de formation [39].

L'énergie de formation de V_{Ga} est inférieure que celle de (Ga_{As}+V_{Ga}) pour toutes les énergies de Fermi.

II.5.3.5 Interstitiel de galium "Ga_i"

L'interstitiel de galium dans le GaAs n'a jamais pu être observé directement. La diffusion des interstitiels de Ga dans le GaAs a été sondé en utilisant des expériences de la diffusion du Zinc [33]. Ce défaut se comporte comme un donneur lorsqu'il se situe en site interstitiel tétraédrique entouré de 4 atomes de gallium (figure (II.9(b)). Le Ga_i ne peut se présenter que sous un seul état de charge : Ga_i (+1). S'il est entouré de 4 atomes d'arsenic (figure (II.9(a)), trois états de charge lui sont accessibles (+1), (+2), (+3). Les niveaux électroniques associés aux transitions sont situés à Ev+0.15 eV pour (+3/+2) et Ev+0.5 eV pour (+2/+1) [36].

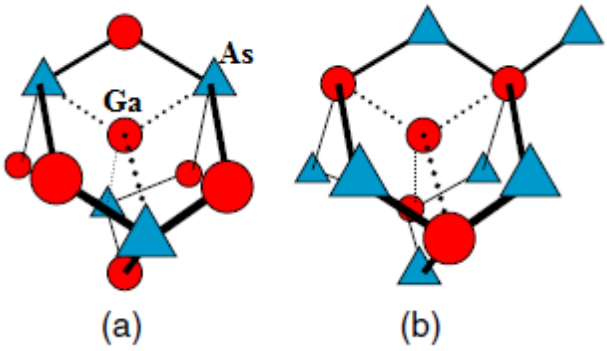


Figure II.10 : Structure du Ga_i : (a) entouré de 4 atomes d'As ; (b) entouré de 4 atomes de Ga [33].

II.5.3.6 Interstitiel d'arsenic "As_i"

Comme l'interstitiel de gallium, l'interstitiel d'arsenic (As_i) est un donneur multiple. Suivant la nature des atomes qui l'entourent et la position du niveau de Fermi, As_i peut présenter quatre états de charge à partir du neutre à (+3). Chaque changement de l'état mène à une structure différente. Les niveaux électroniques associés à As_i sont situés à Ev+0,81 eV pour (+3/+2) et à Ev+1,12 eV pour (+2/+1) lorsque As_i est entouré de quatre atomes d'arsenic (figure II.10.(a)), et à Ev+0,61 eV pour (+3/+2), à Ev+1,06 eV pour (+2/+1) et à Ev+1,32 eV pour (+1/0) lorsque l'interstitiel d'arsenic (As_i) est entouré de quatre atomes de gallium (figure II.10.(b)) [36].

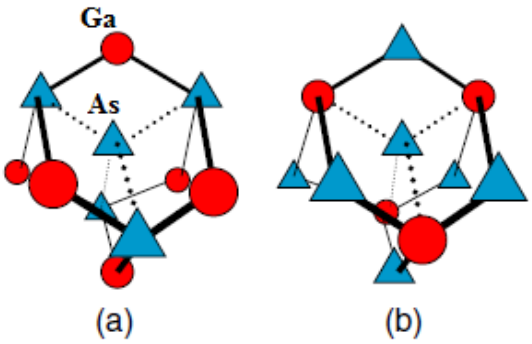


Figure II.11: Structure du As_i : (a) entouré de 4 atomes de As ; (b) entouré de 4 atomes de Ga [33].

II.5.3.7 Défaut complexe (V_{Ga}+As_{Ga})

Les défauts complexes n'ont pas été largement étudiés. On décrit le composé comprenant les deux défauts ayant les plus basses énergies de formation le V_{Ga} et l'As_{Ga}. Ce défaut montre une bistabilité qui est semblable a celle du V_{Ga}, ce qui résulte en un défaut de plus (As_{Ga}) sur les deux côtés de la relation (II.12), et on obtient :

$$V_{Ga} + As_{Ga} \rightleftharpoons 2As_{Ga} + V_{As} \qquad \text{(II.16)}$$

Les états de charge que le défaut peut avoir s'étendent de (-2) à (+3). La figure (II.12) représente la structure des deux défauts complexe, où (II.12.a) correspond à la structure du (V_{Ga}+ As_{Ga}) dans l'état de charge (-2), et (II.12.b) est celle de ($2As_{Ga}$ + V_{As}) à l'état (+2), ainsi que les énergies de formation correspondantes à chacun d'eux.

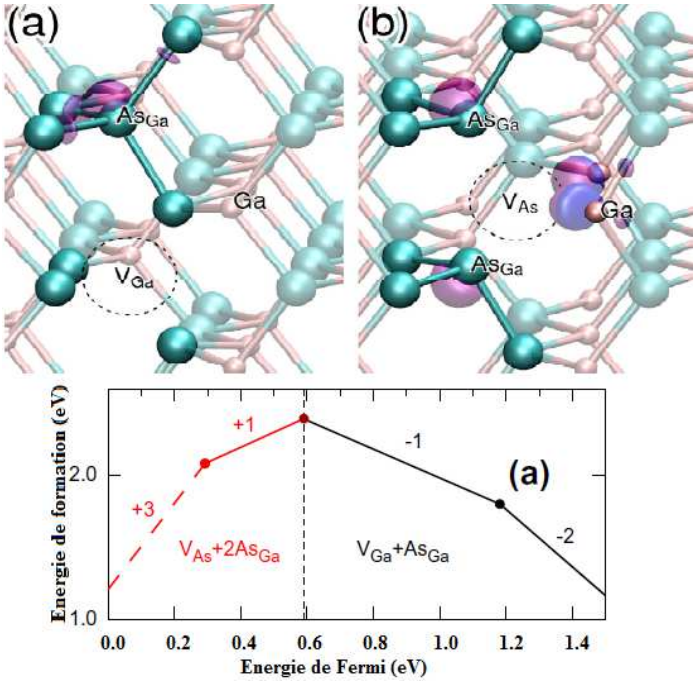


Figure II.12 : **(a)** Structure du (V_{Ga}+ As_{Ga}); **(b)** de ($2As_{Ga}$ + V_{As}) ; **(c)** les énergies de formation [39].

II.5.4 Défauts dans le Ge

Le défaut le plus souvent rencontré dans le germanium est la vacance V_{Ge}. Le V_{Ge} est un défaut à basse énergie. Les états de charge qui lui correspondent étendant de (-2) à (+2). Les niveaux associés aux différentes transitions possibles se situent au-dessus de la bande de valence, où (+2/-1), (+1/0), (0/-1), (-1/-2) se trouvent à : 0.14, 0.15, 0.16 et 0.38 eV respectivement.

La figure ci-après représente l'énergie de formation en fonction du niveau de Fermi ainsi que les différents niveaux de transition (q/q') [40].

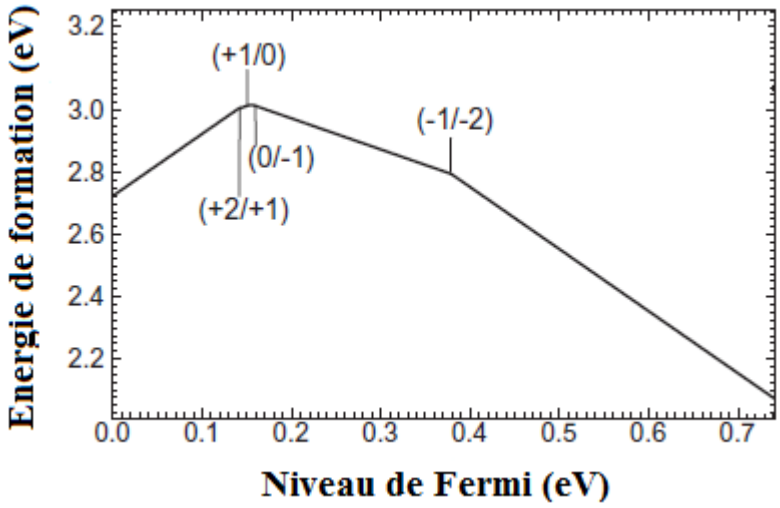


Figure II.13 : Energie de formation de V_{Ge} en fonction de niveau de Fermi.

II.5.5 Défauts dans l'InGaP

L'InGaP est devenu le matériau le plus dominant pour les sous-cellules supérieures des CSTJ. Les défauts induits par la radiation et l'effet de déplacement des porteurs sont les investigations importantes pour évaluer l'utilisation de la cellule solaire pour des applications spatiales [41].

L'$In_{0.}5Ga_{0.5}P$ a été caractérisé par la DLTS (spectroscopie de transitoire de capacité) afin de détecter les niveaux des défauts existant. Le défaut majeur détecté est celui nommé HP1 qui est situé à 0.9±0.05 eV au dessus de la bande de valence.

II.6 Méthodes de Mesure des Défauts

II.6.1 La spectroscopie de transitoire de capacité DLTS

La spectroscopie de transitoire de capacité DLTS "Deep Level Transient Spectroscopy" permet d'étudier l'évolution de la vitesse d'émission des électrons e_n d'un centre profond en fonction de la température, l'étude de $e_n = f(T)$ nous permet de calculer la section efficace de capture σ_n et l'énergie d'activation ΔE du centre profond.

La spectroscopie DLTS est basée sur Les transitoires de capacité, liée aux niveaux profonds. Plusieurs versions de la méthode originale ont été ensuite développées [43].

Le principe de la méthode DLTS consiste dans l'analyse de l'émission et de la capture des pièges associés aux variations de la capacité d'une jonction p-n ou d'une diode Schottky. Cela est réalisé par un remplissage et vidage répétitif des pièges, à l'aide des tensions de polarisation positives et/ou négatives appliquées à l'échantillon. Une illustration de ce

phénomène est faite dans la figure II. 14 pour le cas d'une diode Schottky et d'un piège à électron.

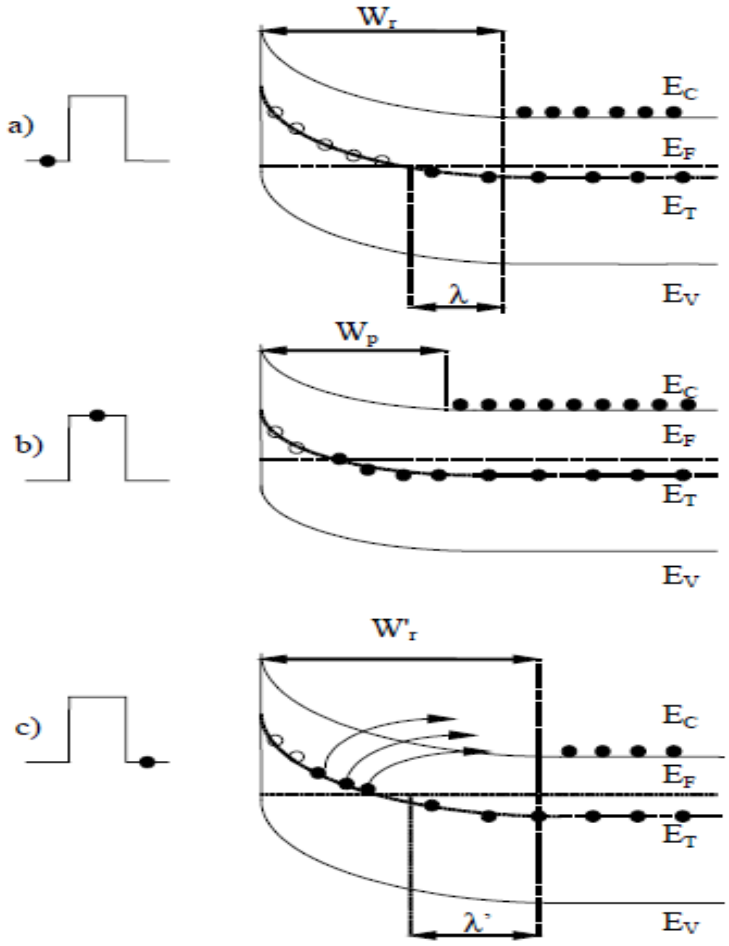


Figure II. 14: Diode Schottky (a) polarisée en inverse Vr,
(b) pendant le pulse Vp, (c) après le pulse Vr.

Sous polarisation inverse, les pièges qui se trouvent dans la zone de charge d'espace (ZCE) au dessus du niveau de Fermi sont vides. La courbure des bandes varie selon la tension appliquée, donc l'état de charge d'un piège va dépendre de la polarisation et la capacité de la ZCE sera affectée. Pendant le pulse de remplissage la ZCE diminue et les pièges qui se trouvent en dessous du niveau Fermi peuvent se remplir. En revenant sous polarisation inverse, les pièges émettent les électrons capturés avec une constante de temps caractéristique, d'où l'apparition d'un transitoire sur l'étendue de la ZCE et donc, de la capacité de la diode.

Cette capacité peut s'écrire:

$$C = \frac{\varepsilon S}{W} \Rightarrow \frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta W}{W} \qquad \text{(II.17)}$$

Où ε est la permittivité diélectrique du matériau, S est la surface de l'échantillon et w l'extension de la zone de charge d'espace. Si on considère un matériau dopé n dans lequel on a des défauts profonds de type donneur en concentration N_T supposée uniforme, w peut s'écrire [44]:

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon}{q(N_d+N_T^+)}\left(V_{bi} - V_r - \frac{kT}{q}\right)\right.} \quad \text{(II.18)}$$

Où N_d est le dopage, N_T^+ concentration des défauts profonds ionisés, V_{bi} le potentiel intrinsèque et V_r la tension appliquée. Après le pulse de remplissage, V_p, N_T^+ est plus faible qu'à V_r donc w est plus grand. La variation temporelle de la concentration des pièges ionisés N_{T+} a une forme exponentielle, donc la capacité va suivre la même évolution:

$$\Delta C(t) \cong C_0 \frac{N_T}{2N_d}\left(1 - exp(-e_n t)\right) \quad \text{(II.19)}$$

Le transitoire de capacité obtenue a une amplitude proportionnelle à N_T (la concentration du défaut) et est exponentiel avec pour constant de temps en ($1/e_n$). Donc, à partir de l'amplitude du transitoire, sous certaines conditions ($N_T << N_d$) on peut déduire la concentration des pièges (pour $t=\infty$). Pour déterminer les autres paramètres du piège (ΔE et σn) il faut trouver une méthode simple qui permet de mesurer le taux d'émission en en fonction de la température. A partir de plusieurs couples (e_n_max, Tmax) on peut tracer un diagramme d'Arrhenius T^2/e_n= f (1000/T) ; la pente de la droite nous permet d'extraire ΔE et l'intersection à l'origine nous donne σ_n.

L'énergie d'activation ΔE déterminée par la méthode mentionnée ci-dessus suppose qu'il n'y a pas d'effets d'émission assistés par le champ électrique. En pratique les mesures sont effectuées sur des diodes Schottky ou sur des jonctions p-n et les tensions appliquées peuvent perturber les émissions thermiques. Cet effet, connu sous le nom de "effet Poole-Frenkel" diminue l'énergie d'activation, et les vitesses d'émission en augmentent [45].

II.6.2. La Photoluminescence

La photoluminescence (PL) est probablement la technique de spectroscopie la plus utilisée pour caractériser les propriétés optiques des semiconducteurs, notamment à bande interdite directe. Elle permet de mesurer les recombinaisons radiatives au sein d'un matériau, quand celui-ci est excité par des photons [46].

1. Principe

La photoluminescence est la réponse radiative d'un semiconducteur excité par un flux de photons. Si les photons ont une énergie supérieure à celle de la bande interdite du semiconducteur, il y a création de paires électron-trou excédentaires qui, lors de leurs recombinaisons, sont susceptibles de générer à leur tour des photons. Le mécanisme de photoluminescence peut être décrit par trois processus :

- Absorption des photons incidents dans le matériaux et génération de porteurs excédentaires ;
- Diffusion des porteurs excédentaires ;
- Recombinaison des porteurs avec émission de photons et de phonons. Emission du signal de PL par la surface du semiconducteur. Sous une excitation locale avec des photons ayant une énergie supérieure à celle du gap du matériau considéré, l'intensité du flux photonique absorbé décroît exponentiellement avec la distance parcourue.

$$I_{PL} = e^{-\alpha z} \qquad \text{(II.20)}$$

Où α est le coefficient d'absorption et z la distance par rapport à la surface éclairée. On définit aussi la profondeur d'absorption comme étant la distance moyenne z=1/α parcourue par les photons incidents dans le matériau avant absorption. L'absorption de photons induit des transitions électroniques entre la bande de valence et la bande de conduction conduisant à la génération de porteurs excédentaires.

2. Dispositif

Une expérience de photoluminescence comprend généralement une source de photons (par exemple un laser He-Ne), un cryostat à température variable, une chaîne d'analyse et de détection des photons émis constituée essentiellement d'un monochromateur et d'un photodétecteur (figure II.15).

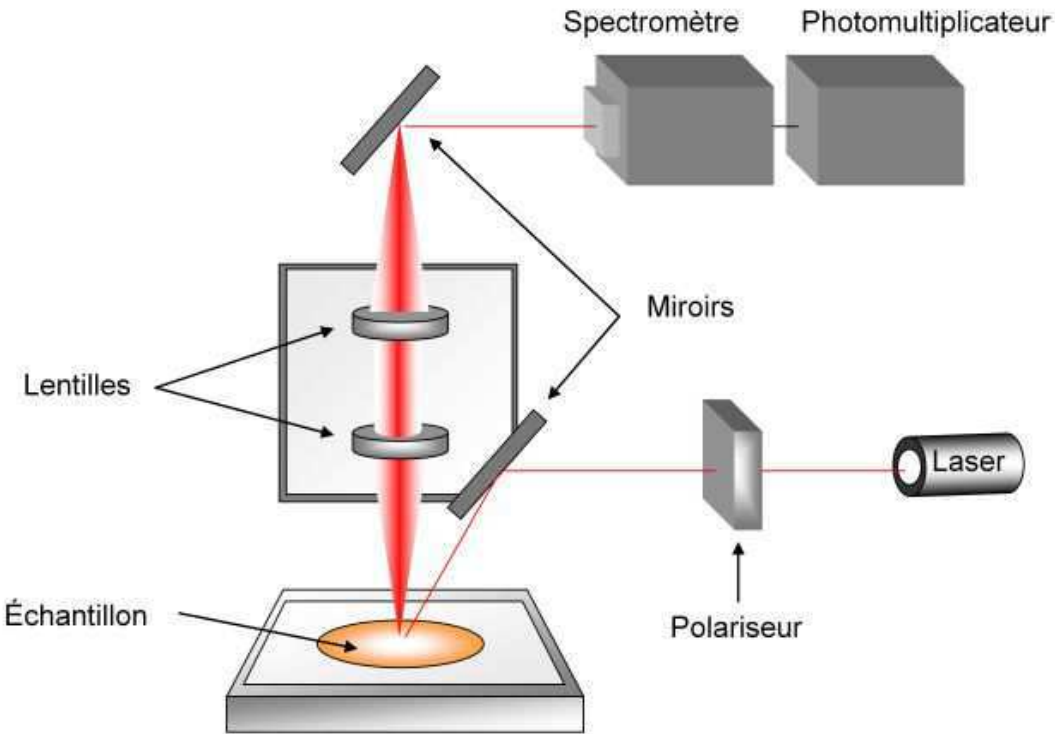


Figure II.15 : Schéma présentant le principe de mesure de photoluminescence.

II.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons rappelé quelques propriétés des semiconducteurs III.V, ainsi que les phénomènes essentiels dont le fonctionnement de la cellule solaire fait appel qui sont la génération et la recombinaison. De plus, et vu que le rendement de la cellule solaire est affecté par la présence des défauts, une étude détaillée sur les défauts des différents matériaux constituants notre cellule est faite, et on a décrit les méthodes de mesure des défauts.

Chapitre III

Cellule solaire triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge

III.1 Introduction

Actuellement, les cellules multijonctions connaissent un intérêt croissant dans le développement des systèmes photovoltaïques en raison de leurs multiples avantages. Les jonctions PN utilisées dans la plupart des cellules photovoltaïques ne permettent la conversion que des photons dont l'énergie est supérieure ou égale au gap du matériau absorbeur de cette jonction. La résolution de cet inconvénient est assurée par l'utilisation des systèmes à plusieurs niveaux, tout en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, ceci permet d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité.

III.2 Les Cellules solaires multijonctions

III.2.1 Aperçu sur les Cellules solaires multijonctions

Comme son nom l'indique, la cellule solaire triple jonction est une combinaison de trois simples jonctions montées en série. Ces cellules ; qui sont à base de matériaux semiconducteurs (III-V) ; ont été mise au point depuis les années 60 [46], le premier dispositif de la multijonction a été exploiter au début de 1980, il a convertie 16% de l'énergie solaire en électricité, et en 1994, US National Renewable Energy Laboratory (NREL) a atteint un record de 30% [47] et actuellement, elles présentent du rendement très élevé environ de 42.3% [48]. Cependant, ces cellules restent peu connues face à leur coût de fabrication qui est très élevé, mais comme leur domaine de prédilection est le domaine spatial, le marché est moins sensible au coût qu'à la performance.

Le fameux avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multijonctions actuellement avoisine les 30% pour un spectre AM0. Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres. Ils se frottent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités.
Les progrès dans le domaine de l'énergie photovoltaïque se font à travers plusieurs technologies et sont incessants depuis 1970 (Figure III.1). Il est à noter que les rendements de conversion présentés dans ce paragraphe constituent les records certifiés.

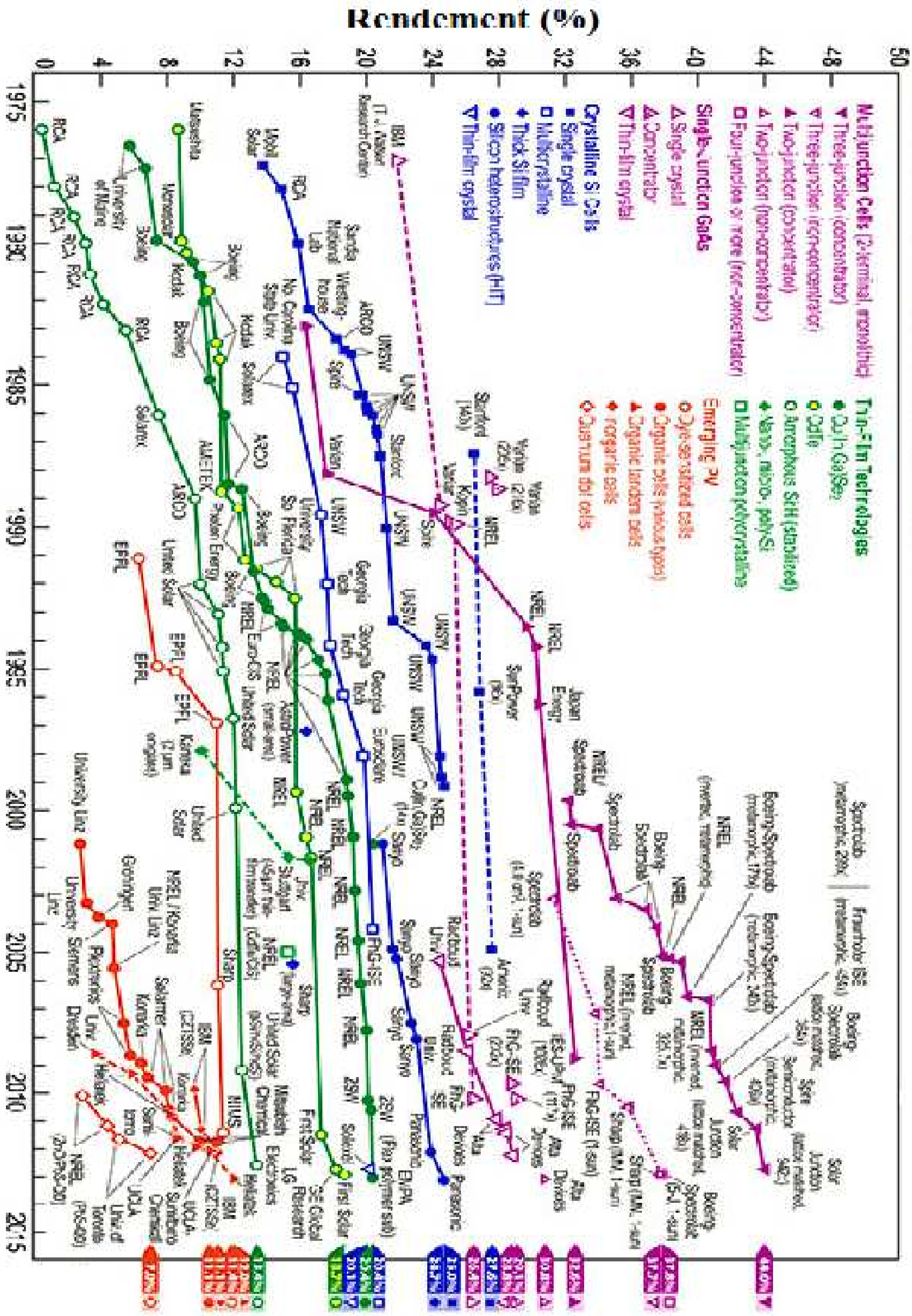


Figure III.1 : Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie [49].

D'après la figure (III.1), l'amélioration des différentes filières des cellules photovoltaïques augmente le rendement pour la filière de silicium (Silicium polycristallin, Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe) de 13% jusqu' a 17% depuis les années 1983 à 2003. Pour la filière des cellules organiques, un rendement de 5% jusqu'à 11.3% depuis les années 1992 à 2007. Pour la filière des cellules en couche minces, un rendement de 8% jusqu'à 16% depuis les années 1977 à 2003. Par contre pour la technologie des cellules multijonctions qui a été la plus performante parmi les autres technologies, une augmentation de 16% jusqu'à 40% depuis les années 1982 à 2007.

III.2.2 Utilité des cellules multijonctions

Le développement des cellules solaires multijonctions a été initié afin d'obtenir des rendements plus élevés non seulement dans l'état initial, mais, plus en particulier dans l'état stabilisé. Ceci est obtenu par la réduction des deux principales causes de perte résultantes de la non absorption des photons d'énergie $h\nu < E_g$ et les pertes thermique associées à la thermalisation des photoporteurs chauds créés par les photons d'énergie $h\nu > E_g$.

Dans cette approche, l'empilement de plusieurs simples jonctions ayant différents gap assure l'absorption efficace de différente partie du spectre solaire. En plus, l'utilisation des semiconducteurs (III-V), ainsi que leurs alliages, est plus adéquate pour certaines raisons à savoir : leur gap direct et sa valeur qui est proche de la valeur optimum. Ainsi, ils sont mieux résistif au rayonnement cosmique et aux températures de fonctionnement en orbites (~50°C).

III.2.3 Structure et principe de base des Cellules solaires multijonctions

III.2.3.1 Structure

Le concept des cellules solaire multijonction est simple, plusieurs cellules avec différents gaps sont empilées l'une sur l'autre de manière que ces sous-cellules allant en bas à une plus petite bande interdite que la précédente. Deux paramètres majeurs doivent être maitrisés dans ce type de structure. Le premier est la réalisation, entre chacune des jonctions, d'une région conductrice avec contact ohmique de part et d'autre, transparente à la gamme spectrale exploitée par les cellules sous-jacentes. Ces liaisons sont assurées par des diodes Tunnel. Le deuxième paramètre à maitriser est l'accord du photocourant. En effet, vu que les tensions de circuit ouvert V_{CO} s'ajoutent, les courants de court-circuit I_{CC} doivent être ajustés, car le plus faible d'entre eux impose sa valeur au courant résultant. Ainsi les gaps et les épaisseurs des cellules supérieures doivent être ajustés pour que ces dernières n'absorbe ni trop ni moins de rayonnement.

III.2.3.2 Principe de base

Les cellules photovoltaïques à haut rendement utilisent des matériaux avec des bandes interdites qui couvrent tout le spectre solaire. Les cellules solaires multijonctions comprennent des sous-cellules à simple jonction superposées l'une sur l'autre de sorte que le rayonnement incident interagisse avec les cellules de gaps décroissant. Les cellules supérieures, à grands gaps, absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous-jacentes de gap plus petits. Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie [50].

L'expérience des cellules solaires multijonctions a une limitation fondamentale relative à la disponibilité des matériaux possédant des bandes interdites optimales qui permettent simultanément une grande efficacité grâce à sa faible densité des défauts. Les alliages des groupes III-V du tableau périodique sont des bons éléments pour la fabrication de ces cellules. Leurs bandes interdites couvrent une grande partie du spectre solaire, et la majorité a des bandes interdites directe, ce qui implique un coefficient d'absorption élevé, et leurs structures complexes peuvent être déposées avec une très haute qualité cristalline par des techniques de croissance [51].

La figure (III.2) montre l'énergie solaire pouvant être théoriquement utilisée par une cellule triple jonction III-V.

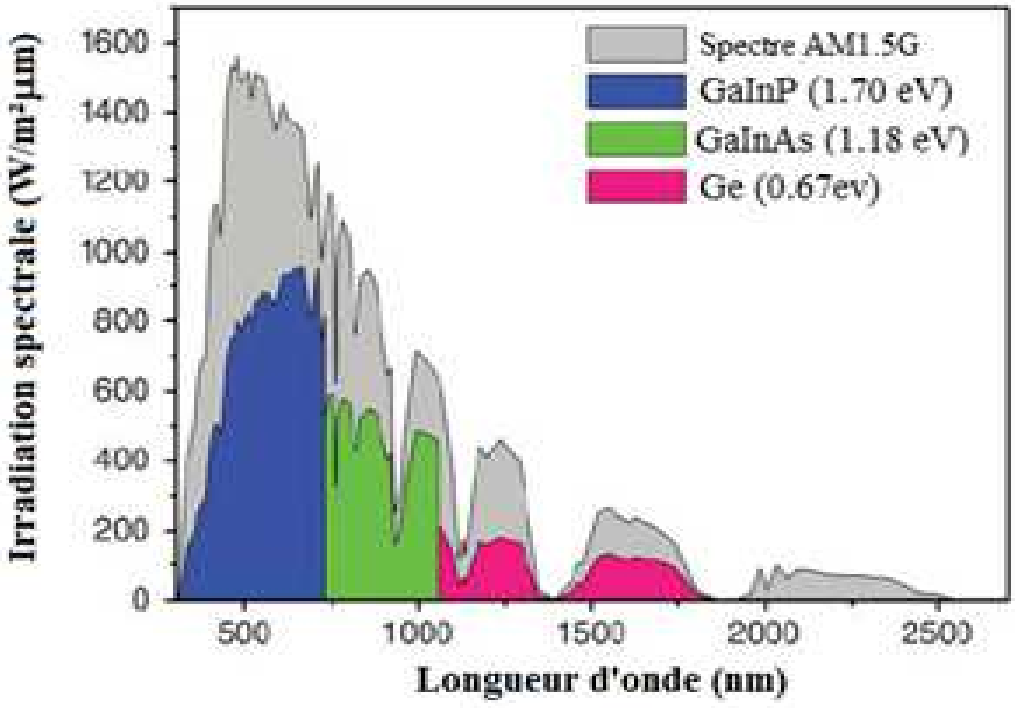


Figure III.2 : Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/InGaAs/Ge.

III.2.4 Choix des matériaux

Le choix des matériaux de chaque sous cellule de la cellule triple jonction dépend de certain paramètre : la largeur de la bande interdite, la constante de réseau et le coefficient d'absorption.

III.2.4.1 Bandes interdites

L'absorption d'une grande partie du spectre solaire est une nécessité afin d'optimiser le meilleur rendement de la cellule solaire. Pour ceci les bandes interdites doivent couvrir une large gamme. En outre, les bandes interdites de couches adjacentes doivent être différer le plus petit possible d'environ 0.3 à 0.4 eV, parce que la quantité d'énergie solaire convertie en chaleur, est égale à la différence entre l'énergie des photons et la bande interdite du matériau absorbant [52].

La dépendance du rendement et le gap du semiconducteur est illustrée sur la figure (III.3). Le GaAs a un gap optimal (1.4eV) pour la conversion de l'énergie solaire, qui est limité à des rendements de moins de 25%.

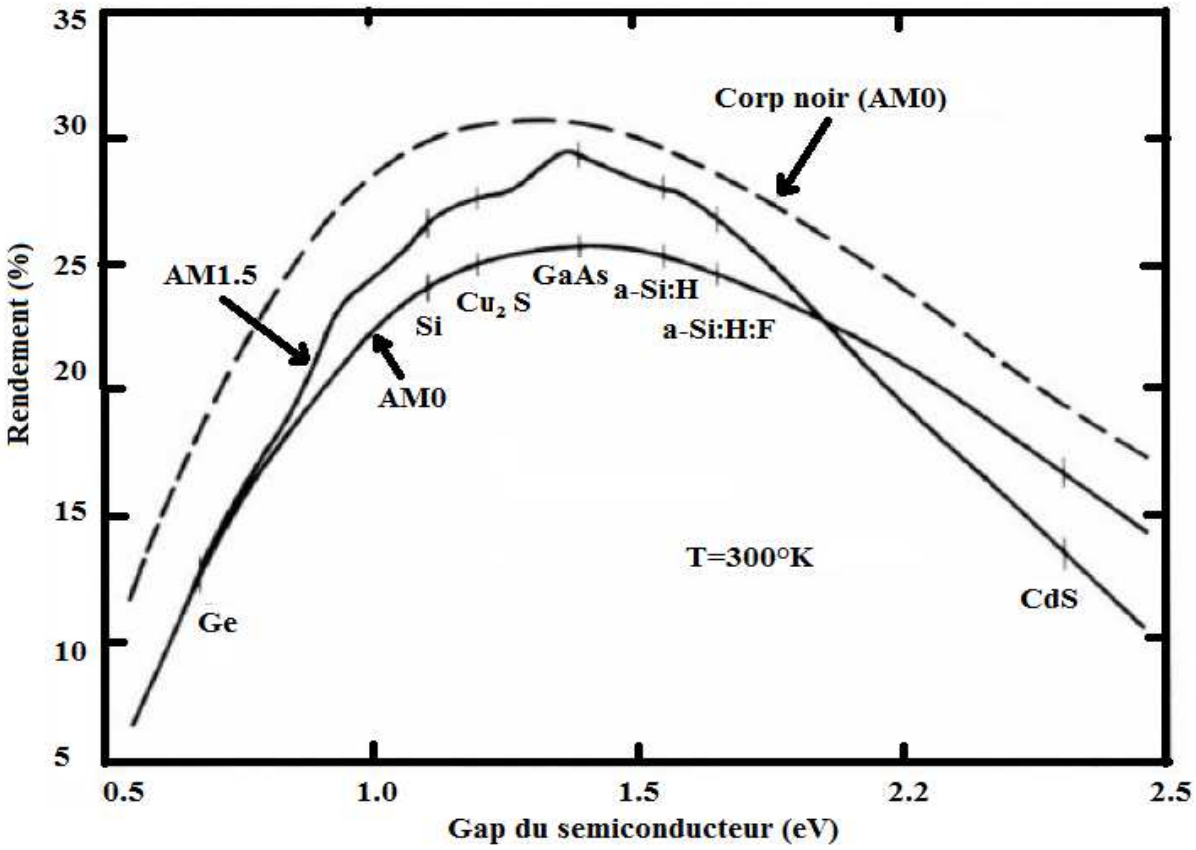


Figure III.3 : La dépendance du rendement et le gap du semiconducteur [53].

Actuellement la production des cellules solaires triple jonction se fait à base de GaInP (1,9 eV), GaAs (1,4 eV), et Ge (0,7 eV). Des concepts avancés des cellules solaires multijonctions sont développés pour prévoir l'utilisation de AlGaInP (2,2 eV), AlGaAs (1,6 eV), GaInP (1,7 eV), GaInAs (1,2 eV) et GaInNAs (1.0-1.1 eV) [53]. Par exemple, le record du Spectrolab qui utilise une cellule Ga0.5In0.5P (ou GaInP2) avec l'énergie de bande interdite de 1,85 eV et la constante de réseau de 5,65°A. Moins de gallium et plus d'indium serait utilisé dans le composé, si un matériau de plus faible largeur de bande interdite était désiré, jusqu'à l'obtention de l'InP avec une énergie de bande interdite de 1,3 eV et la constante de réseau de 5,88 angströms. Cependant, cet ajustement sur les bandes interdites devrait être fait en liaison avec des contraintes de la constante de réseau [50].

III.2.4.2 Constante de réseau

Le concept des cellules solaires triple jonction consiste à déposer des couches des différents semiconducteurs les unes sur les autres sur un même substrat. Toutefois, il faut que les paramètres cristallins doivent être très proches de celui du substrat. L'intérêt pratique de l'utilisation des semiconducteurs (III-V) est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de 1'un des éléments par un autre élément de la même colonne, tous en prenant en considération la constante de réseau qui décrit l'écart entre les sites atomiques de la structure cristalline. Le désaccord des constantes de réseau des différentes couches crée des dislocations dans le réseau ; ce qui dégrade le rendement de la cellule solaire. La figure (III.4) représente les variations de la largeur de bande interdite de 1'alliage en fonction de la constante de réseau, qui varie lui même avec la composition.

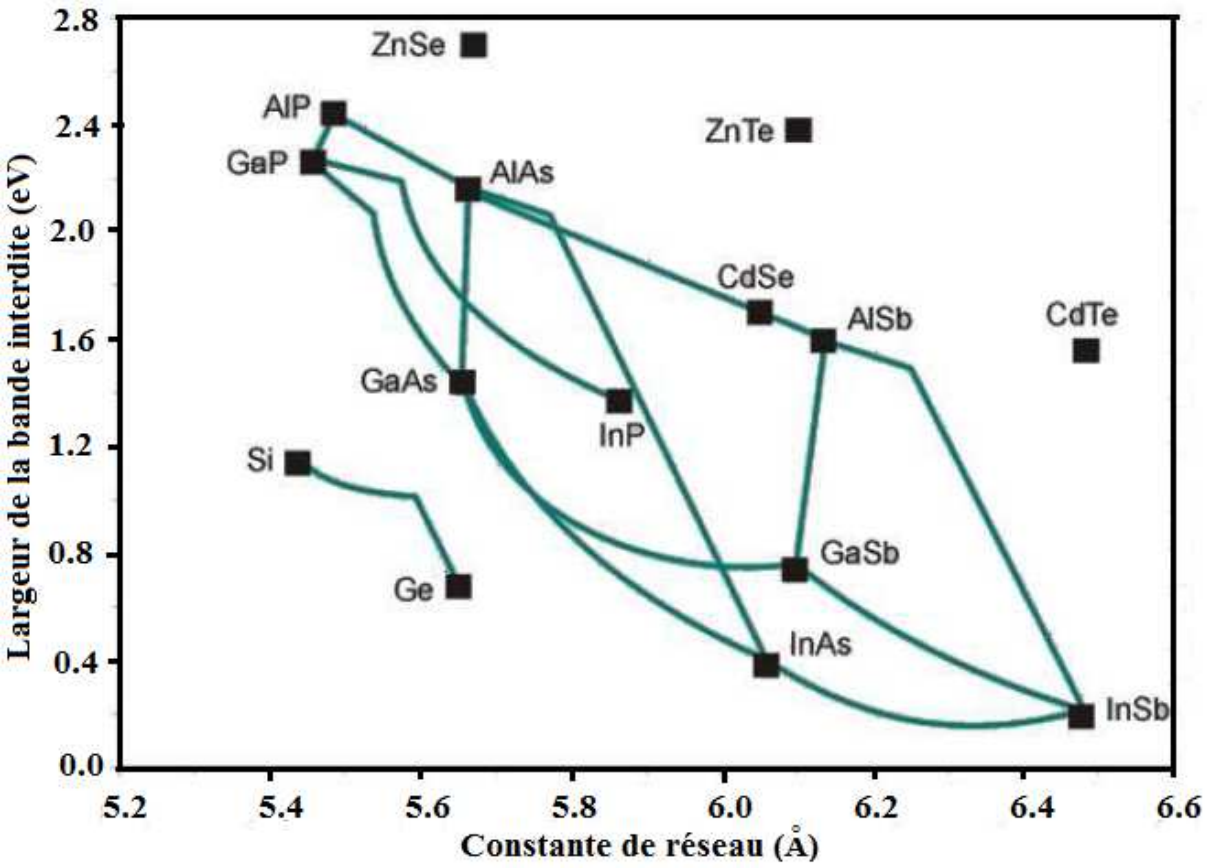


Figure III.4 : La relation entre la constante de réseau et la largeur de la bande interdite pour les alliages III-V [54].

Les lignes entre les différents matériaux semiconducteurs montrent qu'on peut créer des combinants avec des quantités différentes de deux matériaux. Ge, GaAs et AlAs ont approximativement la même constante de réseau avec des bandes interdites différentes, et les compositions de ces matériaux sont actuellement utilisés pour créer des cellules triple jonction donnant de meilleur rendement [54].

III.2.4.3 Le coefficient d'absorption

Comme les CSTJ sont constituées de trois photodiodes en série, le courant total délivré est limité par la photodiode qui produit le courant le plus faible. Il est donc important de concevoir les cellules de sorte que les trois photodiodes délivrent chacune la même valeur de courant. Étant donné que les matériaux constituant les photodiodes n'ont pas les mêmes coefficients d'absorption, il nous faut choisir des épaisseurs adéquates pour chaque cellule selon la loi exponentielle : $I = I_0 e^{-\alpha z}$;

Avec $\alpha(E) = \alpha_0 (\frac{E-E_g}{E_g})^{1/2}$ pour un semiconducteur à bande interdite directe et

$\alpha(E) = \alpha_0 (\frac{E-E_g}{E_g})^{2}$ pour un semiconducteur à bande interdite indirecte.

En effet le photocourant est proportionnel à l'intensité I d'absorption de photons.

Sur la figure (III.5) est représentée les valeurs des coefficients d'absorption de différents semiconducteurs en fonction de l'énergie du photon.

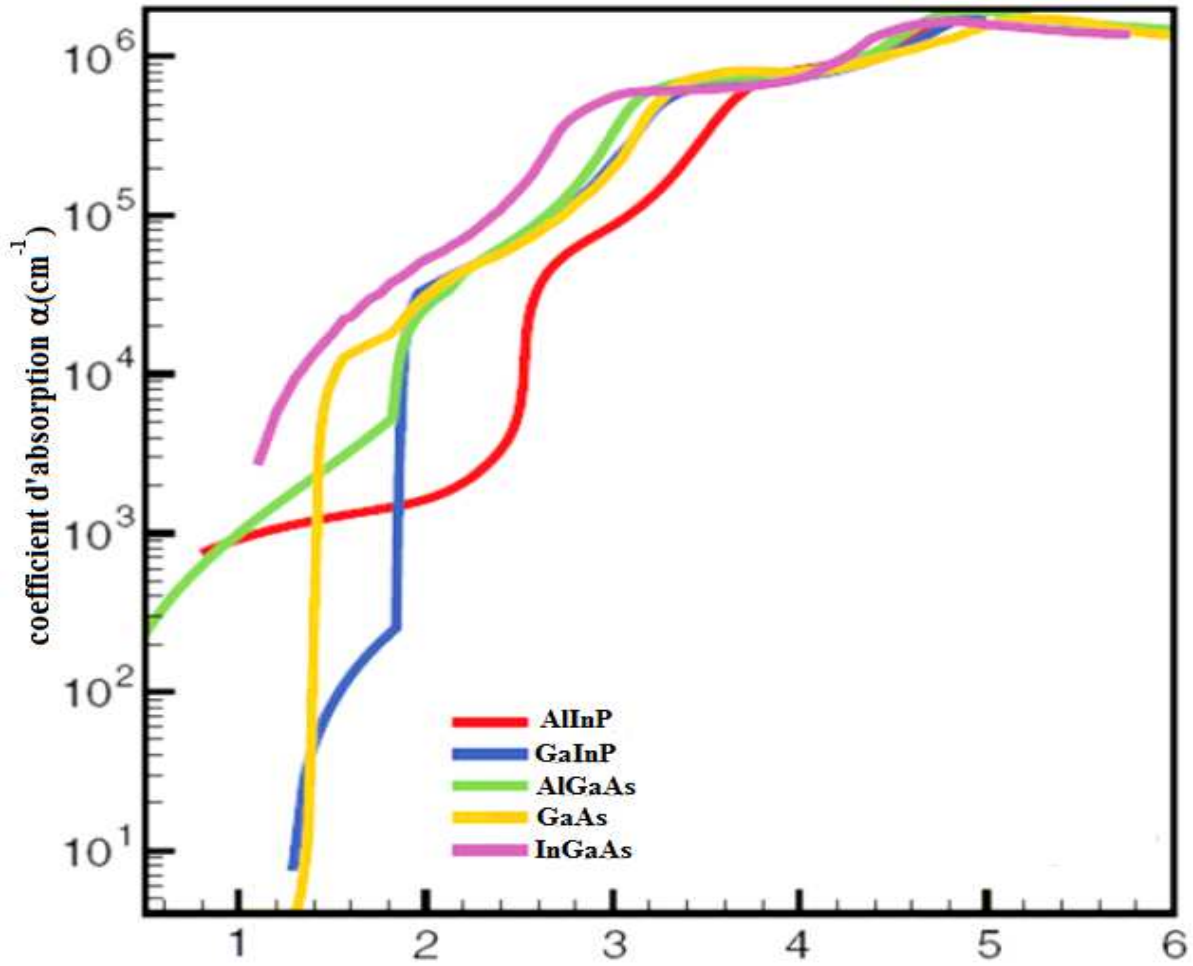


Figure III.5 : Coefficient d'absorption en fonction de l'énergie de photon [55].

Un matériau qui a un faible coefficient d'absorption doit avoir une épaisseur plus grande par rapport à un matériau de plus grand coefficient d'absorption. On tient compte également de la longueur d'onde d'absorption et de l'intensité lumineuse que reçoit chaque photodiode dans le spectre solaire.

Les valeurs favorables dans le tableau ci-dessous justifient le choix des matériaux utilisés pour la fabrication des cellules solaires triple jonction.

Matériaux	E_g (eV)	α (μm^{-1}) (λ=0.8µm)	a(nm)
InGaP	1.86	2	0.5451
InGaAs	1.2	30	0.5868
GaAs	1.4	0.9	0.5653
Ge	0.65	3	0.5657

Tableau III.1 : Les valeurs favorables utilisées pour la fabrication des cellules solaires triple jonction.

III.3 Cellules solaires TJ à base d'InGaP/InGaAs/Ge

III.3.1 Constituants de base d'une CSTJ à base d'InGaP/InGaAs/Ge

Les cellules solaires triples jonction (CSTJ) sont constituées globalement par trois photodiodes semi-conductrices de bandes interdites différentes séparées par des jonctions tunnels. Ces jonctions tunnels permettent le passage du courant entre les matériaux

On distingue deux structures CSTJ (Figure (III.6)) faites d'InGaP pour la cellule du haut, d'InGaAs au milieu et de Ge pour la cellule du bas [56]. La première, nommée "Lattice matched LM" (ou en accord de maille), est épitaxiée avec une divergence de paramètre de maille relativement faible de sorte qu'aucune dislocation ne se crée dans les couches et les porteurs de charge se propagent sans beaucoup d'obstacles (Figure (III.6.a)). La seconde structure, nommée "Lattice mismatched MM" ou "metamorphic", est épitaxiée avec deux premières couches en désaccord de maille par rapport à celui du substrat de germanium (Figure(III.6.b)). Des couches tampons sont alors successivement rajoutées avec des paramètres de maille variant graduellement entre celui du Ge et celui de l'InGaAs. Cette dernière structure a l'avantage de mieux répartir les Eg des trois photodiodes dans le spectre solaire pour une collection plus efficace de photons.

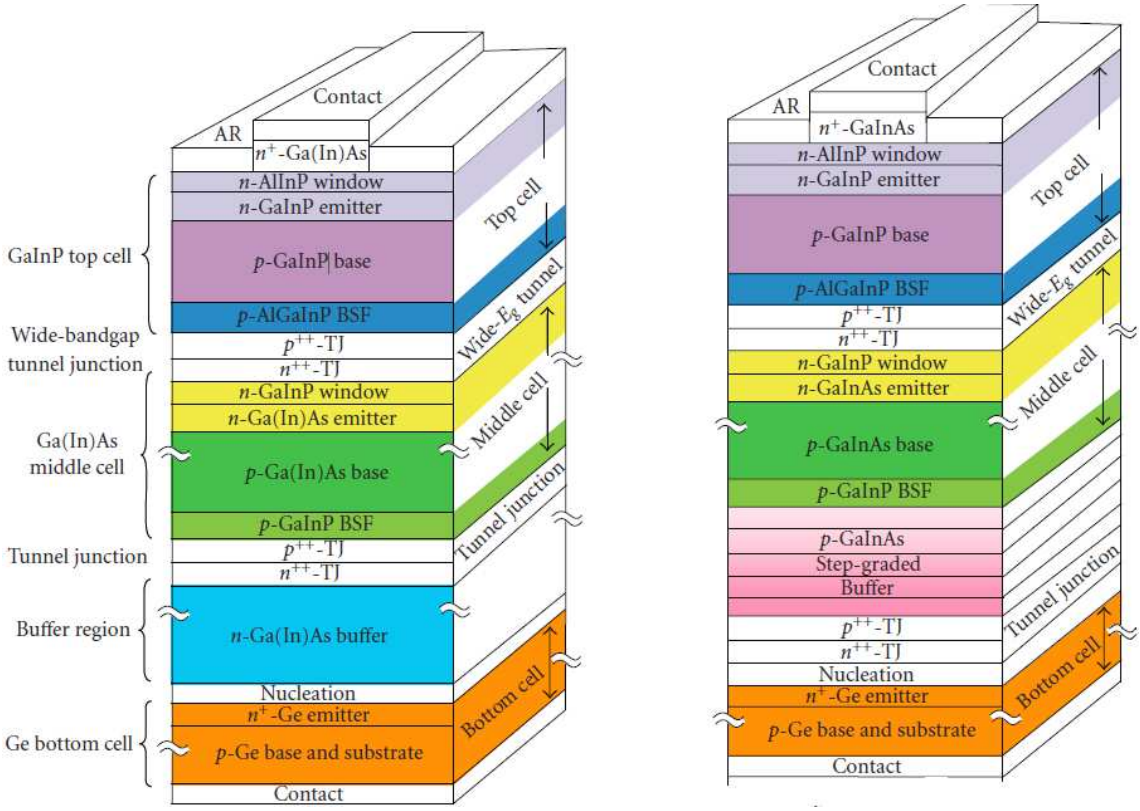


Figure III.6 : Structures cellules solaires triples jonction :
(a) avec accord de paramètre de maille, (b) avec désaccord de paramètre de maille.

Par ailleurs on rajoute à la structure CSTJ d'autres couches spécialisées telles que des couches d'encapsulation dites fenêtres avant et arrière ("window" et "back surface field" (BSF)), des couches tampons, des jonctions tunnels, ainsi que des couches de contact.

III.3.1.1 Jonctions tunnels entre les cellules

Les jonctions tunnels ont pour but de séparer électriquement la zone dopée aux trous et la zone dopée aux électrons de deux diodes adjacentes (Figure (III.7)). Ce sont aussi des diodes mais de sens inverse aux diodes destinées à la production de courant. Leurs épaisseurs sont très faibles de sorte que les électrons peuvent passer par effet tunnel d'une photodiode à une autre. De plus leurs Eg sont suffisamment grands pour laisser passer la lumière vers les photodiodes suivantes. Sans cette jonction, la région P de la cellule supérieure sera connectée avec la région n de la région p de la cellule du milieu, c'est-à-dire une nouvelle jonction opposée aux autres apparaîtra entre ces deux cellules, et par conséquent, le photovoltage sera plus faible que si cette jonction parasite n'existe pas. Par exemple la jonction tunnel entre l'InGaAs et le Ge est faite de GaAs (p-n) et celle entre l'InGaAs et l'InGaP peut être fait d'AlGaAs dopé p et d'InGaP dopé n.

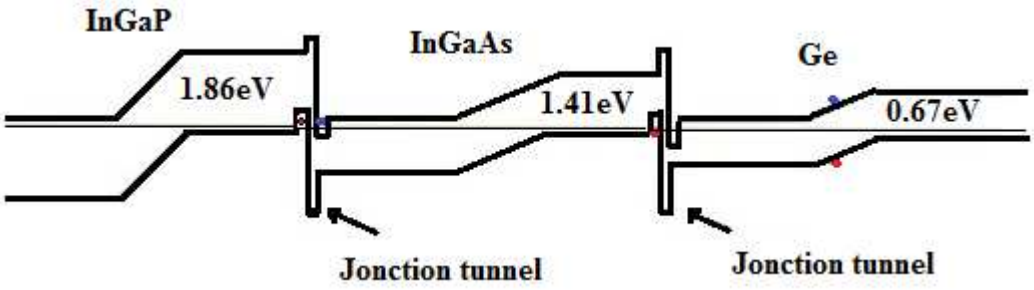


Figure III.7 : Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une CSTJ.

La jonction tunnel, donc, assure la connexion électrique entre les sous-cellules, en faire passant le courant entre eux avec une petite chute de tension et une faible absorption optique. Elle agit comme une résistance ohmique mais de faible valeur pour ne pas affecter le rendement de la cellule solaire [57].

III.3.1.2 Couches "fenêtres"

Les couches "fenêtres" sont des couches d'encapsulation des jonctions p-n. La couche avant est appelée "window" et la couche arrière est appelée "back-surface-field (BSF)". Elles sont faites de matériaux à plus grand Eg que le matériau des photodiodes. Elles sont donc transparentes au rayonnement atteignant ces couches, d'où leur nom. Leur rôle est de limiter le taux de recombinaison des porteurs aux interfaces avant et arrière de la jonction p-n. La (Figure (III.8)) suivante illustre la structure de bandes d'énergie d'une couche fenêtre avant couplée à une homojonction p-n (figure (III.8. a)), et d'une homojonction p-n couplée à une couche fenêtre arrière " BSF" (Figure (III.8.b)). Dans les deux cas on observe une diffusion de charges électrons ou trous à l'interface de l'hétérojonction qui induit un champ électrique. Celui-ci tend à repousser les porteurs de nature différente et a pour effet de limiter leur taux de recombinaison.

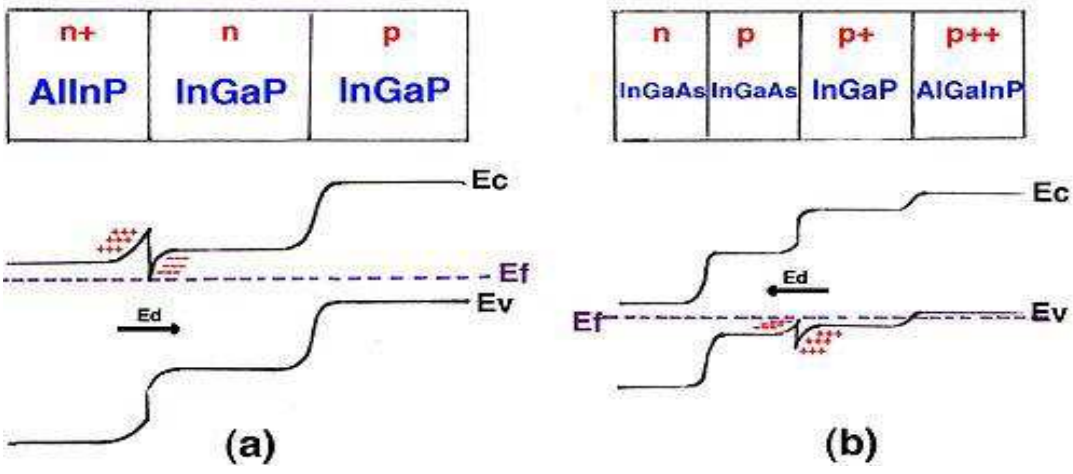


Figure III.8 : Couche fenêtre (a)avant et (b) arrière.

III.3.1.3 Couche tampon

Cette couche sert à limiter la diffusion des défauts du substrat vers les couches épitaxiées. Dans le cas des structures métamorphiques la couche tampon se situe entre le Ge et l'InGaAs. En effet la relaxation des contraintes dues aux matériaux possédant des paramètres de maille différents se fait par introduction de dislocations dans cette couche tampon. Cette couche est alors épitaxiée entre deux matériaux de très bonne qualité cristalline pour accorder leurs paramètres de maille. Il est à noter que les dislocations ont tendance à bouger à plus hautes températures et ceci constitue un désavantage majeur des structures métamorphiques [57].

III.3.1.4 Couche antireflet

Elle permet une meilleure collection de la lumière en diminuant la réflectivité à l'interface air-couche fenêtre de la cellule du haut. Elle est constituée typiquement d'une couche de dioxyde de silicium et d'une couche mince d'oxyde d'indium. Cependant elle fait aussi l'objet de nombreuses recherches. Son choix dépend de la nature de la couche fenêtre de la première diode.

III.3.1.5 Couche de contact et contacts électriques

La couche de contact est faite d'InGaAs fortement dopée. Elle permet d'avoir un bon contact ohmique. Elle est gravée après l'épitaxie, sauf en dessous des contacts électriques, afin de réduire au minimum l'absorption de lumière dans cette couche. Des couches métalliques sont déposées au-dessus de la couche de contact. Elles doivent avoir une bonne adhésion avec la structure CSTJ pour limiter la résistivité à l'interface. De plus, son design doit être fait pour laisser passer assez de lumière et pour recueillir le maximum d'électrons. On utilise pour cette raison une structure constituée de longs et fins rubans métalliques pour les contacts avant des échantillons [57].

III.3.2 Les alliages ternaires

Par alliage, on entend un mélange homogène de deux ou plusieurs matériaux. C'est à la fin des années 50 qu'on a vécu la nouvelle classe de matériaux semiconducteurs la famille III-V (association d'éléments des colonnes III et V de la classification de Mandèliev). L'extension permettait d'envisager des semiconducteurs dont la bande interdite pouvait prendre toutes les valeurs de 0.18 à 2.42 eV.

III.3.2.1 Le phosphure d'indium et de gallium (InGaP)

L'InGaP avec un gap Eg d'environ 1,9eV est le semiconducteur le plus promoteur pour les cellules supérieures des CSTJ pour couvrir la gamme du spectre solaire comprise entre 350 nm et 650 nm. C'est un alliage de deux semiconducteurs binaires. Il est composé de l'indium, du gallium et du phosphore, utilisé pour les hautes puissances et les hautes fréquences en électronique, en raison de la vitesse des électrons qui est supérieure par rapport au Si et au Ge.

La croissance de l'InGaP par épitaxie peut être compliquée en raison de la tendance de celui-ci à croître en tant que matériau commandé, plutôt qu'un alliage vraiment aléatoire qui change sa structure de bande et les propriétés électriques et optiques du matériau.

III.3.2.1.1 Le phosphure d'indium (InP)

L'InP est un semiconducteur binaire constitué de l'indium et du phosphore. Il possède une structure cubique à faces centrées (cfc), de chacun des deux composants imbriquées et décalées d'un vecteur (1/4;1/4;1/4), autrement dit, une maille cfc de l'un des constituants dont quatre des huit sites tétraédriques sont occupés par l'autre constituant. Il possède donc une géométrie tétragonale où chaque ion d'indium est lié à quatre ions phosphore. Les propriétés physiques de l'InP telles que : l'énergie de gap 1.344 eV, la mobilité des électrons 5400 cm2/V.s, la densité 4.81 g/cm3, le point de fusion 1062 °C, la conductivité thermique 0.68 W/cm.K, l'indice de réfraction (de 3.1 à 3.55), nous permettent de l'utiliser en opto-électronique, comme par exemple dans la fabrication des diodes laser. InP est, aussi, utilisé comme substrat pour la croissance par épitaxie de composés optoélectroniques à base d'arséniure d'indium-gallium (InGaAs).

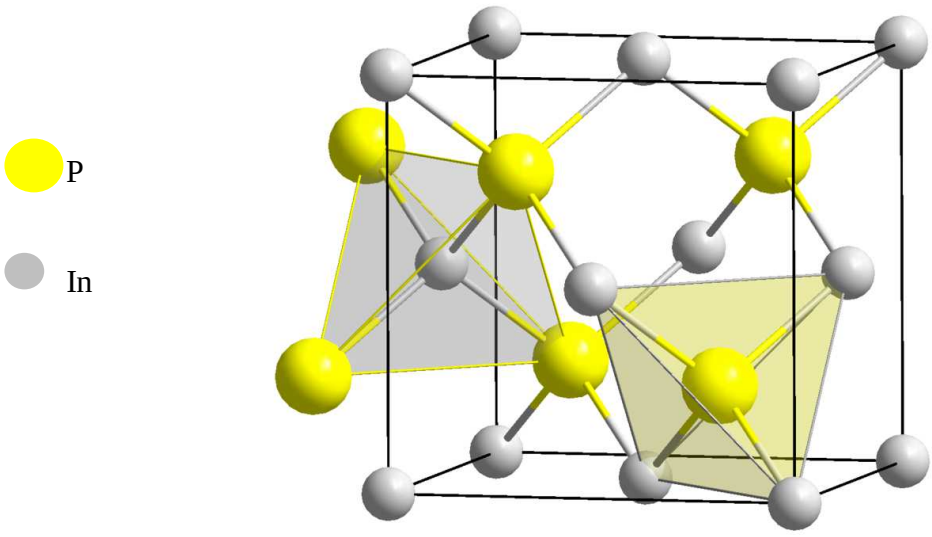


Figure III.9: Structure cristalline de l'InP.

III.3.2.1.2 Le phosphure de gallium (GaP)

Le GaP est un matériau semiconducteur composé du phosphore et de gallium. Il est inodore et insoluble. Les propriétés essentielles de GaP sont en générale : l'énergie de gap 2,26 eV, la masse molaire 100,697 g/mol, le point de fusion 1477 °C, la densité 1,138 g/cm3, la mobilité des électrons 250 cm2/V.s, la conductivité thermique 1,1 W/K.cm et l'indice de réfraction compris entre 3.02 et 3.45.

Le tellure est utilisé comme matériau dopant pour produire du phosphure de gallium de type N et le Zinc comme dopant pour produire du phosphure de gallium de type P.

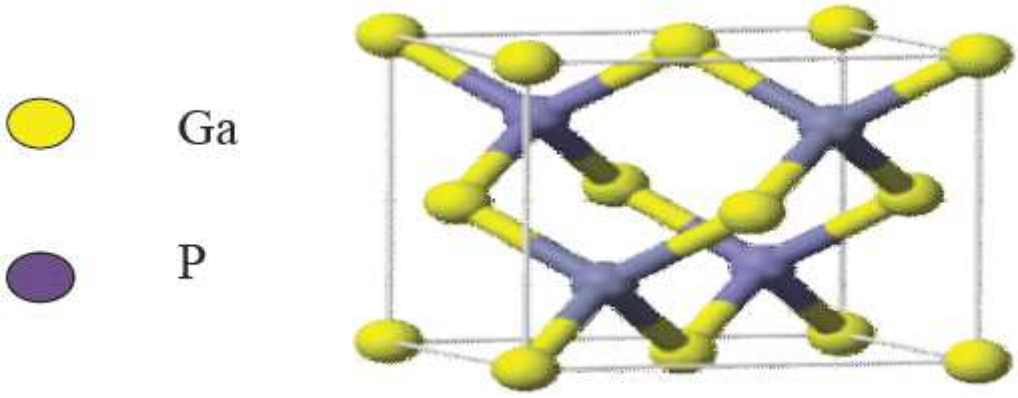


Figure III.10: Structure cristalline de GaP.

III.3.2.2 L'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs)

L'arséniure d'indium et de gallium InGaAs a connu un intérêt croissant dans ces dernières décennies, vu que son gap et son paramètre cristallin peuvent être variés systématiquement par le choix de composition de l'alliage $In_xGa_{1-x}As$, il présente des multiples applications, par exemple l'alliage ternaire $In_{0.47}Ga_{0.53}As$ préparé par épitaxie, a été employé comme couche active dans les lasers et des détecteurs photoélectrique, ainsi, il est utilisé comme détecteur de rayonnement dans les système de télécommunications optique. En outre, c'est un très bon candidat pour les transistors à grande vitesse [58]. Il est couramment, préparé sur des substrats d'InP (phosphor d'indium).

Pour les cellules solaires triple jonction, l'InGaAs est implanté comme sous cellule du milieu pour couvrir la partie du spectre entre 450-900 nm (figure (III.13)).

III.3.2.2.1 Arséniure d'indium (InAs)

L'InAs, est un semi-conducteur binaire. Il a l'apparence d'un cristal cubique, gris, avec un point de fusion de 942 °C, il possède un gap direct. Il possède l'une des plus

importantes mobilités d'électron parmi les semi-conducteurs, et son gap est l'un des plus petits.

L'arséniure d'indium est parfois utilisé en combinaison avec le phosphure d'indium (InP). Les alliages avec l'arséniure de gallium (GaAs) forment un semi-conducteur ternaire, l'arséniure d'indium et de gallium (InGaAs), dont le gap dépend du ratio In/Ga.

Lors du dépôt d'une monocouche d'InAs sur un substrat d'InP ou de GaAs, des tensions se forment à cause de la différence de paramètre de maille, et par conséquent l'arséniure d'indium se réorganise en « nano-îles » formant à la surface d'InP ou de GaAs des boîtes quantique.

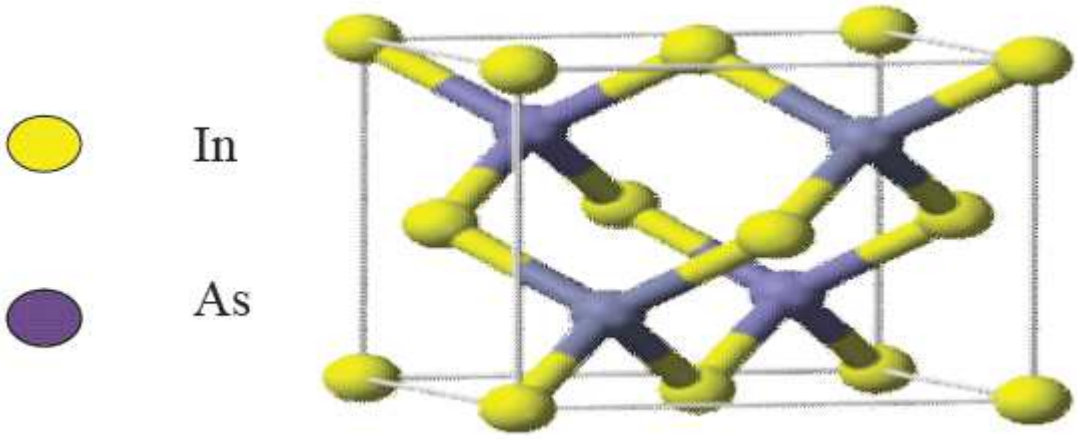


Figure III.11: Structure cristalline d'InAs.

III.3.2.2.2 Arséniure de gallium (GaAs)

l'arséniur de gallium est un semiconducteur utilisé notamment pour réaliser des composants micro-ondes et des composants opto-électroniques, des diodes électroluminescentes dans l'infrarouge ou des cellules photovoltaïques. Il possède une structure cristalline de type blende. Si l'on considère que les atomes de gallium suivent une structure de type cubique à faces centrées (CFC), les atomes d'arsenic occupent quant à eux 4 des 8 sites tétraédriques de cette maille. Ayant les propriétés physiques, telles que : l'énergie de gap 1.424 eV (300K), la grande mobilité des électrons 8500 cm2 /V.s, la conductivité thermique 0.55 W/cm.K, la densité 5.316 g/cm3, le point de fusion 1238 °C et l'indice de réfraction qui est compris entre 3 et 5. Les méthodes pour produire des films de GaAs sont: PVD, CDV, L'Epitaxie par jets moléculaires.

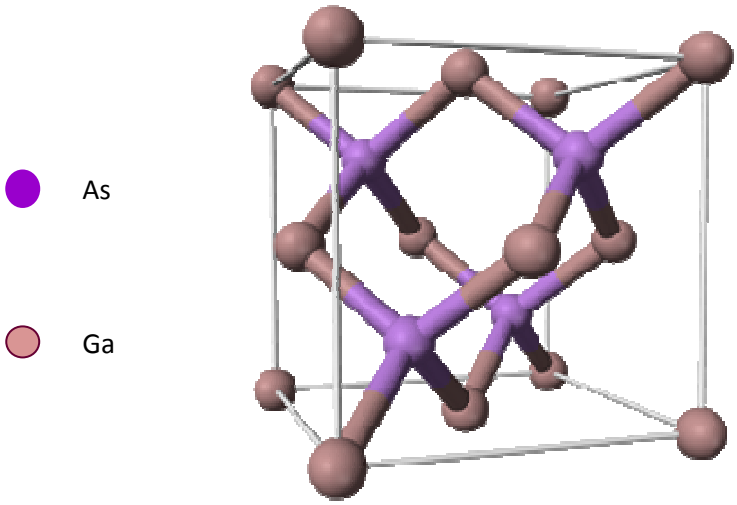


Figure III.12: Structure cristalline de GaAs.

III.3.2.3 Le germanium

Le germanium est un semiconducteur à gap indirect d'environ 0.6eV, de multiples applications en microélectronique. Il est utilisé dans les CSTJ pour former la cellule inferieur (bottom cell). Après avoir absorbé les photons du spectre ayant énergie supérieure à Eg des deux sous-cellules supérieurs (InGaP et InGaAs), la sous-cellule inférieure de germanium reçoit les photons non absorbés, ceux ayant énergie supérieur à 0.6 eV et les absorbe. Ceci permet d'augmenter la tension du circuit ouvert de la cellule entière.

La figure (III.13) illustre la réponse spectrale (le rendement quantique externe) de la cellule solaire triple jonction InGaP/InGaAs/Ge. Comme c'est montré sur la figure la CSTJ peut absorber une grande partie du spectre solaire et la converti en électricité [59].

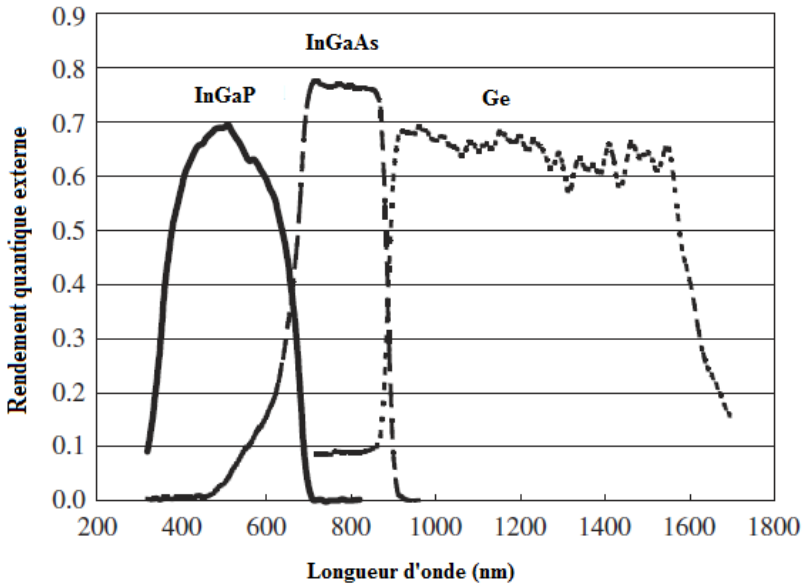


Figure III.13 : Le rendement quantique externe de la cellule solaire InGaP/InGaAs/Ge [59].

III.4 Modélisation électrique de la cellule triple jonction [60]

III.4.1 Model d'une seule diode

Un modèle de circuit équivalent à une seule diode est schématisé sur la figure ci-dessous. L'expression mathématique de I(v) des sous cellules est donnée par :

$$I_L = I_{ph,i} - I_{s,i}\left(exp\frac{q(V_i+R_{s,i}I_L)}{n_iKT}\right) - \frac{V_i+R_{s,i}I_L}{R_{sh,i}} \quad \text{(III.1)}$$

Où : i représente le numéro de la sous cellules (1 : supérieur, 2 : milieu, 3 : inferieur);

I_{ph}, I_s, I_L : sont le photocourant, courant de saturation de la diode et le courant qui circule dans la charge, respectivement ; n le facteur d'idéalité de la diode (typiquement entre 1 et 2) ; q la charge électrique ; V la tension ; K le constant de Boltzmann ; T la température ambiante ; R_s et R_{sh} sont les résistances série et parallèles respectivement.

Et on écrit pour chaque sous cellule :

$$I_L = I_{ph1} - I_{s1}\left(exp\frac{q(V_1+R_{s1}I_L)}{n_1KT}\right) - \frac{V_1+R_{s1}I_L}{R_{sh1}} \quad \text{(III.2)}$$

$$I_L = I_{ph2} - I_{s2}\left(exp\frac{q(V_2+R_{s2}I_L)}{n_2KT}\right) - \frac{V_2+(R_{s2}+R_{T1})I_L}{R_{sh2}} \quad \text{(III.3)}$$

$$I_L = I_{ph3} - I_{s3}\left(exp\frac{q(V_3+R_{s3}I_L)}{n_3KT}\right) - \frac{V_3+(R_{s3}+R_{T2})I_L}{R_{sh3}} \quad \text{(III.4)}$$

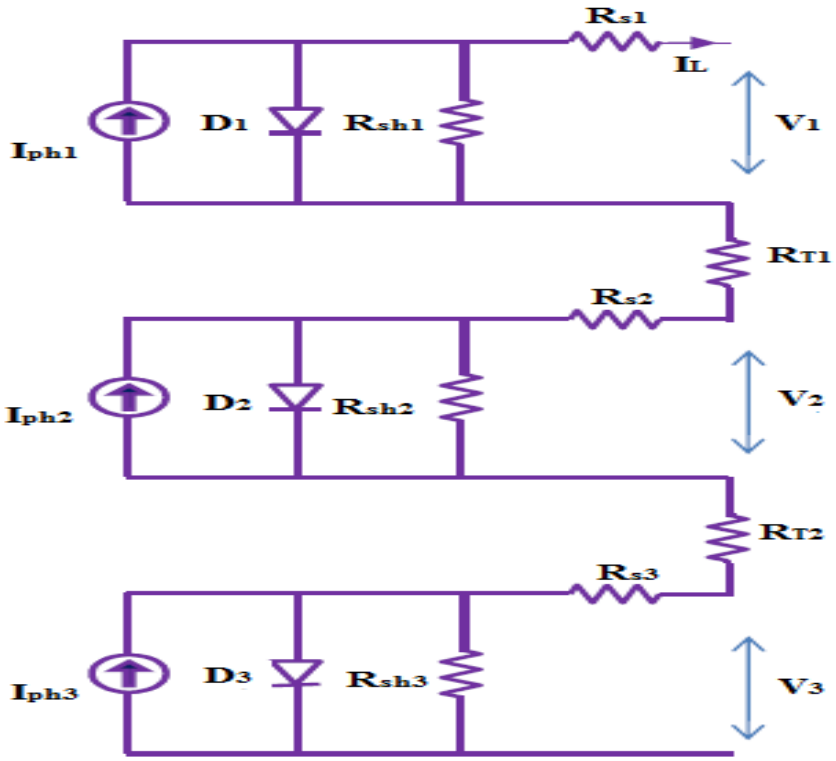


Figure III.14 : Circuit équivalent du model à une seul diode.

La tension aux bornes de la cellule est étant la somme des tensions de chaque cellule.

$$V = \sum_{i=1}^{3} V_i \quad \text{et} \quad V_i = \frac{n_i KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph,i} - I_L}{I_{s,i}} + 1\right) - I_L R_{s,i} \tag{III.5}$$

Donc en écrit pour chaque cellules :

$$V_1 = \frac{n_1 KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph1} - I_L}{I_{s1}} + 1\right) - I_L R_{s1} \tag{III.6}$$

$$V_2 = \frac{n_2 KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph2} - I_L}{I_{s2}} + 1\right) - I_L (R_{s2} + R_{T1}) \tag{III.7}$$

$$V_3 = \frac{n_3 KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph3} - I_L}{I_{s3}} + 1\right) - I_L (R_{s3} + R_{T2}) \tag{III.8}$$

L'expression de la tension devient :

$$V = \frac{KT}{q}\left[n_1 \ln\left(\frac{I_{ph1} - I_L}{I_{s1}} + 1\right) + n_2 \ln\left(\frac{I_{ph2} - I_L}{I_{s2}} + 1\right) + n_3 \ln\left(\frac{I_{ph3} - I_L}{I_{s3}} + 1\right)\right] - I_L R_{sT} \tag{III.9}$$

La tension du circuit ouvert peut être obtenue en posant I_L=0

$$V_{CO} = \frac{KT}{q}\left[n_1 \ln\left(\frac{I_{ph1}}{I_{s1}} + 1\right) + n_2 \ln\left(\frac{I_{ph2}}{I_{s2}} + 1\right) + n_3 \ln\left(\frac{I_{ph3}}{I_{s3}} + 1\right)\right] \tag{III.10}$$

La puissance maximale délivrée par la cellule peut être obtenu en posant $\frac{dP}{dI_L} = 0$;

$$\frac{KT}{q}\left[n_1 \ln\left(\frac{I_{ph1} - I_L}{I_{s1}} + 1\right) + n_2 \ln\left(\frac{I_{ph2} - I_l}{I_{s2}} + 1\right) + n_3 \ln\left(\frac{I_{ph3} - I_L}{I_{s3}} + 1\right)\right] - I_l\left[\frac{KT}{q}\left(\frac{n_1}{I_{ph1} - I_l + I_{s1}} + \frac{n_2}{I_{ph2} - I_L + I_{s2}} + \frac{n_3}{I_{ph3} - I_L + I_{s3}}\right) + 2R_s\right] = 0 \tag{III.11}$$

III.4.2 Model à deux diodes:

Le modèle à une seule diode regroupe les deux termes de courant de saturation dans un seul terme, pour une forme plus général. Ces termes sont séparés de telle sorte que le circuit équivalent comporte deux diodes qui modélisent les deux phénomènes de recombinaison et diffusion, comme il est illustré sur la figure (III.15).

L'expression du courant I_L pour chaque sous cellules est donnée par :

$$I_L = I_{ph,i} - I_{s1,i}\left(exp\left(\frac{q}{n_1 KT}(V_i + I_L R_{s,i})\right) - 1\right) - I_{s2,i}\left(exp\left(\frac{q}{n_2 KT}(V_i + I_L R_{s,i})\right) - 1\right) - \frac{V_i + R_{s,i} I_L}{R_{sh,i}} \tag{III.12}$$

En négligeant l'effet de la R_{sh}, la relation (III.12) devient

$$I_L = I_{ph,i} - I_{s1,i}\left(exp\left(\frac{q}{n_1 KT}(V_i + I_L R_{s,i})\right) - 1\right) - I_{s2,i}\left(exp\left(\frac{q}{n_2 KT}(V_i + I_L R_{s,i})\right) - 1\right) \tag{III.13}$$

Dans ce modèle, les facteurs d'idéalité sont fixés à n_1=1 et n_2=2

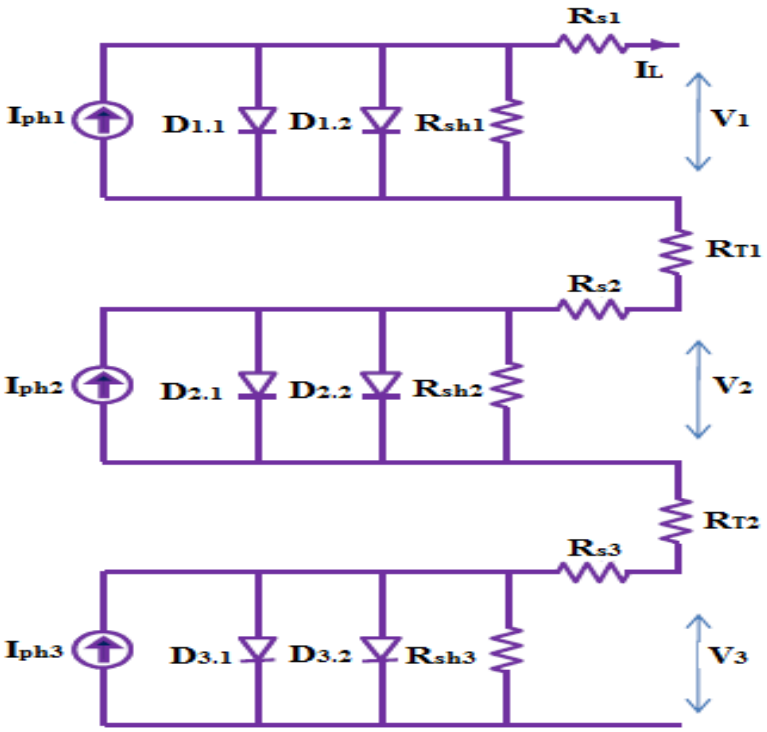


Figure III.15 : Circuit équivalent du model à deux diodes.

III.5 Conclusion :

Au cours de ce chapitre, les cellules solaires triple jonctions ont été décrites, ainsi que leurs constituants essentiels. D'après cette étude, la conception de ce genre de cellules doit tenir compte de deux principaux règles :

- Les sous-cellules adjascentes doivent être séparées par des régions conductrice avec contact ohmique, et à la fois transparente à la gamme spectrale exploitée par la sous-cellule. Ceci est assuré par les jonctions tunnel.
- Du fait que les sous-cellules sont montées en série, la tension de circuit ouvert V_{CO} résultante est la somme des tensions V_{CO} des sous-cellule, tandis que le courant I_{CC} résultant est celui présentant la plus faible valeur d'entre les autres.

Chapitre IV

Résultats de la simulation et discussion

IV.1 Introduction

Avant de fabriquer une cellule solaire, il est utile de connaître au préalable l'ordre de grandeur des paramètres électriques et optiques des différentes couches la constituant, pour lesquelles on peut obtenir les meilleurs performances, c'est-à-dire, une conversion maximale d'énergie. La simulation a été largement utilisée dans le domaine photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres qui influent sur le rendement.

C'est dans cette approche, et dans le cadre de nos recherches sur les cellules photovoltaïques, que nous nous sommes intéressés à optimiser un type particulier de cellules solaires en couches minces : La cellule triple jonction InGaP /InGaAs/Ge. Le but de notre travail est de simuler cette cellule en utilisant le logiciel de simulation AMPS-1D (Analyse of Microelectronic and Photonic Structures) bien adapté à ce genre de cellules, et de la modéliser sous l'environnement MATLAB pour extraire les paramètres caractéristiques de la cellule complète et de proposer son modèle équivalent. La cellule étant un système multicouche. C'est pourquoi il est alors indispensable de faire une investigation de chaque couche et analyser l'effet de la variation des paramètres optiques et électriques sur la cellule.

IV.2 Le simulateur AMPS-1D

Le logiciel AMPS 1-D est unoutil de simulation unidimensionnel utilisé pour simuler la physique du transport dans les dispositifs à l'état solide d'une manière très générale. Il résout numériquement les trois équations qui gouvernent le fonctionnement du dispositif (l'équation de Poisson et les équations de continuité pour les électrons et les trous libres) sans faire à priori des suppositions à propos des mécanismes de transport dans ce dispositif. Il est élaboré pour analyser, concevoir et optimiser des structures destinées pour des applications photovoltaïques, microélectroniques ou optoélectroniques.

Les paramètres sont à introduire dans trois des sous-fenêtres constituant la fenêtre principale du logiciel. Ils sont [61] :

- Les paramètres qui s'appliquent au dispositif entier ;
- Les paramètres qui s'appliquent à une région particulière du dispositif ;
- Les paramètres qui définissent le spectre d'illumination.

.

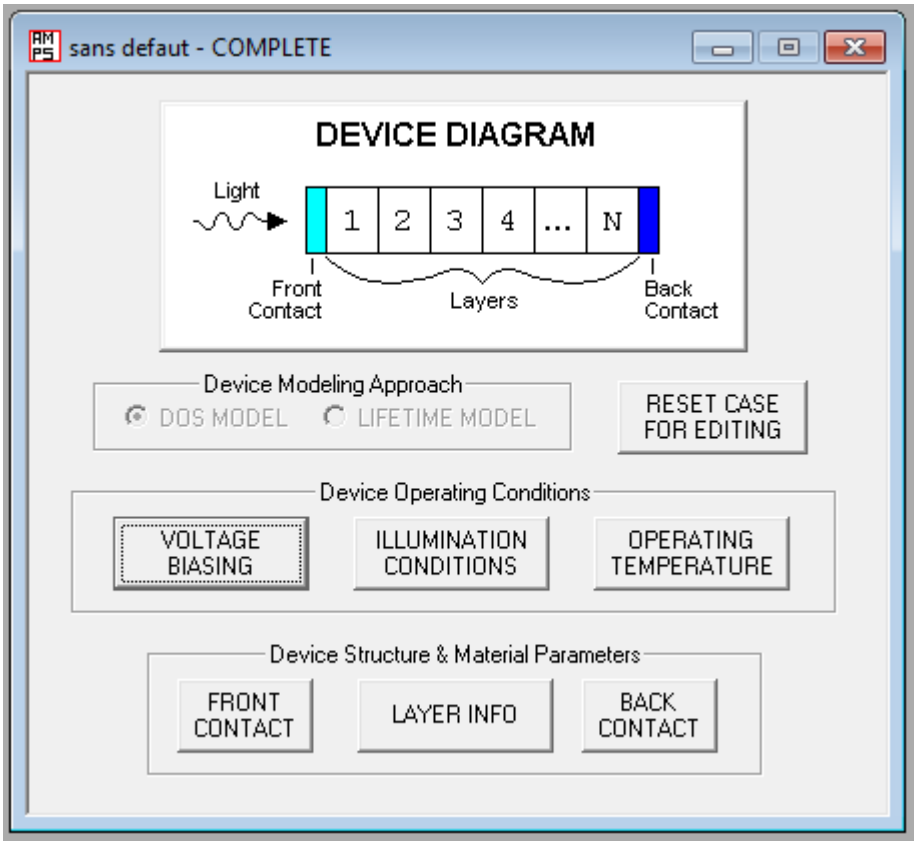


Figure IV.1 : Ensemble de **s**ous-fenêtres pour introduire les différents paramètres.

La fenêtre principale de l'AMPS-1D, Figure (IV.1), fournit à l'utilisateur les différentes options pour la personnalisation de la simulation. Au bas de la fenêtre sous la rubrique ‘‘Structure du dispositif et Paramètres des matériaux’’, on trouve trois options: Contact avant, informations sur les paramètres des couche, et Contact arrière. L'option informations sur les couches permet à l'utilisateur d’introduire les différents paramètres de chaque couche tels que le gap (E_G), la concentration de dopage des dopants(N_A ou N_D), la mobilité des électrons (MUN), la mobilité des trous (MUP), l'affinité électronique(CHI), la permittivité relative(EPS), la densité des états des électrons dans la bande de conduction (N_C) la densité des états des trous dans la bande de valence (N_V).

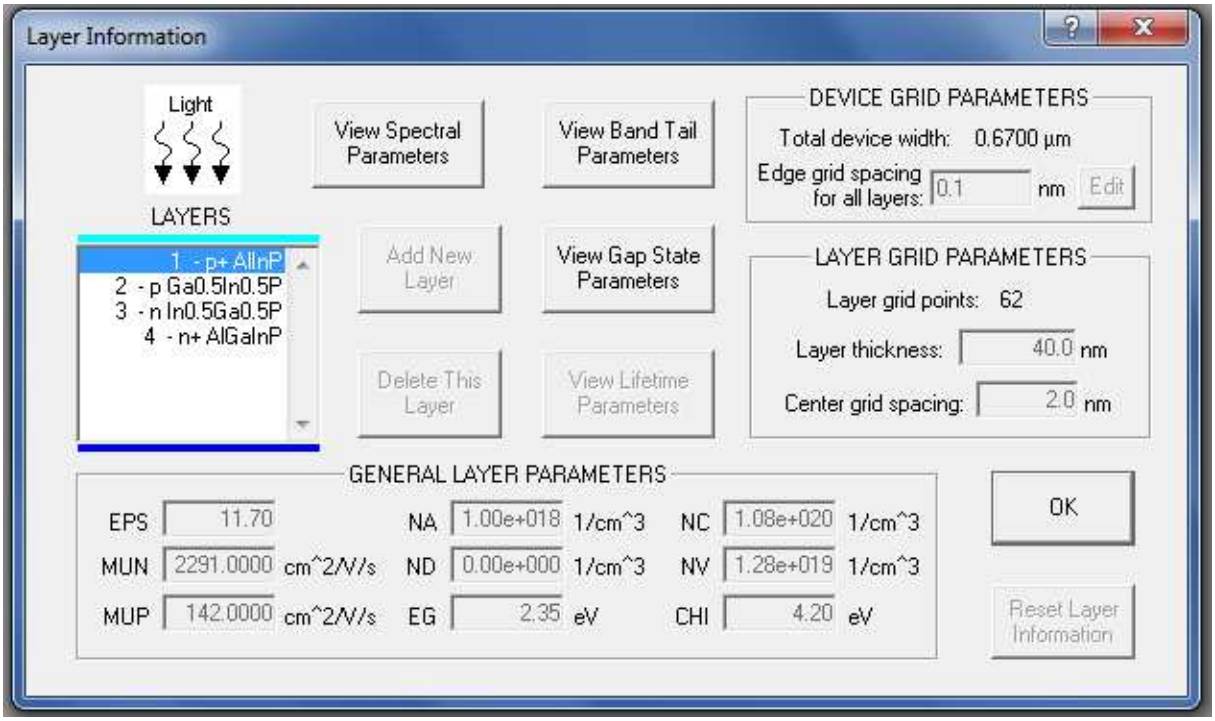


Figure IV.2 : Fenêtre d'informations des couches.

IV.3 Structure de la cellule à simuler

La structure de la cellule solaire utilisée est de type : $Ga_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.5}In_{0.5}As/Ge$. Elle est constituée de :

- Cellule supérieure à base $In_{0.5}Ga_{0.5}P$;
- Jonction tunnel n-GaInP/p-AlGaAs ;
- Cellule médiane à base $In_{0.5}Ga_{0.5}As$;
- Jonction tunnel n-GaAs/p-GaAs ;
- Cellule inférieure à base Ge.

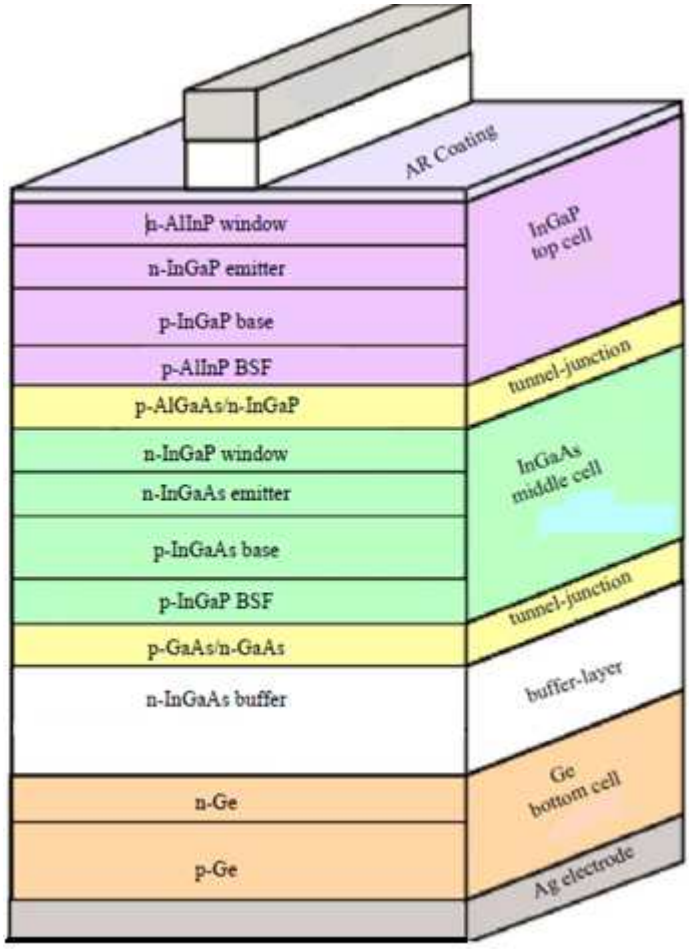


Figure IV.3: Structure de la cellule à simuler.

IV. 3. 1 Paramètres des matériaux

Les paramètres des différents matériaux de la cellule de référence sont résumés dans les tableaux qui suivent. Ils sont :

a) Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier

Les paramètres qui s'appliquent au dispositif entier incluent:

1. **Conditions aux limites :**
   a. PHIBO (eV) = $\Phi_{b0} = E_C - E_F$ pour $x = 0$.
   b. PHIBL (eV) = $\Phi_{b1} = E_C - E_F$ pour $x = L$.
2. **Vitesse de recombinaison en surface :**
   a. SN0 (cm/s) =S_{N0} : pour les électrons à l'interface x=0.
   b. SP0 (cm/s) =S_{P0} : pour les trous à l'interface x=0.
   c. SNL (cm/s) = S_{NL} : pour les électrons à l'interface x=L.
   d. SPL (cm/s) =S_{PL} : pour les trous à l'interface x=L.

3. Coefficient de réflexion de la lumière entrant sur les surfaces avant et arrière :

a. RF = R_F : coefficient de réflexion à x=0 (réflexion sur surface avant).

b. RB = R_B : coefficient de réflexion à x =L (réflexion sur surface arrière).

Paramètres	Surface avant			Surface arrière		
	InGaP	InGaAs	Ge	InGaP	InGaAs	Ge
PHIBO/L (eV)	2.28	1.83	0.96	0.13	0.07	0.02
SNL (cm/s)	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6
SPL (cm/s)	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6
RB/F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau IV .1 : Paramètres qui s'appliquent au dispositif entier.

b) Paramètres qui s'appliquent à une région particulière

Paramètres	AlInP	InGaP	AlInGaP	AlGaAs	InGaAs	GaAs	Ge
ε	11.7	11.75	11.7	12.3	11.6	11.8	16.2
N_C (cm^{-3})	$1{,}08.10^{20}$	$1{,}54.10^{19}$	$1{,}210^{20}$	$5{,}6.10^{17}$	$2{,}1.10^{17}$	$1{,}54.10^{19}$	1.10^{19}
N_V (cm^{-3})	$1{,}28.10^{19}$	$1{,}45.10^{19}$	$1{,}28.10^{19}$	$8{,}16.10^{18}$	$7{,}7.\ .10^{18}$	$1{,}45.10^{19}$	5.10^{18}
E_g (eV)	2.35	1.87	2.4	1.67	0.81	1.76	0.66
χ_e(eV)	4.2	4.67	4.2	3.85	4.46	1.76	4.0
μ_n(cm^2/V.s)	2291	1000	2150	4000	12	1000	2000
μ_p(cm^2/V.s)	142	35	141	206	300	35	1200

Tableau IV .2 : Paramètres qui s'appliquent à une région particulière de la cellule.

Avec :

ε: Constante diélectrique relative ;

N_C : Densité d'état effective des électrons (cm^{-3}) dans la bande de conduction ;

N_V : Densité d'état effective des trous (cm^{-3}) dans la bande de valence ;

E_g : La largeur de la bande interdite (eV) ;

χ_e: L'affinité d'électrons (eV) ;

μ_n : Mobilité des électrons (cm^2/Vs) ;

μ_p : Mobilité des trous (cm^2/Vs).

c) Etat des défauts

i. Cellule supérieur InGaP

Niveaux Gaussiens	p^+AlInP	$p\text{-}Ga_{0.5}In_{0.5}P$	$n\text{-}In_{0.5}Ga_{0.5}P$	$n^+AlGaInP$
NDG (cm^{-3})	10^{17}	$8{,}5.10^{14}$	$2{,}3.10^{15}$	9.10^{16}
EDONG (eV)	2.10	0.95	0.95	2.1
WDSDG (eV)	0.25	0.05	0.05	0.25
GSIG/ND(cm^{-2})	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}
GSIG/PD (cm^{-2})	10^{-15}	10^{-15}	10^{-15}	10^{-15}

Tableau IV .3 : Etat des défaust dans la cellule supérieur InGaP.

ii. Cellule médiane InGaAs

Niveaux gaussiens	$p^+In_{0.97}Ga_{0.03}P$	$p\text{-}In_{0.5}Ga_{0.5}As$	$n\text{-}In_{0.5}Ga_{0.5}As$	$n^+In_{0.97}Ga_{0.03}P$
NDG (cm^{-3})	10^{15}	5.10^{15}	6.10^{15}	10^{17}
EDONG (eV)	1.6	0.4	4	0.97
WDSDG (eV)	0.25	0.25	0.15	0.25
GSIG/ND (cm^{-2})	10^{-14}	10^{-20}	$1{,}2.10^{-13}$	10^{-14}
GSIG/PD (cm^{-2})	10-^{15}	10^{-20}	10^{-14}	10^{-15}

Tableau IV .4 : Etat des défauts dans la cellule médiane InGaAs.

iii. Cellule inférieur Ge

Niveaux Gaussiens	$p^+In_{0.7}Ga_{0.3}As$	p-Ge	n-Ge	$n^+In_{0.7}Ga_{0.3}As$
NDG (cm^{-3})	8.10^{14}	10^{10}	3.10^{15}	3.10^{15}
EDONG (eV)	0.6	3.5	3.5	0.64
WDSDG (eV)	0.15	1.5	0.15	0.20
GSIG/ND (cm^{-2})	10^{-14}	$1,5.10^{-14}$	10^{-14}	10^{-14}
GSIG/PD (cm^{-2})	10^{-15}	$8,6.10^{-15}$	10^{-15}	10^{-15}

Tableau IV .5 : Etat des défauts dans la cellule inférieur Ge.

Avec :

- NDG(i) : densité d'états de donneurs Gaussiens ($1/cm^3$) pour le $i^{ème}$ donneur Gaussien.
- ED0NG(i) : énergie de donneur Gaussien au sommet (eV) mesuré positif à partir de E_c pour le $i^{ème}$ donneur Gaussien.
- WSDG(i) : écart standard (eV) du $i^{ème}$ donneur Gaussien.
- GSIG/ND(i): section droite de capture du $i^{ème}$ état donneur Gaussien pour les électrons (cm^2).
- GSIG/PD(i): section droite de capture du $i^{ème}$ état donneur Gaussien pour les trous (cm^2).

Après avoir entré les paramètres des différents matériaux, on prélève la caractéristique J(V) de chacune des sous-cellules avec et sans défauts et on fait une étude comparaison entre elles.

IV.4 Caractéristiques J(V) et extraction des paramètres de la cellule triple jonction InGaP /InGaAs/Ge sans défauts

IV.4.1 Caractéristiques J(V)

Le simulateur AMPS-1D permet l'obtention de la caractéristique J(V) sous éclairement AM 1.5G de chaque sous-cellule. Les résultats obtenus sont regroupés et illustrés sur la figure (IV.4).

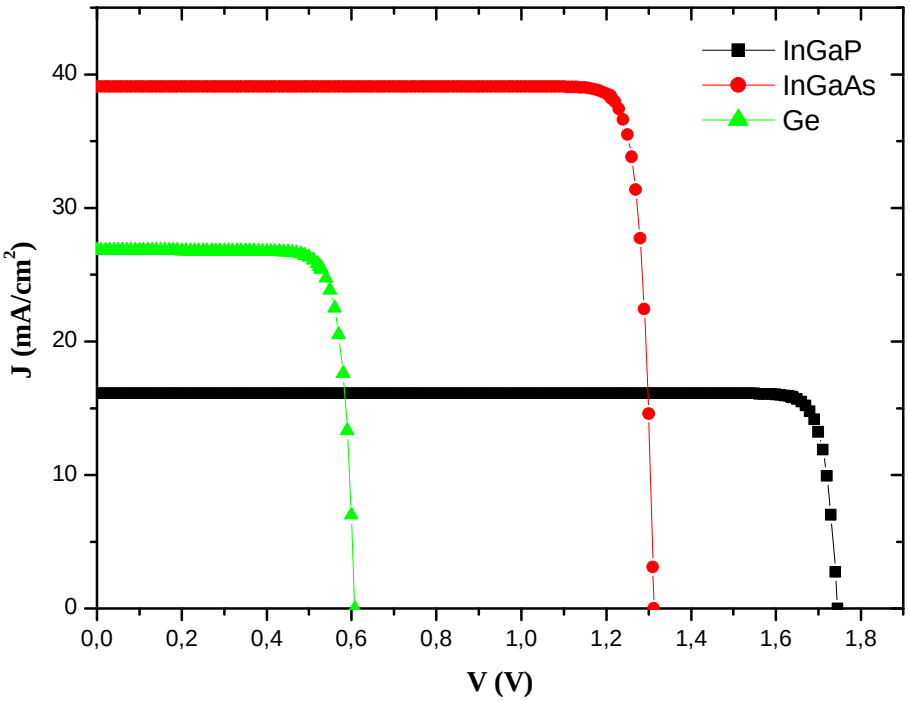


Figure IV.4:Caractéristiques J(V) des sous cellules InGaP/InGaAs/Ge sans défauts.

Les paramètres photovoltaïques sont résumés dans le tableau suivant :

Matériau	J_{CC} (mA/cm^2)	V_{CO} (V)	FF	η (%)
InGaP	16.097	1.745	0.923	25.93
InGaAs	39.088	1.312	0.904	46.357
Ge	26.813	0.608	0.826	13.465

Tableau IV .6 : Les paramètres photovoltaïque des sous-cellules.

IV.4.2 Méthode d'extraction des résistances série et shunt

En utilisant le modèle électrique à une seul diode de la cellule solaire, l'expression qui lie le courant à la tension appliquée est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_s\left[\exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{nKT}\right) - 1\right] - \frac{V+R_sI}{R_{sh}} \quad \text{(IV.1)}$$

On utilise la méthode des cinq points pour extraire les paramètres électriques de la cellule en se basant sur les valeurs de cinq points tirés directement de la caractéristique I (V). Les expressions suivantes sont tirées [62]:

$$R_{sh} = R_{sh0} = -\left.\frac{dV}{dI}\right|_{I=I_{cc}} \quad \text{(IV.2)}$$

$$n = \frac{\beta A}{B+C} \quad \text{(IV.3)}$$

Où : $A = V_m + R_{s0}I_m - V_{co}$;

$B = ln\left(I_{cc} - \frac{V_m}{R_{sh0}} - I_m\right) - ln\left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}}\right)$;

$C = \frac{I_m}{I_{cc} - V_{co}/R_{sh0}}$.

$$I_0 = \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}}\right) exp\left(-\beta\frac{V_{co}}{n\prime}\right) \quad \text{(IV.4)}$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{n}{\beta I_s} exp\left(-\beta\frac{V_{co}}{n\prime}\right) \quad \text{(IV.5)}$$

$$I_{ph} = I_{cc}\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + I_0\left(exp\beta\frac{I_{cc}R_s}{n\prime} - 1\right) \quad \text{(IV.6)}$$

Où

$$R_{s0} = -\left.\frac{dV}{dI}\right|_{V=V_{co}} \quad \text{(IV.7)}$$

R_{s0} et R_{sh0} sont obtenus de la caractéristique par une simple régression linéaire.

IV.4.3 Extraction des paramètres

A l'aide de la caractéristique J(V) de chaque sous-cellule, et en utilisant l'environnement MATLAB, on a développé un programme basé sur la méthode des cinq points qui permet l'extraction des paramètres électriques de chaque sous-cellule. Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

Matériau	J_{ph} (mA/cm^2)	J_s (mA/cm^2)	n	R_s (mΩ.cm^2)	R_{sh} (Ω.cm^2)	P_m (mW/cm^2)
InGaP	16.10	$3{,}246.10^{-29}$	0.9876	67.9	7.10^4	25.9
InGaAs	39.10	$1{,}14.10^{-21}$	0.9785	37.2	$1{,}45.10^4$	46.4
Ge	26.90	$3{,}39.10^{-10}$	0.9383	116	$1{,}83.10^3$	13.5

Tableau IV .7 : Extraction des paramètres électriques de chaque sous-cellule.

D'après ces résultats, on remarque que le facteur d'idéalité est proche de 1. Cela confirme la valeur théorique pour une cellule sans défauts (n=1). Les valeurs du courant de saturation dépendent de la concentration intrinsèque et des paramètres physiques du matériau de chaque couche, notamment la concentration des dopants. La faible résistance série est due à l'optimisation des épaisseurs des différents couches et la forte résistance shunt est due à la faible densité de défauts. La puissance maximale est obtenue avec la sous-cellule à base de l'InGaAs.

IV.5 Caractéristiques J(V) et extraction des paramètres des sous cellules solaires InGaP /InGaAs/Ge avec défauts

IV.5.1 Caractéristiques J(V)

Dans la fenêtre des paramètres des défauts qui se trouve sous la fenêtre des paramètres qui s'applique à une région particulière, on introduit les paramètres des défauts cités auparavant et on tire les caractéristiques J(V) correspondantes de chacune des sous cellules.

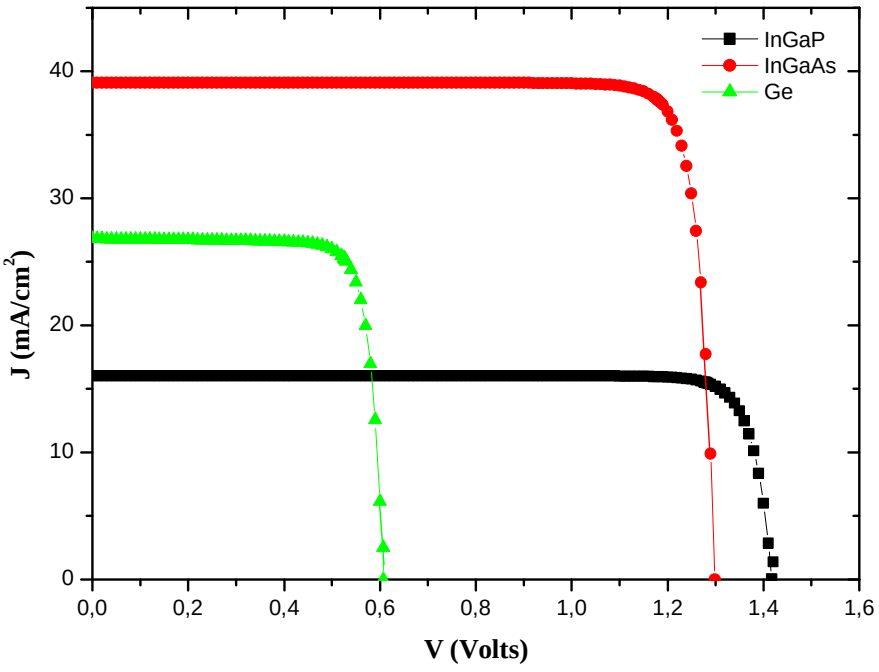


Figure IV.5: Les caractéristiques J(V) des sous cellules InGaP/InGaAs/Ge avec défauts.

Les paramètres caractéristiques obtenus à partir de la caractéristique J (V) sont résumés dans le tableau suivant:

Matériau	J_{CC} (mA/cm^2)	V_{CO} (V)	FF	η (%)
InGaP	16.029	1.417	0.872	19.816
InGaAs	39.097	1.299	0.876	44.500
Ge	26.804	0.607	0.816	13.281

Tableau IV .8 : les paramètres caractéristiques de chaque sous-cellule.

On remarque que le rendement maximal est atteint avec la sous-cellule à base de l'InGaAs.

IV.5.2 Extraction des paramètres

Matériau	J_{ph} (mA/cm^2)	J_s (mA/cm^2)	n	R_s (mΩ.cm^2)	R_{sh} (Ω.cm^2)	P_m (mW/cm^2)
InGaP	16,00	$1{,}043.10^{-15}$	1,470	466,4	$1{,}2795.10^{5}$	19,8
InGaAs	39,20	$9{,}67.10^{-15}$	1,39	197,3	$4{,}16.10^{3}$	44,5
Ge	26,9	$2{,}175.10^{-10}$	0,9833	459,5	4.10^{4}	13,3

Tableau IV .9 : l'extraction des paramètres électriques de chaque sous-cellule.

Les valeurs des puissances fournis par chaque sous-cellule rejoignent ceux résumés dans le tableau précédent. Le facteur d'idéalité dans ce cas est compris entre 1 et 2. Ce qui justifie que le modèle à une exponentielle pour les deux sous-cellules à base d'InGaP et d'InGaAs n'est plus valable. Dans ce cas, il est plus judicieux d'utiliser le modèle à deux exponentielles pour l'extraction des résistances série et shunt.

IV.6 Puissance débitée par les sous cellules solaires

Les figures (IV.6), (IV.7), (IV.8), illustrent les variations de la puissance fournie par chaque sous-cellule à base de InGaP, InGaAs et Ge en fonction de la tension appliquée sous une illumination et ce avec et sans défauts.

IV.6.1 La cellule InGaP

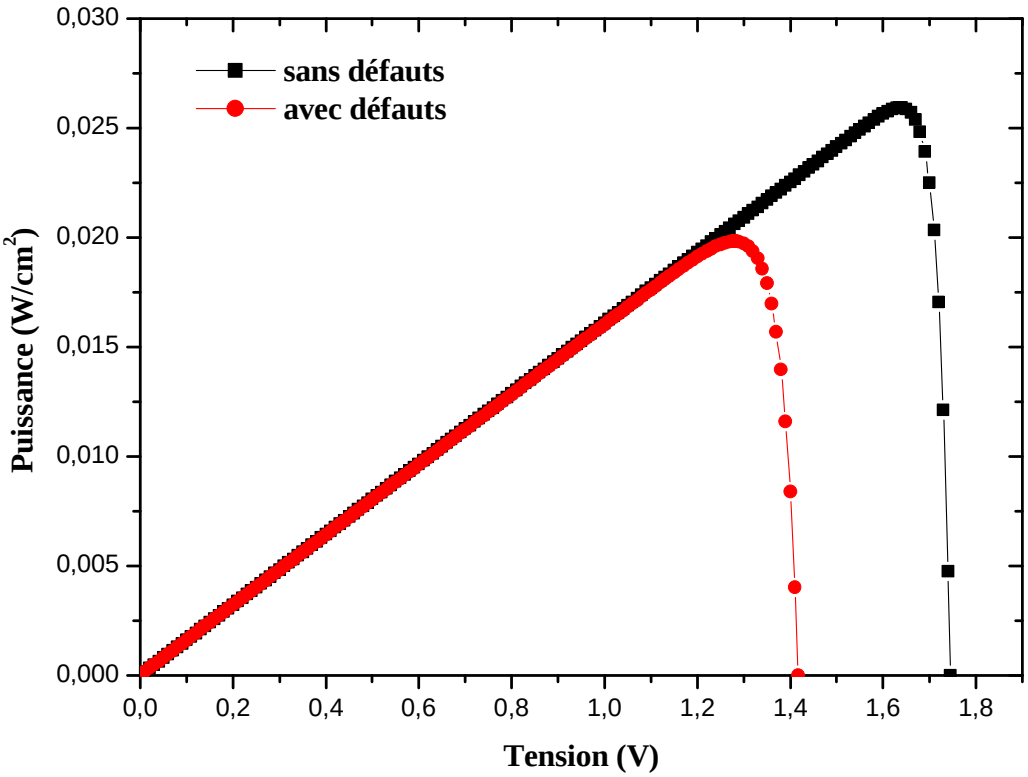


Figure IV.6 : Puissance débitée par la cellule InGaP sans et avec défauts.

IV.6.2 La cellule InGaAs

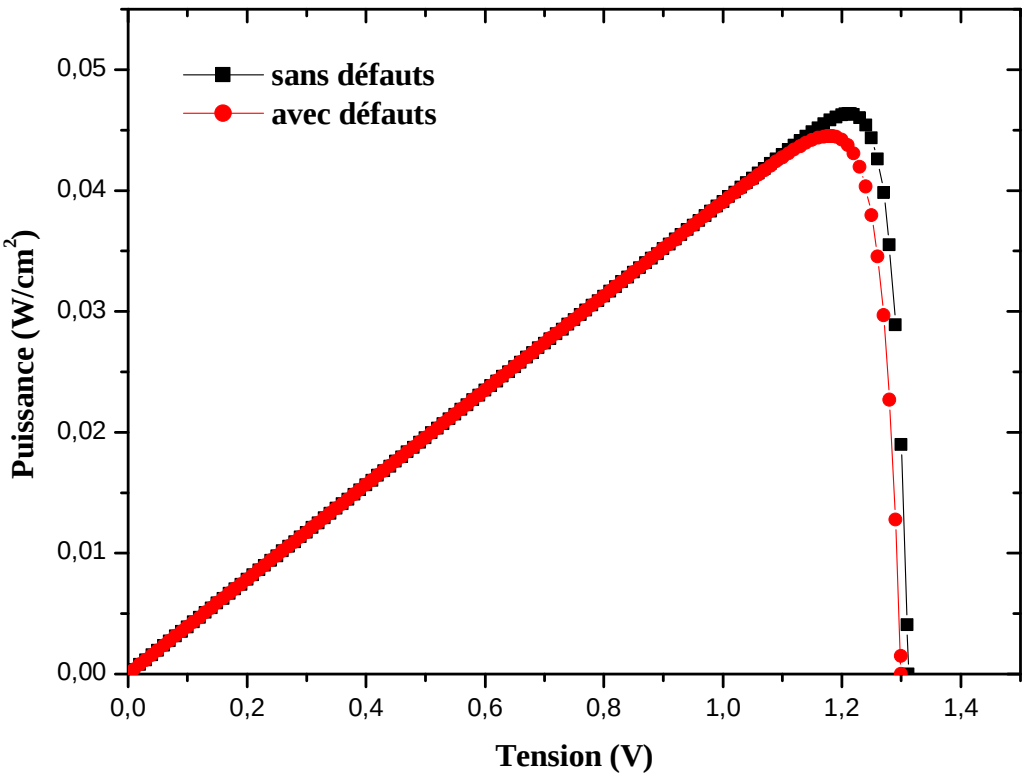


Figure IV.7 : Puissance débitée par la cellule InGaAs sans et avec défauts.

IV.6.3 La cellule Ge

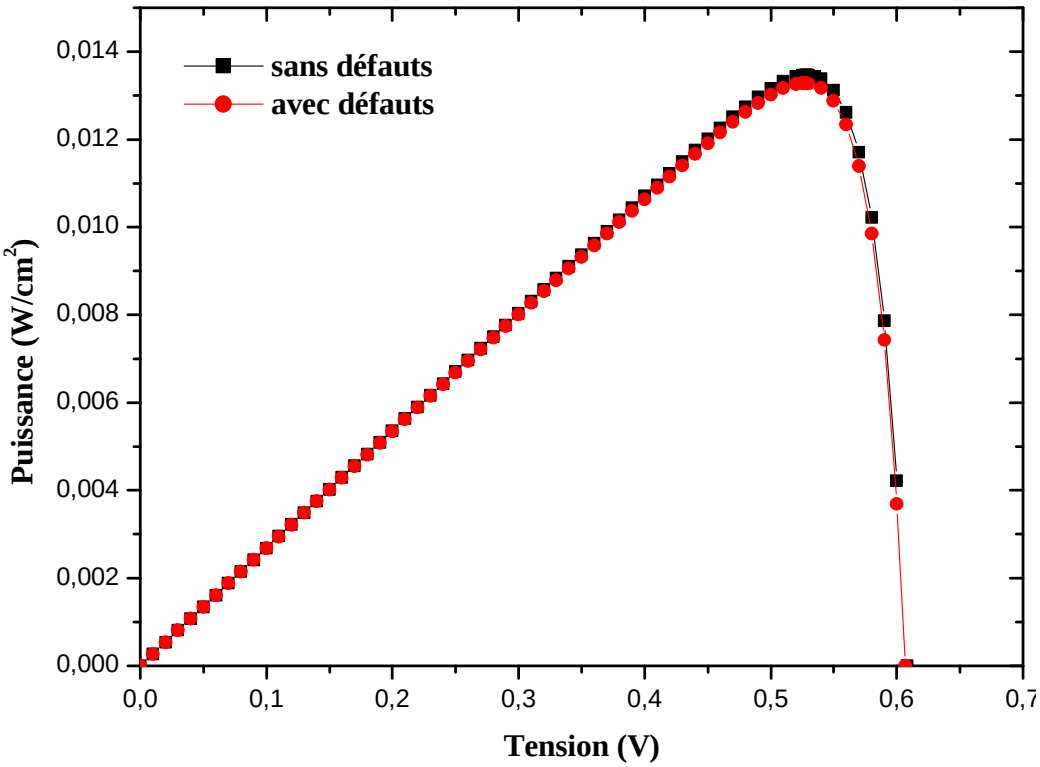


Figure IV.8 : Puissance débitée par la cellule Ge sans et avec défauts.

On remarque que la puissance fournie par la sous-cellule à base de Ge est pratiquement la même, avec et sans défauts. Cela est justifié par la valeur de n qui est proche de 1. Le défaut de type V_{Ge} dans le Ge est pratiquement le seul détecté dans le Ge, et il est situé à environ 0.15 eV au dessus de la bande de valence. Il n'affecte pas de façon significative les performances de la sous-cellule à base de Ge. Par contre, la puissance fournie par la sous-cellule à base d'InGaP est affectée de façon significative. Elle correspond à un facteur d'idéalité le plus grand (1.47), donc à une présence d'un défaut profond. Il correspond au HP1 qui est situé à 0.9±0.05 eV au dessus de la bande de valence et il représente un centre recombinant, ce qui limite de façon significative les performances de cette sous-cellule.

IV.7 Caractéristiques J(V) de la cellule triple jonction avec et sans défauts

IV.7.1 Caractéristiques J(V)

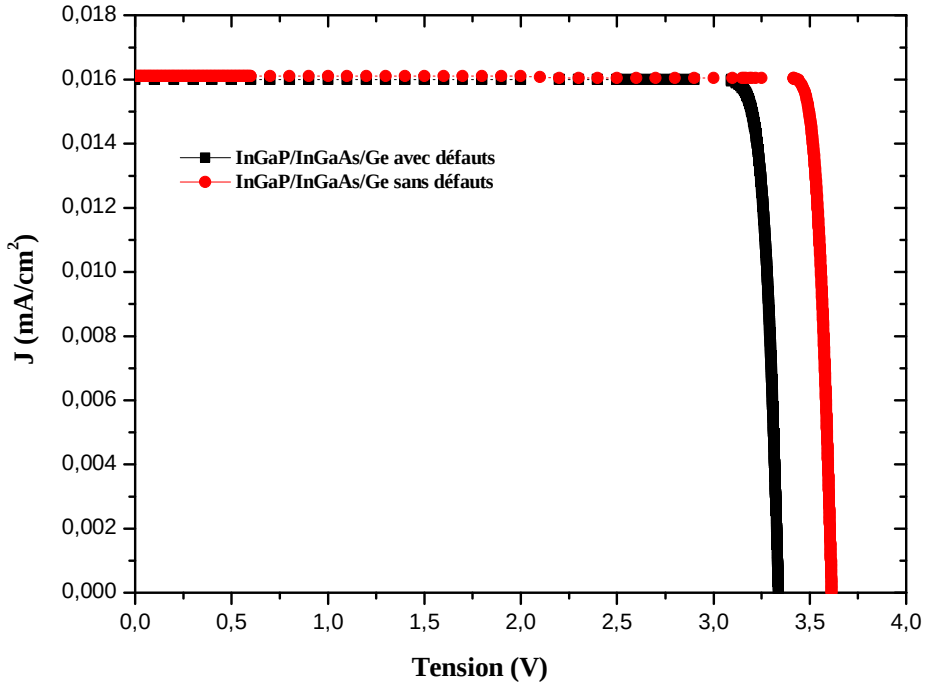


Figure IV.9: Les caractéristiques J(V) de la cellule triple jonction avec et sans défauts.

Pour la cellule triple jonction globale, les performances diminuent en présence des défauts. On remarque que la tension de circuit-ouvert diminue en présence des défauts, ce qui réduirait son rendement de conversion. Par contre, la densité de courant de court-circuit est pratiquement la même. La pente à la caractéristique au point V_{CO} augment avec la présence des défauts et la résistance série est pratiquement constante.

IV.7.2 Puissance débitée par la cellule solaire triple jonction

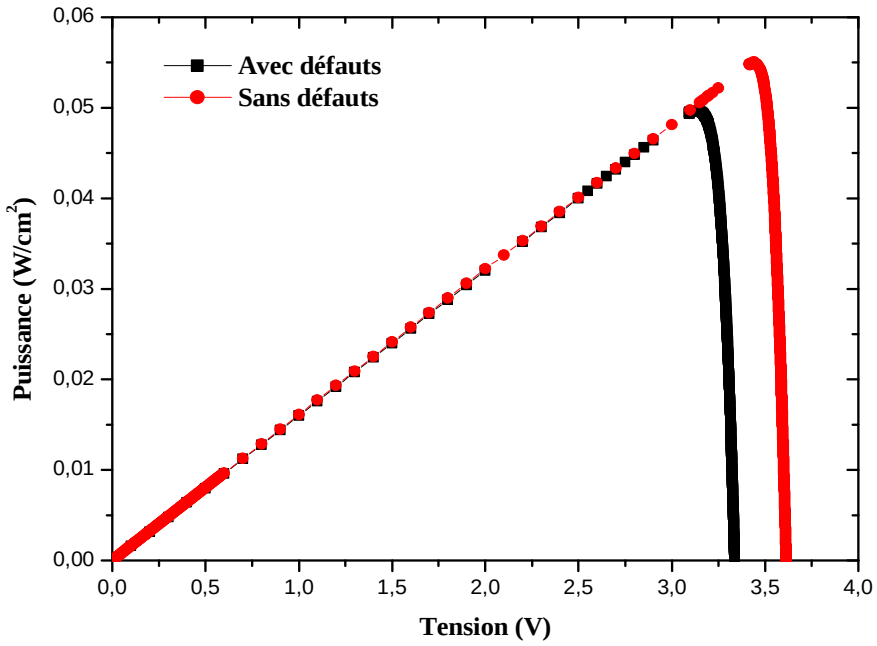


Figure IV.10 : Puissance débitée par la cellule triple jonction sans et avec défauts.

On remarque que la puissance maximale fournie par la cellule triple jonction a diminué de 5.4 mW/cm^2 en raison de la présence des défauts. Ce qui se traduit par une perte importante pour une installation à plusieurs panneaux solaires, donc avec un nombre important de cellules. Donc, une étude des phénomènes de recombinaison aux différentes interfaces (nombreuses) s'imposent dans la suite des travaux de recherche afin d'optimiser l'efficacité de conversion.

IV.8 Conclusion

La conception des cellules solaires nécessite un ensemble de spécifications qui doivent être respectées afin de garantir que la fabrication finira par livrer un produit qui peut être déployé et exécuté comme prévu.

La simulation de la cellule solaire triple jonction InGaP/InGaAs/Ge a été réalisée avec le simulateur **AMPS-1D** et l'environnement **Matlab**.

Les caractéristiques J(V) et P(V) sont interprétées et les paramètres caractéristiques de la cellule R_s, R_{sh}, n et J_s sont déterminés.

Conclusion générale

Des nouvelles structures de cellules solaires de troisième génération destinées pour des applications spatiales (alimentation des satellites) ont été étudiées. Elles sont constituées de l'empilement de divers composés III-V, chacune optimisées pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement permet donc de capter une grande partie du spectre solaire et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

Le but fixé au cours de ce mémoire a été guidé par deux idées principales, d'une part la simulation des performances de chaque sous-cellule à l'aide du logiciel AMPS-1D. Ce dernier nous fourni la caractéristique J(V) et les valeurs des paramètres photovoltaïques (J_{cc}, V_{co}, FF et η). D'autre part l'estimation des paramètres électriques de chaque sous-cellule sous l'environnement MATLAB, en exploitant les caractéristiques J(V) de chaque sous cellules.

En effet, l'étude que nous avons menée est guidée par deux voies, la première consiste à simuler chaque sous-cellule en admettant que les matériaux constituant ces sous-cellules sont parfaites, c.-à-d. qu'elles ne contiennent aucun état de défaut. La deuxième voie étudiée concerne la prise en compte des défauts dans chaque matériau.

Les résultats obtenus sans défauts montrent que le rendement maximal atteint est de 46.357 % pour la sous-cellule médiane à base de l'InGaAs. Les faibles valeurs de R_s (quelques $m\Omega.cm^2$) et les fortes valeurs de R_{sh} (quelques $k\Omega.cm^2$) le confirment. Par contre la valeur minimale de 13.465 % correspond à la sous-cellule à base du Ge. Cela est dû essentiellement aux meilleures propriétés optiques de l'InGaAs. Les performances des sous-cellules se dégradent en présence des défauts. Ce résultat se traduit par diminution de la tension de circuit, ce qui réduirait son rendement de conversion. Par contre, la densité de courant de court-circuit reste pratiquement la même. La pente à la caractéristique au point V_{CO} diminue avec la présence des défauts. Ce qui se traduirait la diminution de la résistance série.

En termes de puissance, les résultats ont montrés que la puissance maximale fournie par la cellule triple jonction a diminué de 5.4 mW/cm^2 en raison de la présence des défauts.

Ce qui se traduit par une perte importante pour une installation photovoltaïques constituées de plusieurs panneaux solaires, donc avec un nombre important de cellules.

En perspective, nous suggérons une étude des phénomènes de recombinaison aux différentes interfaces (nombreuses) afin d'optimiser l'efficacité de conversion, et de proposer ainsi un modèle adéquat de toute la cellule triple jonction.

Références bibliographiques

[1] J. Royer, T. Djiako, E. Schiler, B. Sadasy, ‘‘Le pompage photovoltaïque’’, Université d'Ottawa, 1998.

[2] M. Hepp, ‘‘Light Trapping in Quantum Well Solar cells Grown on Patterned substrate’’, Master of Science in semiconductor, university of London, 1998.

[3] N. Oleksiy, ‘‘ Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités’’, thèse de doctorat, Institue nationale des sciences appliquées, Lyon, 2005.

[4] M. Ouddah, ‘‘Etude du silicium poreux destine aux cellules solaires’’, Thèse de magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.

[5] A. Bouloufa, ‘‘Etude et Caractérisation des Semiconducteurs Ternaires et Quaternaires $CuIn_{1x}Ga_xSe_2$ par Spectroscopie Photoacoustique’’, Thèse de doctorat d’Etat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2007.

[6] G. A. Gow, C. D. Maning, ‘‘Development of photovoltaic array model for use in power-electrons simulation studies’’, IEE Proc. Electr. Power Appl, Vol 146, No 2, 1999.

[7] P. Chabloz, ‘‘ Les couches épaisses en silicium amorphes, application comme détecteurs de rayons X ’’, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, 1996.

[8] N. Ott, M. Nerding, G. Muller, R. Brendel, and H. P. Strunk, ‘‘Evolution of the microstructure during annealing of porous silicon multilayers’’, Journal of Applied Physics, vol 95, 2004, p. 497.

[9] R. G. Lemus, F. B. Hander, C. H. Rodríguez, J.M. Martinez, ‘‘ Optical and compositional characterisation of stain-etched porous silicon subjected to anodic oxidation and thermal treatments ’’, Mater. Sci. Eng. B, vol 101, 2003, p.249.

[10] P. L. Jett, J. L. Miller, ‘‘Analysis of effects of shadowed and open solar cells on orbital workshop solar cell array performance’’, 1971, p. 889.

[11] B. Brousse, ‘‘ Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique’’, thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2004.

[12] M. M. Niang, S. Diop, ‘‘ Les pompes solaires : Dimensionnement d’une station de

pompage en zone maraicher’’, Institu superieur de technologie industrielle, 2008.

[13] S. Astier, B. Flèche, D. Delagnes, ‘‘Energie solaire photovoltaïque’’, Toulouse, Juin, 2007.

[14] R. Maouedj, ‘‘Application de l’énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah’’, Mémoire De Magistère, Décembre, 2005.

[15] F. C. Boukhtouche, ‘‘Etude et réalisation d'une centrale Photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT’’, Mémoire de magister, Ecole nationale polytechnique, Alger, 2004.

[16] Z. Bendjellouli, ‘‘Contribution a la modélisation d’une cellule solaire’’, Mémoire de magister, Université de Bechar, 2009.

[17] S. M. Ait-Cheikh, ‘‘Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques’’, Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique (ENP), Alger, 2007.

[18] G. Gourdin, ‘‘Solar cell technology (current state of the art)’’, 2007.

[19] M. A. Green, ‘‘3rd generation PVsolar cells for 2020 and beyond’’, vol 14, 2010.

[20] T. Key, ‘‘Solar photovoltaics: Expanding electric generation options’’, 2008.

[21] A. Ricaud, ‘‘Photopiles solaires, de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés’’, presse polytechniques et universitaires romandes, 1997.

[22] R. Beneyton, ‘‘L’incorporation du thallium dans une matrice III-V : preparation de GaTlAs et InTlAs par EJM’’, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Novembre, 2004.

[23] A. Goetzberger, ‘‘Crystalline Silicon Solar Cells’’, John Wiley & Sons, 1997.

[23] C. Honsberg, S. Bowden, ‘‘Photovoltaics: Devices, Systems and Applications [CDROM]’’ Sydney (Aus) : Univ. of New South Wales, 1998.

[24] E. Fourmond, ‘‘Développement de techniques de dépôt plasma et photo assistées pour la réalisation de couches antireflets passivantes en SiNx:H sur silicium multicristallin pour applications photovoltaïques’’, Thèse, INSA de Lyon, 2002.

[25] A. Luque, S. Hegendus, ‘‘Handbook of Photovoltaic Science and Engineering’’, John Wiley & Sons, 2003.

[26] M. F. Nuban, ‘‘Analyse par imagerie de photoluminescence des défauts induits au cours de la réalisation des composants’’, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1996.

[27] J. Marek, ‘‘Light-beam-induced current characterization of grain boundaries’’, J. Appl. Phys, vol 55, 1984, p. 318.

[28] Y. Sayad, ‘‘Interaction Laser-Semiconducteur : Contribution à l’étude de la technique LBIC-application au silicium photovoltaïque’’, Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2009.

[29] A. Al-Juffal, J. E. Parrot, ‘‘Optimal design of back contact solar cells’’, 9th EC PVSEC, Freiburg(Germany), 1989, pp 447.

[30] J. P. Bailon, J. M. Borlot, ‘‘Des Matériaux’’, 3ème édition, 2001, p. 94.

[31] J. P. Mercier, W. Kurz, G. Zambelli, ‘‘Introduction à la science des matériaux’’, 3ème édition, Lausanne, 1999.

[32] V. Gorge, ‘‘Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V’’, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, 2012.

[33] P. A. Schultzl, O. Anatole von Lilienfeld, ‘‘Simple intrinsic defects in gallium arsenide’’, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. Vol 17, No 084007, 2009, p. 35.

[34] J. Dabrowski, M. Scheffler, ‘‘Theoretical evidence for an optically inducible structural transition of the isolated As antisite in GaAs: identification and explanation for of EL2’’, Phys. Rev. Lett, Vol 60, No 2183,1988.

[35] P. Omling, P. Silverberg and L. Samuelson, ‘‘Identification of a second energy level of EL2 in n-type GaAs’’, Phys. Rev. Vol B 38, 3606, 1988.

[36] M. Stucky, ‘‘Caracterisation des defauts lacunaires dans l'arseniure de gallium par annihilation de positons’’, Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, 1987.

[37] D. J. Chadi, ‘‘Arsenic antisite defect in GaAs: multiplicity of charge and spin states’’, Phys. Rev. vol B 68, No 193204, 2003.

[38] H. P. Komsa, A. Pasquarello, ‘‘Identification of defect levels at InxGa1-xAs/oxide interfaces through hybrid functionals’’, Microelectronic Engineering, vol 88, 2011, p.1436.

[39] D. Colleoni, A. Pasquarello, ‘‘Amphoteric defects in GaAs leading to Fermi-level pinning: A hybrid functional study’’, Microelectronic Engineering, vol 109, 2013, p.50.

[40] C. G. Vande Walle, M. Choi, J. R. Weber, J. L. Lyons, A. Janotti, ‘‘Defects at Ge/oxide and III–V/oxide interfaces’’, Microelectronic Engineering, vol 109, 2013, p. 211.

[41] M. Yamaguchi, T. Okuda, S. J. Taylor, T. Takamoto, Appl. Phys. Lett. Vol 70, No 1566, 1997.

[42] N. Dharmarasua, M. Yamaguchia, A. Khana, T. Takamotob, T. Ohshimac, H. Itohc, M. Imaizumid, S. Matsuda, ‘‘Deep-level transient spectroscopy analysis of proton-irradiated n+/p InGaP solar cells’’, No 308, 2001, p. 1181.

[43] A. Le Bloa, P. N. Favennec, Y. Colin, ‘‘DLTS method using a signle temperature scanning’’, Phys. Status Solidi. Vol 64, No 1, 1981, p. 85.

[44] S. M. Sze, ‘‘Physics of semiconductor devices’’, 2nd Ed, New-York: John Wiley & Sons, 1983, p. 868.

[45] P. K. Bhattacharya, S. Dhar, ‘‘Deep levels in III-V compound semiconductors, Semiconductors and semimetals’’, Edited by R.K. Willardson and A.C Beer. New-York: Academic Press, Vol 26, 1988, p. 144.

[46] M. Wolf, ‘‘Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters’’, Proc. Inst. Radio Engineers, vol 48, 1960, p. 1246.

[47] A. Luque, S. Hegedus, ‘‘Handbook of photovoltaic science and engineering’’, 2003.

[48] M. Green, D. Emerry, Y. Hishikawa, ‘‘Solar cell efficiency toldes’’, version 37, progressin PV, Vol 19, No 1, 2011, p. 84.

[49] A. Kergommeaux, ‘‘Synthèse de nouveaux types de nanocristaux semi-conducteurs pour application en cellules solaires’’, Thèse doctorat, Université Grenoble, 2012.

[50] B. Burnett, ‘‘The basic physics and design of III-V multijunction solar cells’’, 2002.

[51] M. Yamaguchi, ‘‘Present status of R&D super-high-efficiency III-V compound solar cells in Japan’’, 17th Photovoltaic European Conference, 2001.

[52] K. Zweibel, ‘‘Basic photovoltaic principles and methods’’, Van Nostrand Reinhold New York, 1984.

[53] F. Dimroth, ‘‘ Next generation GaInP/GaInAs/Ge multijonction space solar cells’’, proc. 17th, photovoltaic european conference, 2001.

[54] J. M. Román, ‘‘State-of-the-art of III-V solar cell fabrication technologies, device designs and applications’’, Advanced Photovoltaic Cell Design, 2004.

[55] V. Nikolić, N. Janković, ‘‘A Simulation Study of Experimental GaInP/InGaAs/GeTriple-junction Solar Cell’’, Proceedings of Small Systems Simulation Symposium Conference 2012, Ni. Serbia, 12th-14th, February 2012.

[56] H.Cotal, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, Yoon and H. N. Karam, ‘‘III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics’’, Energy Envior. Sci, Vol 2, 2009, p. 174.

[57] A. M. Diallo, ‘‘Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri-jonction’’,

thèse de maître en sciences, Sherbrooke, Québec, Canada, Décembre, 2011.

[58] S. Bacha, A. Bechiri, F. Benmakhlouf, N. Bouarissa, ‘‘Effects of substrate and compositional disorder upon optical and lattice vibration properties of quaternary semiconductor $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ’’, Infrared Physics & Technology, Vol 63, 2014, p. 22.

[59] K. Nishiokaa, T. Takamotob, T. Aguib, M. Kaneiwab, Y. Uraokac, T. Fuyuki, ‘‘Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell and optimization of solar cell’s structure focusing on series resistance for high-efficiency concentrator photovoltaic systems’’, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol 90, 2006, p. 1308.

[60] G. Segev, G. Mittelman, A. Kribus, ‘‘Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells’’, Solar Energy Materials&Solar Cells, Vol 98, 2012, p. 57.

[61] AMPS-1D Manual for Windows 95/NT, The Electronic Materials and Processing Research Laboratory at the Pennsylvania State University, University Park, PA16802.

[62] M. Chegaar, Z. Ouennoughi, F. Guechi, ‘‘Extracting dc parameters of solar cells under illumination’’, Vol 75, 2004, p. 367.

Résumé :

Dans ce mémoire, les cellules solaires triple jonction de structure InGaP/InGaAs/Ge destinées à des applications spatiales ont été simulées à l'aide du logiciel de simulation AMPS-1D. Cette simulation est portée sur deux voies : l'une est basée sur le modèle sans défauts dans les trois absorbeurs, l'autre tient compte des défauts de structure dans chaque absorbeur. Les caractéristiques J(V) obtenues sont exploitées pour l'extraction des paramètres photovoltaïques de chaque sous-cellule ainsi que de la cellule globale. Une modélisation sous environnement MATLAB des modèles à une exponentielle et à deux exponentielles a été exploité pour la détermination des résistances série et shunt.

Mots clés : AMPS-1D, cellule solaire triple jonction, InGaP/InGaAs/Ge, défauts, extraction.

Abstract:

In this memory, the InGaP/InGaAs/Ge triple junction solar cells intended for space applications were simulated using AMPS-1D simulation software. This simulation is based on two ways: One without defects consideration in the absorbers materials, and the other takes account of the structural defects in each absorber. J(V) Characteristics obtained were exploited for the extraction of the photovoltaic parameters of each subcell and of the global cell. A modelisation under MATLAB environment of one exponential and two exponential were exploited for determining serie and shunt resistances.

Key words: AMPS-1D, Triple junction solar cell, InGaP/InGaAs/Ge, defects, extraction.

الملخص:

في هذه المذكرة ،قمنا بمحاكاة الخلايا الشمسية ثلاثية الوصلة InGaP/InGaAs/Ge ، المخصصة للتطبيقات الفضائية بواسطة برنامج المحاكاة AMPS-1D . هذه المحاكاة اتخذت طريقين: الأول باعتبار أن المواد لا تحتوي على أية عيوب. بينما الثاني يأخذ بعين الاعتبار عيوب البنية في كل خلية تحتية.

الخصائص الناتجة تستثمر من أجل استخراج المعايير الكهربائية لكل خلية تحتية و الخلية الكلية. النمذجة باستعمال برنامج MATLAB للنوعين ذو أس واحد و ذو أسين تمت لتعيين المقاومتين على التسلسل و على التفرع.

كلمات مفتاحية : AMPS-1D، عيوب، استخراج، InGaP/InGaAs/ Ge ،الخلية الشمسية ثلاثية الوصلة.